



Ricerca di Sistema elettrico

Condizionamento climatico nella filiera agro-alimentare con sistemi innovativi di poligenerazione energetica

G. Vox, F. Convertino, I. Blanco, E. Schettini

CONDIZIONAMENTO CLIMATICO NELLA FILIERA AGRO-ALIMENTARE CON SISTEMI INNOVATIVI DI POLIGENERAZIONE ENERGETICA

G. Vox, F. Convertino, I. Blanco, E. Schettini (Università degli Studi di Bari Aldo Moro – Dipartimento di Scienze Agro-ambientali e Territoriali)

Con il contributo di: G. Scarascia Mugnozza (Università degli Studi di Bari Aldo Moro – Dipartimento di Scienze Agro-ambientali e Territoriali)

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: 3 - Componenti e impianti innovativi per incrementare l'efficienza energetica e l'uso delle fonti rinnovabili negli edifici

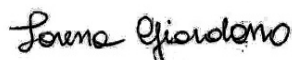
Linea di attività: LA3.34 - Comparazione sperimentale tra sistemi di distribuzione del freddo. Definizione di sistemi di riscaldamento della zona di coltivazione in serra

Responsabile del Progetto: Giovanni Puglisi, ENEA

Responsabile del Work package: Biagio Di Pietra, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Condizionamento climatico nella filiera agro-alimentare con sistemi innovativi di poligenerazione energetica"

Responsabile scientifico ENEA: Lorena Giordano



Responsabile scientifico Università degli Studi di Bari Aldo Moro – DISAAT: Evelia Schettini



Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	5
2.1 SPERIMENTAZIONE DI UN SISTEMA DI RAFFREDDAMENTO DEL SUBSTRATO DI COLTIVAZIONE	5
2.2 DEFINIZIONE DELLO STATO DELL'ARTE DEI SISTEMI DI RISCALDAMENTO IN SERRA	30
2.3 DEFINIZIONE DEI REQUISITI MICROCLIMATICI INVERNALI DELLA SERRA SPERIMENTALE	40
2.4 PUBBLICAZIONI DEL GRUPPO DI RICERCA.....	50
3 CONCLUSIONI.....	51
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	51
5 BREVE CURRICULUM SCIENTIFICO DEL GRUPPO DI LAVORO.....	53

Sommario

Il gruppo di ricerca del Dipartimento di Scienze Agro Ambientali e Territoriali (DISAAT) dell'Università degli Studi di Bari Aldo Moro ha realizzato una ricerca sul condizionamento climatico di una serra.

Per quanto concerne il raffrescamento in serra, l'attività sperimentale è stata incentrata sullo sfruttamento della tecnologia basata su un impianto di solar cooling. Lo studio è stato focalizzato sulla verifica di sistemi innovativi di distribuzione del freddo alla zona di coltivazione in serra. Sono stati testati due sistemi: a tubi interrati nel substrato di coltivazione e a piastre e tubi posti nella zona areale delle piante. Si sono analizzati gli effetti sulla crescita di piante di pomodoro dei due sistemi di raffrescamento; questi sono stati confrontati tra loro e con la condizione di assenza di raffrescamento localizzato. Le conseguenze dell'utilizzo di tali sistemi, sulla temperatura del substrato e dell'aria della zona di coltivazione, sono risultate evidenti. Il sistema a tubi interrati ha prodotto il maggior raffrescamento del terreno, mentre il sistema a piastre e tubi ha fatto registrare il più sensibile raffrescamento dell'aria. Le misurazioni dei valori di temperatura sono state integrate con quelle relative ad una prova agronomica, al fine di analizzare gli effetti dei due sistemi di raffrescamento sulla crescita e sulla produzione di piante di pomodori. I parametri monitorati sono stati l'altezza delle piante, il numero di foglie e la quantità di pomodori prodotti. È stato osservato che le piante raffrescate con il sistema a piastre e tubi sono cresciute maggiormente ed hanno registrato il maggior numero di foglie per pianta, rispetto alle altre. Inoltre, le piante raffrescate mediante piastre e tubi hanno prodotto anche la maggior quantità di pomodori. Pertanto, la soluzione di distribuzione del freddo caratterizzata da piastre e tubi è risultata essere la migliore dal punto di vista agronomico.

In relazione alle esigenze di riscaldamento invernali della serra, l'attività di ricerca ha previsto la valutazione delle alternative tecnologiche disponibili, alla luce dei requisiti che un impianto di riscaldamento per serra deve possedere. Sono stati analizzati sia i sistemi statici che quelli dinamici; sono stati presi in considerazione anche innovativi impianti alimentati da fonti energetiche rinnovabili.

Sono state investigate le esigenze microclimatiche invernali delle colture in serra. I dati sperimentali raccolti hanno consentito un'analisi dei parametri climatici del sito e di quelli ambientali all'interno della serra sperimentale, che è, attualmente, una serra fredda. La disponibilità di radiazione solare e la temperatura dell'aria esterna e in serra assumono grande rilievo. Tali valori sono stati messi in relazione con le esigenze microclimatiche di varie specie coltivate in serra. In particolare, sono stati considerati i limiti termici minimi ed ottimali dell'aria per le diverse piante. Le necessità di riscaldamento invernale delle colture, sono state, quindi, calcolate in termini di numero di ore di accensione dell'impianto di riscaldamento, per garantire temperature dell'aria in serra superiori a quelle registrate e compatibili con i valori limite delle piante. Si è potuto constatare che le richieste energetiche per il riscaldamento invernale della serra sono considerevoli. Emerge, pertanto, l'esigenza di adozione di sistemi di climatizzazione che sfruttano fonti diversificate e rinnovabili.

1 Introduzione

Le produzioni orticole così come quelle floricole realizzate in ambiente protetto richiedono sistemi capaci di garantire condizioni microclimatiche controllate durante tutto l'anno, con particolare riferimento a parametri quali la temperatura e l'umidità relativa dell'aria, la temperatura del suolo o del substrato di coltivazione, il livello di radiazione cui sono esposte le piante. Sfruttando la radiazione solare si devono ottenere all'interno dell'ambiente confinato condizioni ambientali favorevoli alla crescita, allo sviluppo e alla massima produttività delle piante in epoca anticipata o ritardata rispetto a quella normalmente ottenibile in pieno campo o rispetto alla coltivazione di piante originarie di zone con clima molto diverso da quello locale. Questo richiede l'intervento di sistemi di condizionamento climatico. La coltivazione in serra avviene in ambiente controllato e, dunque, risulta necessario impiegare mezzi tecnici, chimici, idrici ed energetici con conseguenti notevoli emissioni di gas serra in atmosfera ed effluenti inquinanti. Le serre commerciali richiedono un alto input energetico per il funzionamento di sistemi impiegati per ottenere le condizioni microclimatiche interne idonee allo sviluppo vegetativo e quindi buone rese e alta qualità dei prodotti nel settore orticolo e floricolo.

Nel settore serra l'uso di fonti rinnovabili e di opportuni interventi di efficientamento tecnologico può essere una strategia per ridurre le emissioni di gas serra del processo di produzione, per incrementare la produzione di energia elettrica o termica da fonti rinnovabili, a discapito dell'energia derivante da fonti convenzionali, al fine di innalzare i livelli di sostenibilità ambientale del processo di coltivazione [1]–[10]. In particolare, a livello nazionale, il comparto serra potrebbe ridurre del 25% i consumi di energia nell'irrigazione e fino al 70% i consumi di energia connessi ai sistemi di riscaldamento e raffrescamento, con un ritorno degli investimenti compreso tra 5 e 7 anni.

2 Descrizione delle attività svolte e risultati

Le attività svolte dal gruppo di ricerca del Dipartimento di Scienze Agro-Ambientali e Territoriali dell'Università degli Studi di Bari Aldo Moro nell'ambito della linea di attività LA 3.34 "Comparazione sperimentale tra sistemi di distribuzione del freddo. Definizione di sistemi di riscaldamento della zona di coltivazione in serra" riguardano: una prova sperimentale eseguita per comparare la crescita di piante di pomodoro coltivate utilizzando due diversi sistemi di distribuzione del freddo in una serra dotata di un impianto di raffrescamento solar cooling (paragrafo 2.1); la definizione dello stato dell'arte dei sistemi di riscaldamento in serra (paragrafo 2.2); la definizione delle esigenze microclimatiche invernali delle colture in serra (paragrafo 2.3). Le attività svolte sono state presentate a convegni nazionali ed internazionali ed hanno consentito di elaborare due pubblicazioni (paragrafo 2.4).

2.1 *Sperimentazione di un sistema di raffreddamento del substrato di coltivazione*

Il gruppo di ricerca dell'Università di Bari svolge attività di sperimentazione sull'applicazione di una tecnologia per il raffrescamento di una serra basata sullo sfruttamento dell'energia solare. La sperimentazione è condotta presso il Centro sperimentale "P. Martucci" dell'Università di Bari A. Moro, in località Valenzano (BA) (Figura 1).

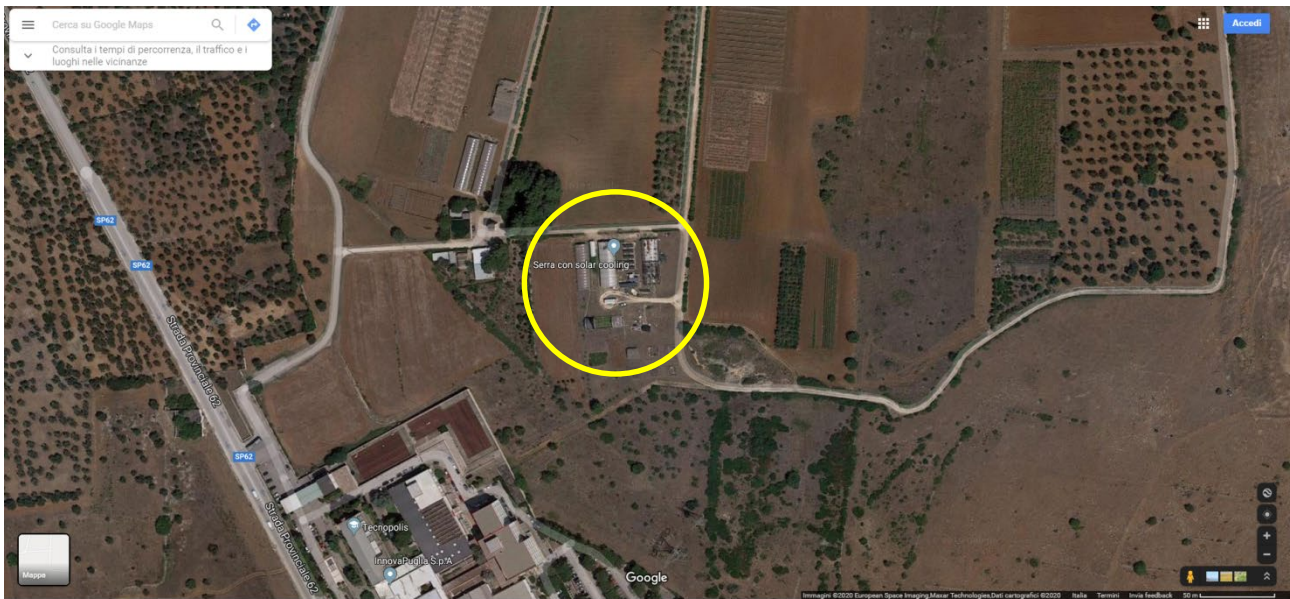


Figura 1. Google Maps: Centro sperimentale “P. Martucci” dell’Università di Bari, Valenzano (BA), latitudine 41° 01' N, longitudine 16° 54' E, altitudine 85 m s.l.m.

La serra sperimentale, realizzata in acciaio con copertura in film plastico, è una serra per coltivazioni fuori suolo. L’asse longitudinale della serra ha un orientamento nord-sud. La serra è caratterizzata dalle seguenti dimensioni geometriche: 30.00 m di lunghezza, 10.00 m di larghezza, 4.45 m di altezza di colmo e 2.45 m di altezza di gronda. La serra è dotata di aperture al colmo e lungo le pareti laterali per consentire la ventilazione naturale.

Il film di copertura è un film in Etilene-Vinil-Acetato (EVA), caratterizzato da uno spessore di 0.20 mm (Patilite E, P.A.T.I., San Zenone degli Ezzelini, Treviso, Italia). Le caratteristiche radiometriche del film in EVA sono: trasmittività totale solare pari al 74.9%, trasmittività diretta solare pari al 40.7 %, trasmittività nell’infrarosso lungo (LWIR-Long Wave Infrared) pari al 10.6 %, quindi con effetto serra pari a 89.4 %.

All’interno della serra le piante sono coltivate in fuori suolo. I vasi utilizzati sono rettangolari, di dimensioni 1.00 m x 0.40 m x 0.40 m, e sono disposti trasversalmente all’asse longitudinale della serra in numero di 6 per fila. L’irrigazione alle piante è fornita mediante un sistema di irrigazione puntuale a goccia.

La serra è dotata di un impianto di raffrescamento solar cooling, composto da due sottosistemi: il sottosistema solare e il sottosistema refrigerante (Figura 2).

Il sottosistema solare serve per la produzione di acqua calda alla temperatura necessaria per mettere in funzione il chiller ad assorbimento. Le componenti principali di questo sottosistema sono: il campo solare, un serbatoio di accumulo termico e il dry cooler di smaltimento del calore in eccesso (Figura 3).

Il campo solare è realizzato con 15 collettori solari (model Sky PRO CPC 58-1800-20, Kloben, Verona, Italy) fissati sul terreno con un’inclinazione di 40° e orientati verso Sud (Figura 4). Le specifiche tecniche sono descritte in Figura 5.

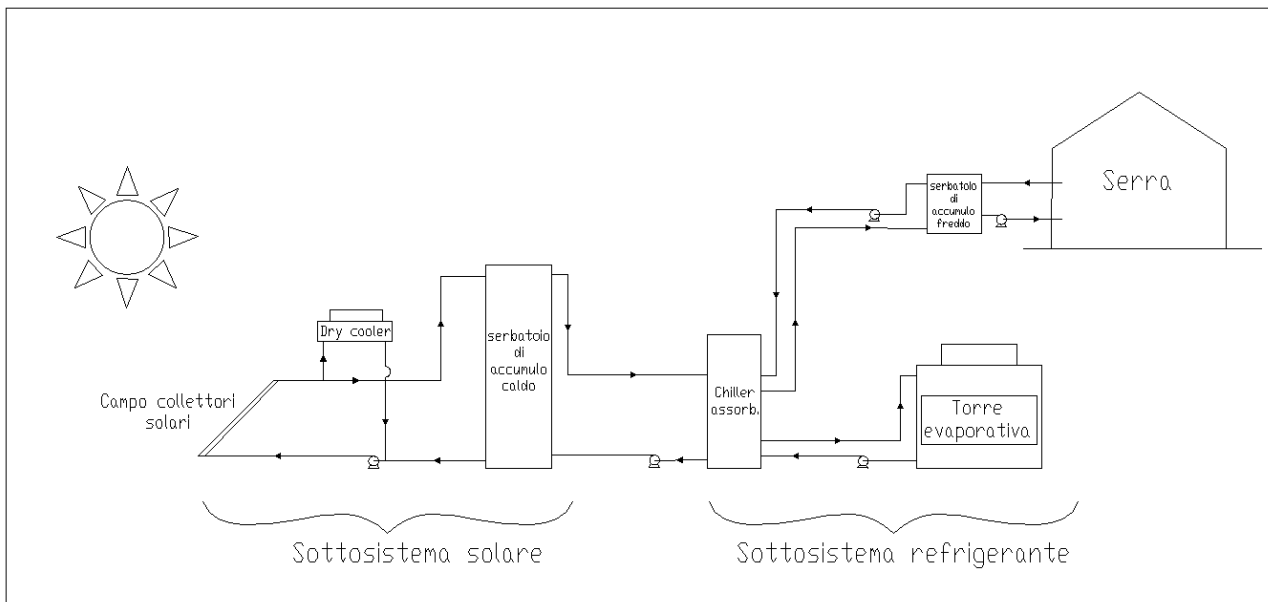


Figura 2. Schema impianto di solar cooling presso l'Università di Bari.

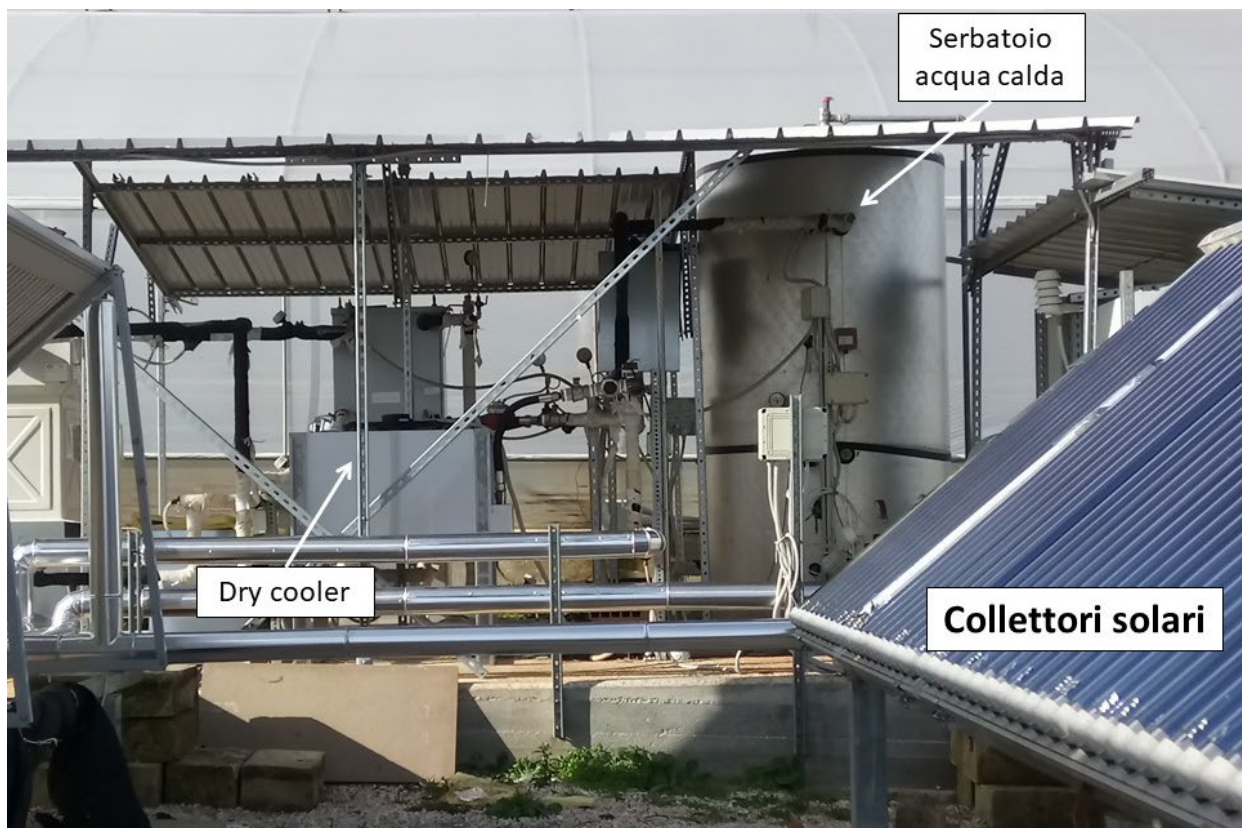


Figura 3. Il sottosistema solare dell'impianto di solar cooling presso l'Università di Bari.



Figura 4. Il campo solare dell'impianto di solar cooling presso l'Università di Bari.



Figura 5. Caratteristiche geometriche e specifiche tecniche dei collettori solari utilizzati nell'impianto di solar cooling presso l'Università di Bari.

Il serbatoio per l'acqua calda (model PVR-15/742, Pacetti, Ferrara, Italy), con una capacità di 2000 l, ha la funzione cuscinetto in quanto consente di immagazzinare l'acqua calda proveniente dai collettori solari e fornirla, quando necessaria, per alimentare il chiller.

Il dry cooler (Thermocold, Bari, Italy) è un dispositivo di emergenza utilizzato solo nel caso in cui l'acqua calda proveniente dai collettori solari ha una temperatura superiore a 95 °C.

Il sottosistema frigorifero è composto dal chiller ad assorbimento, dalla torre evaporativa e dal serbatoio per l'accumulo di acqua fredda (Figura 6). La capacità refrigerante del chiller ad assorbimento è impiegata per raffreddare il fluido refrigerante utilizzato per il condizionamento estivo della serra.

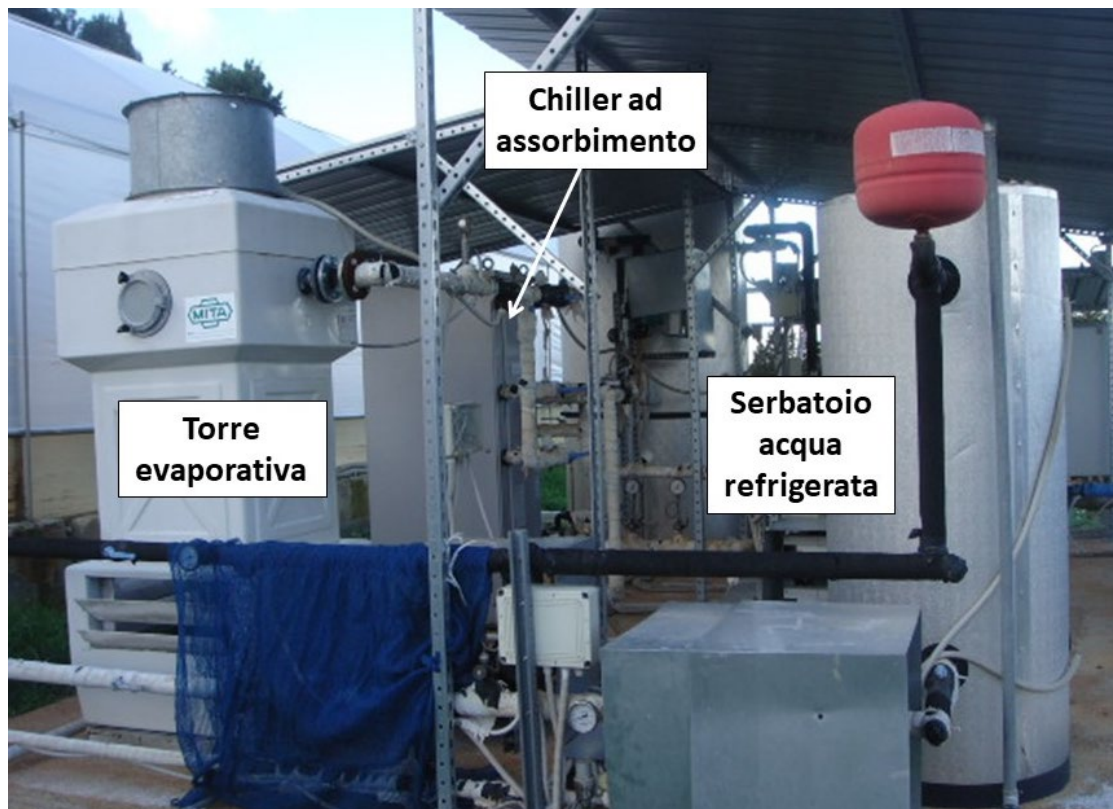


Figura 6. Il sottosistema refrigerante dell'impianto di solar cooling presso l'Università di Bari.

Il chiller utilizzato è un chiller ad assorbimento a singolo effetto che impiega una soluzione $H_2O/LiBr$ (model WFC SC5, Yazaki, Shizuoka-ken, Japan) con capacità frigorifera pari a 17.6 kW (Figura 7). Il chiller è caratterizzato da alta affidabilità funzionale ed utilizza il bromuro di litio (LiBr), sale non tossico, come fluido assorbente per la sua capacità di assorbire il vapore acqueo, e l'acqua (H_2O) come refrigerante. La soluzione $H_2O/LiBr$ opera sottovuoto durante l'intero ciclo. I due fluidi sono utilizzati per l'alto rapporto di volatilità che ne consente una facile separazione. La soluzione è caratterizzata da un elevato calore latente del refrigerante, cui si aggiunge un basso calore di diluizione. La miscela ha un alto grado di sicurezza essendo chimicamente stabile, non infiammabile, atossica, ecologicamente pulita e non dannosa per l'ambiente. Le specifiche tecniche e le caratteristiche geometriche del chiller ad assorbimento sono descritte in

Tabella 1.

La torre evaporativa con vasca di raccolta acqua (model PMS 6/65, MITA, Siziano, Pavia, Italy) serve per rimuovere il calore generato dal chiller di assorbimento. Il funzionamento della torre evaporativa è basato sull'utilizzazione del calore latente di evaporazione dell'acqua. Mettendo a contatto nella torre una portata d'acqua, finemente suddivisa, con una corrente d'aria, una piccola quantità di acqua viene assorbita per evaporazione dalla corrente d'aria, sottraendo il suo calore latente di evaporazione all'acqua restante. Le specifiche tecniche della torre evaporativa sono descritte in Tabella 2.

Il serbatoio per l'acqua fredda (model VT-V6GCA, Pacetti, Ferrara, Italy), con una capacità di 500 l, immagazzina acqua fredda prodotta dal chiller. La presenza sia del serbatoio caldo che di quello freddo consente un uso razionale dell'impianto in quanto riduce la discrepanza tra la richiesta di raffrescamento e la produzione di energia frigorifera.

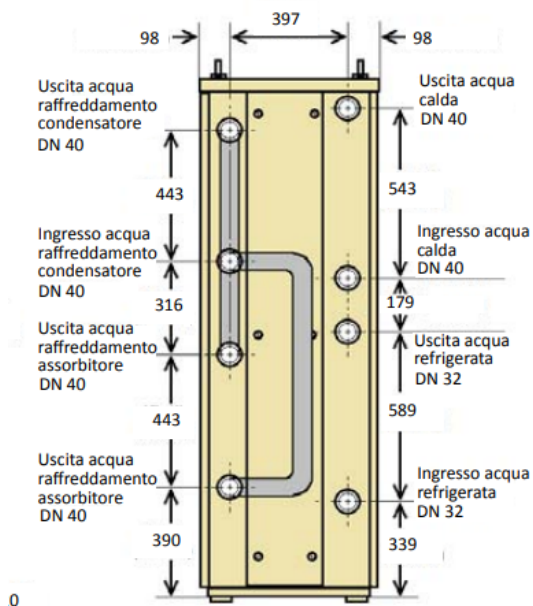


Figura 7. Chiller ad assorbimento (Yazaki WFC-SC 5) dell’impianto di solar cooling presso l’Università di Bari.

Tabella 1. Caratteristiche geometriche e specifiche tecniche del chiller ad assorbimento dell’impianto di solar cooling presso l’Università di Bari.

Potenza frigorifera			kW	17.6
Acqua refrigerata	Temperatura	Ingresso	°C	12.5
		Uscita	°C	7
Acqua raffreddamento	Temperatura	Potenza dissipata	kW	42.7
		Ingresso	°C	31
		Uscita	°C	35
		Potenza assorbita	kW	25.1
Acqua calda	Temperatura	Ingresso	°C	88
		Uscita	°C	83
		Intervallo alimentazione	°C	Min. 70 – Max 95
Dimensioni	Larghezza		mm	594
	Profondità		mm	744
	Altezza		mm	1786
Peso	A vuoto		kg	365
	In esercizio		kg	420
Rumorosità	Livello sonoro dB(A) a 1 metro			46
COP – coefficiente di prestazione termica				0.7

Tabella 2. Caratteristiche geometriche e specifiche tecniche della torre evaporativa dell’impianto di solar cooling presso l’Università di Bari.

Potenza resa		kW	42.7	
Acqua	Temperatura	Ingresso	°C	35
		Uscita	°C	31
	Portata nominale	l/s	2.55	
	Perdita di carico	kPa	4	
	Bulbo umido	°C	26	
Aria	Acqua evaporata max	l/m	1.11	
	Ventilatori	n°	1	
	Potenza assorbita	kW	0.55	
	Portata d'aria (max)	mc/s	1.19	
Alimentazione	Elettrica		400 V 3 fasi 50Hz	
Motore			4 poli	
Dimensioni	Larghezza	mm	800	
	Profondità	mm	800	
	Altezza	mm	2110	
Peso	A vuoto	kg	75	
	In esercizio	kg	180	
Rumorosità	Livello sonoro dB(A) a 3 metri in campo libero rilevato sulla sommità		55.3 a 10 m	

Entrambi i sottosistemi sono caratterizzati da strumentazioni di misura e da sistemi di acquisizione dati, oltre che da apparecchiature quali pompe, valvole, tubazioni. Un sistema di acquisizione dati e di controllo è stato specificamente sviluppato da Emerson Climate Technologies Retail Solutions Europe S.r.l. (Saronno Varese, Italia).

La ricerca in atto presso l'Università di Bari si propone di verificare sistemi innovativi di distribuzione del freddo alle coltivazioni realizzate in serra. Attualmente, per gli insediamenti produttivi più diffusi, il raffrescamento in serra è realizzato con ombreggiamento, ventilazione naturale o forzata e, nei periodi con le temperature più elevate, con sistemi che utilizzano l'evaporazione dell'acqua, cioè i pannelli evaporativi e i fog system. Tali sistemi sono realizzati in maniera da raffrescare tutto il volume della serra, con consumi energetici ed idrici non trascurabili.

La presente ricerca si è invece indirizzata sul raffreddamento localizzato dell'area di coltivazione, utilizzando il freddo prodotto dal sistema di solar cooling. In questo caso, infatti, la disponibilità di energia di raffreddamento, distribuibile mediante acqua in tubazioni, ha consentito il raffreddamento localizzato, non applicabile con i sistemi evaporativi. Questi, inoltre, producono aria molto umida difficilmente convogliabile direttamente sulle piante, anche perché elevati valori di umidità relativa potrebbero essere dannosi per le piante stesse.

Il gruppo di ricerca dell'Università di Bari ha focalizzato la sua attenzione sulla metodologia di trasferimento alla zona di coltivazione in serra dell'energia di raffreddamento prodotta dall'impianto composto dall'assorbitore alimentato dal campo di collettori solari.

All'interno della serra è posizionato un sistema di tubazioni principali di mandata che collegano il serbatoio freddo al sistema di distribuzione del freddo e di tubazioni principali di ritorno che trasportano l'acqua ormai non più fredda dall'interno all'esterno della serra. I tubi principali a sezione circolare con diametro pari a 32 mm trasportano all'interno della serra l'acqua fredda dal serbatoio freddo (Figura 8). Queste tubazioni, opportunamente coibentate, sono lunghe circa 42 m. All'interno della serra sono posizionati, inoltre, dei tubi coibentati a sezione circolare con diametro pari a 12.7 mm; questi congiungono i tubi principali al sistema di distribuzione del freddo in prossimità delle piante (Figura 9).

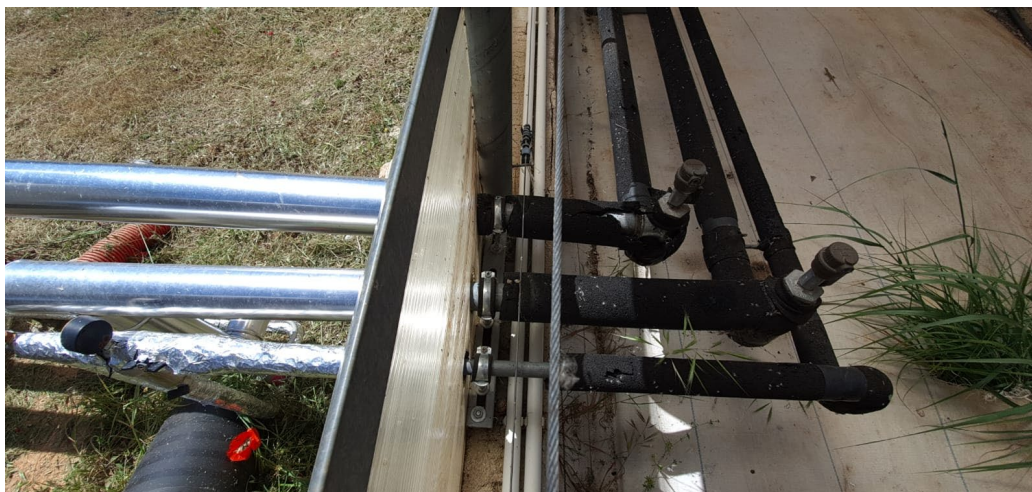


Figura 8: Tubazioni principali che trasportano all'interno della serra l'acqua fredda dal serbatoio freddo



Figura 9: Tubazioni di congiunzione all'interno della serra

Durante il 2019 sono stati testati due sistemi di distribuzione del freddo in prossimità delle piante al fine di ottenere un microclima ottimale per la crescita delle piante in estate. Il primo sistema, denominato “tubo interrato”, è caratterizzato da tubi attraversati da acqua fredda posizionati all'interno del substrato di coltivazione (Figura 10). I tubi sono in Polietilene (PE) con diametro 16 mm; la lunghezza per ogni linea di coltivazione è di 12 m considerando mandata e ritorno. Il secondo sistema, denominato “piastra e tubo”, è costituito da piastre metalliche raffreddate dai tubi e poste nella zona aerea delle piante. I tubi hanno diametro 12.7 mm. I tubi attraversati da acqua fredda sono posizionati sopra i vasi di coltivazione in prossimità di uno dei bordi longitudinali e sono a contatto con piastre di alluminio, caratterizzate da uno spessore di 0,5 mm; sono presenti anche dei pannelli di polistirolo, di 3 cm di spessore, per la coibentazione posteriore delle piastre (Figura 11).

Nell'ambito della scelta di utilizzare acqua refrigerante distribuibile in tubazioni, il sistema di raffreddamento a tubi interrati raffredda direttamente il substrato di coltivazione, mentre il sistema piastra e tubo è un dispositivo che raffredda l'aria in prossimità delle piante.

Le piastre in alluminio utilizzate per il raffreddamento dell'area di coltivazione sono state testate in laboratorio presso il Dipartimento DISAAT dell'Università di Bari. Le misure radiometriche, nell'intervallo di lunghezze d'onda dell'infrarosso lungo compreso tra 2500 e 25000 nm (LWIR), sono state eseguite con uno spettrofotometro FT-IR (1760 X, Perkin Elmer Instruments, Norwalk, CT, USA) con passo di 4 cm^{-1} . Il coefficiente di emissività nel range LWIR è stato calcolato come valore medio dell'emissività spettrale nel range di lunghezza d'onda da 7500 a 12500 nm [11]–[12]. Questo intervallo corrisponde alla lunghezza d'onda in cui l'emissione dei corpi a temperatura ambiente è massima, essendo un indice della capacità del

materiale di emettere e ricevere radiazioni e quindi disperdere calore. Il valore del coefficiente di emissività delle piastre di alluminio, valutato come media fra 7500 e 12500 nm, è pari al 0.234.



Figura 10. Sistema di distribuzione del freddo denominato "tubo interrato", realizzato con tubi posizionati all'interno del substrato di coltivazione.

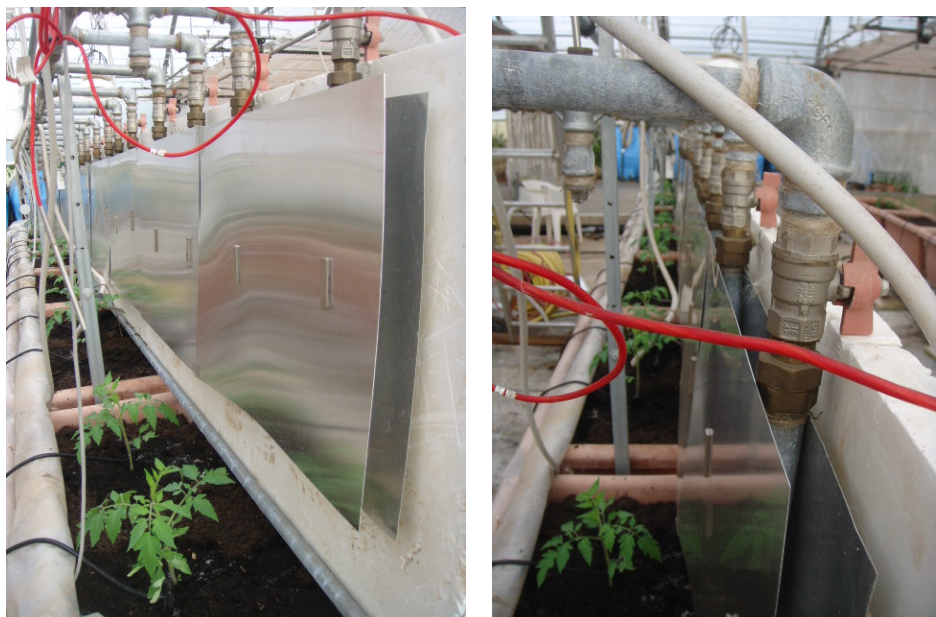


Figura 11. Sistema di distribuzione del freddo denominato "piastra e tubo" costituito da tubi posizionati sopra i vasi di coltivazione a contatto con piastre di alluminio.

Il campo sperimentale è dotato di una stazione meteorologica e di un sistema di sensori interfacciati con un data logger per l'acquisizione in continua e la memorizzazione dei dati. I dati sono misurati con una frequenza di 60 s, la media è eseguita ogni 15 minuti, i dati sono memorizzati nel data logger (CR10X, Campbell, Logan, USA). I parametri rilevati sono: la radiazione solare; la temperatura dell'aria esterna ed in serra; l'umidità relativa dell'aria esterna e in serra; la temperatura di mandata e ritorno per il campo solare, il serbatoio caldo, l'assorbitore, il serbatoio freddo, la tubazione di raffreddamento in serra; le portate volumetriche fra i vari componenti dell'impianto di solar cooling e verso la serra.

La temperatura dell'aria esterna, dell'aria all'interno della serra e dell'aria in prossimità delle piante è misurata utilizzando dei termistori (Tecno.el s.r.l. Formello, Roma, Italia) (Figura 12-Figura 13a). Anche la temperatura del terreno è misurata mediante termistori (Tecno.el s.r.l. Formello, Roma, Italia) (Figura 13b). La radiazione solare è misurata utilizzando un piranometro (modello 8-48, Eppley Laboratory, Newport, RI, USA) nella gamma di lunghezze d'onda 0,3-3 mm. La temperatura dell'acqua che scorre all'interno dei tubi è misurata per mezzo di PT100 (Tecno.el s.r.l., Formello, Roma, Italia) (Figura 14). La portata volumetrica alla quale l'acqua scorre attraverso un tubo è misurata da un misuratore di volume (modello MTH3, GWF MessSysteme AG, Lucerna, Svizzera) (Figura 15a). Valvole di bilanciamento (Caleffi S.p.A., Fontaneto d'Agogna (NO), Italia) consentono di regolare la portata di fluido che scorre nei tubi nella zona di coltivazione al fine di garantire il funzionamento dell'impianto nelle condizioni di progetto ottimali (Figura 15b).

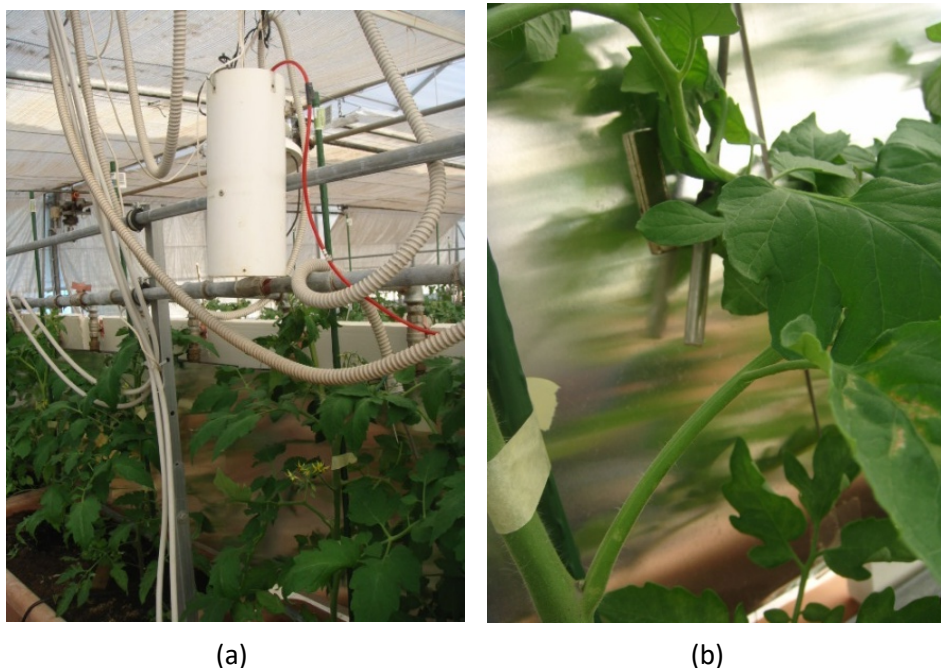


Figura 12. Termistore per la misura della temperatura dell'aria in prossimità delle piante.



(a)

(b)

Figura 13. Sensori: a) Termistore per la misura della temperatura dell'aria in prossimità delle piante; b) termistore per la misura della temperatura del terreno.



Figura 14. Termistore PT100 per misurare la temperatura dell'acqua che scorre all'interno dei tubi.

Il sistema di distribuzione del freddo nelle aree di coltivazione ha prodotto un effetto diverso in funzione delle due tecniche adottate, cioè distribuzione con piastra e tubo e distribuzione con tubo interrato.

La Figura 16 e la Figura 17 mostrano, per due differenti giorni, la potenza di raffreddamento erogata sulla linea di coltivazione con piastra e tubo e sulla linea con tubo interrato; nelle stesse figure è inoltre mostrata la potenza frigorifera prodotta dall'assorbitore e la radiazione solare incidente su un piano orizzontale.

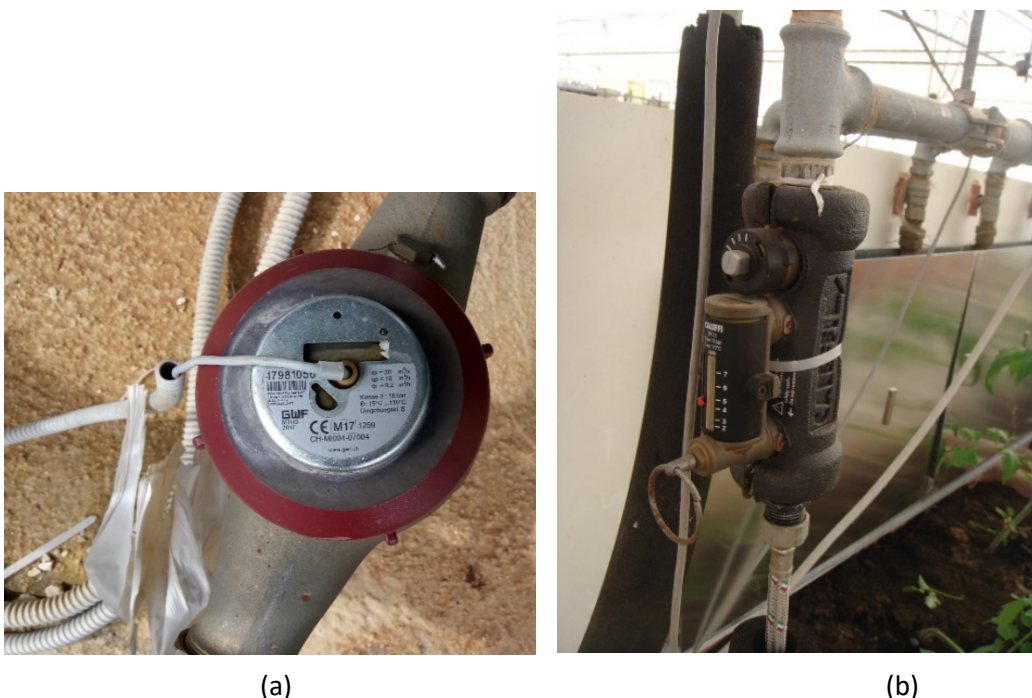


Figura 15. a) Misuratore ad impulsi della portata volumetrica; b) regolatore di portata.

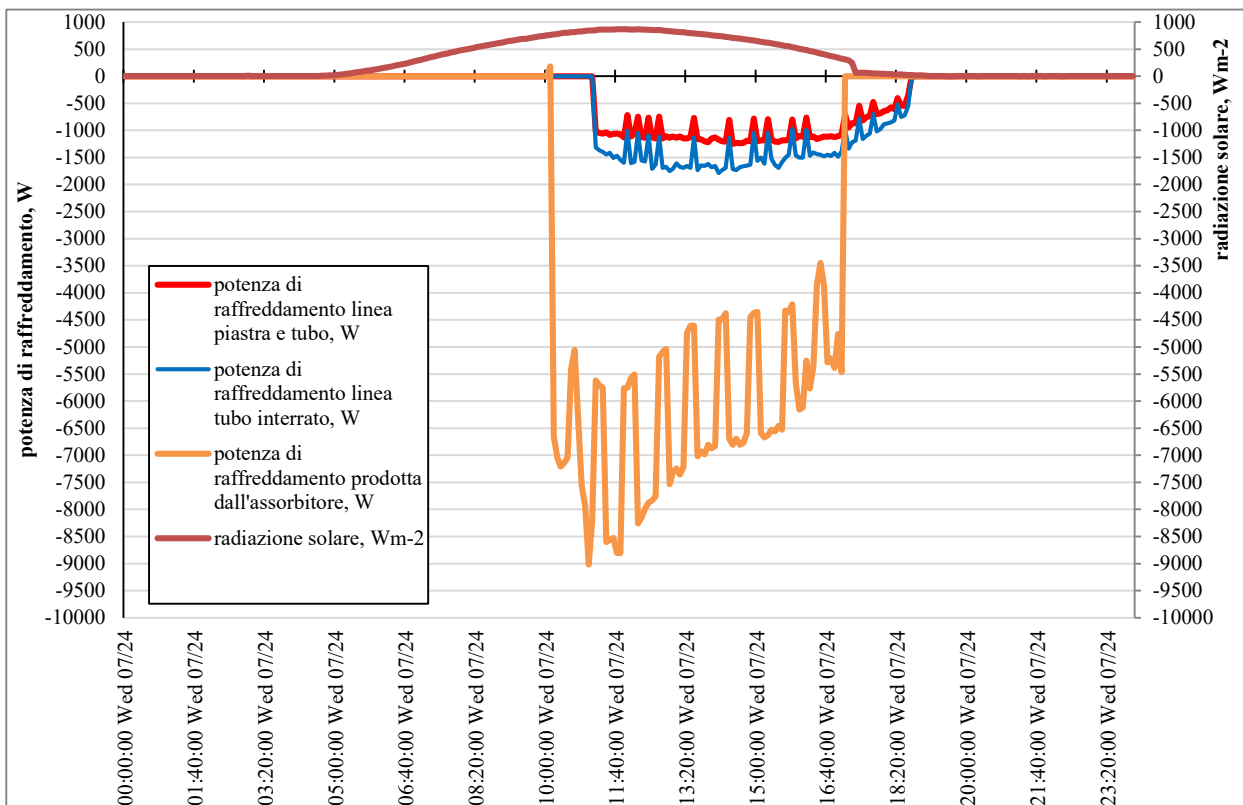


Figura 16. Potenza di raffreddamento fornita dall'assorbitore ed erogata sulla linea di coltivazione con piastra tubo e con tubo interrato; radiazione solare; 24/07/2019.

La potenza erogata dalle linee è una frazione della potenza fornita dall'assorbitore, che alimenta il serbatoio freddo e da questo viene erogata in serra alle linee di raffreddamento. Questo avviene quando la

temperatura dell'aria in serra supera il valore fissato di set-point, 32 °C. L'erogazione dell'energia di raffreddamento dal serbatoio freddo avviene quando l'acqua contenuta nel serbatoio è sufficientemente fredda, cioè minore di 16°C.

L'azione di raffreddamento dell'assorbitore si avvia quando la radiazione solare supera il valore di 600 Wm⁻². Il sistema necessita di tempo per erogare acqua di raffreddamento alla serra, poiché è necessario che l'acqua nel serbatoio freddo si raffreddi, e questo richiede poco più di un'ora nelle giornate con cielo sereno.

I dati registrati per le due linee mostrano come la potenza di raffreddamento assorbita dalla linea con tubo interrato sia più elevata di quella assorbita dalla linea con piastra e tubo (Figura 16 e Figura 17). Questo si può giustificare con il fatto che il raffreddamento del terreno richiede più energia di quello dell'aria, in quanto il terreno ha un'elevata capacità termica rispetto all'aria e tende ad accumulare il calore apportato dall'energia solare e conservato in modo amplificato per effetto serra nell'ambiente protetto.

L'applicazione dei sistemi di raffreddamento ha avuto un evidente effetto sul microclima delle zone di coltivazione. La Figura 18 mostra la temperatura dell'aria misurata nella zona di coltivazione in presenza di raffreddamento con piastra e tubo, con tubi interrati e in assenza di raffreddamento (controllo). Le misure sono relative ai giorni 24 e 25 luglio 2019. Le stesse misure sono illustrate in Figura 19 per i giorni 7 ed 8 agosto 2019.

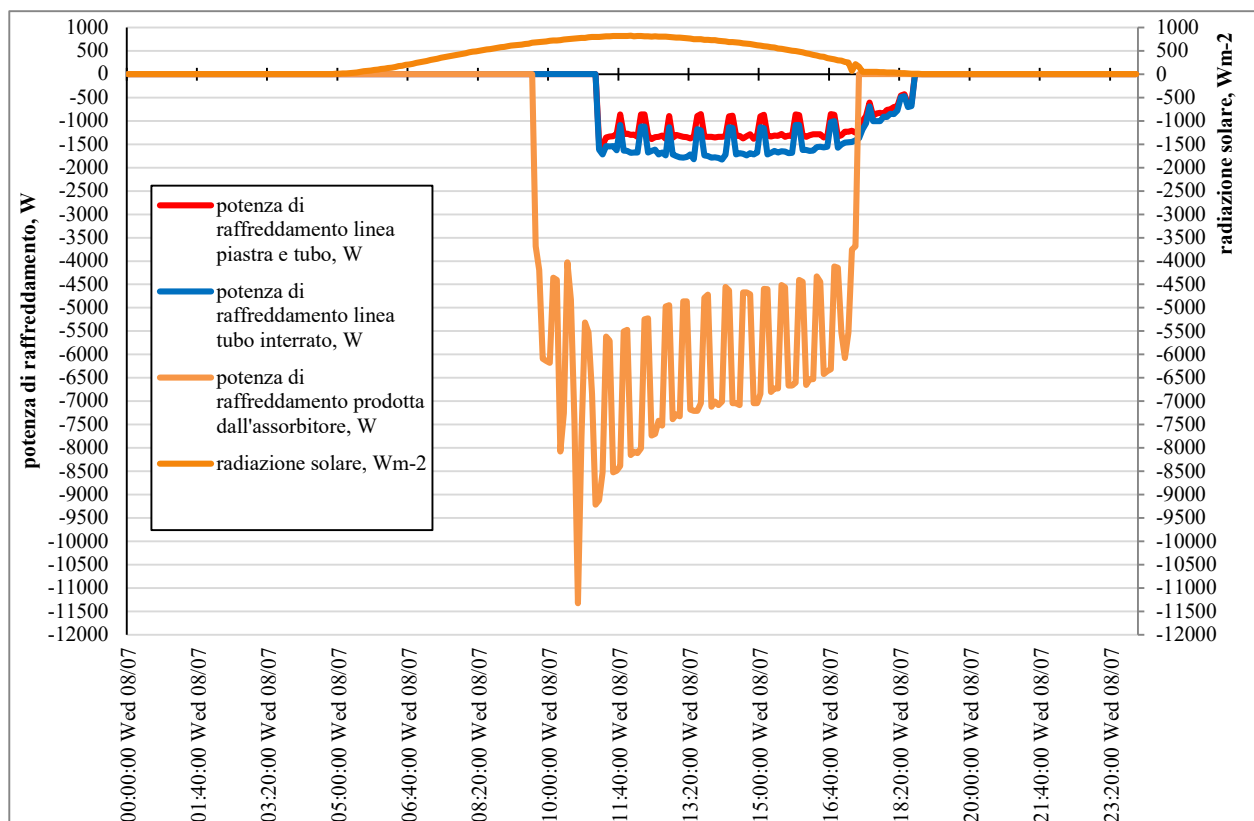


Figura 17. Potenza di raffreddamento fornita dall'assorbitore ed erogata sulla linea di coltivazione con piastra e tubo e con tubo interrato; radiazione solare; 07/08/2019.

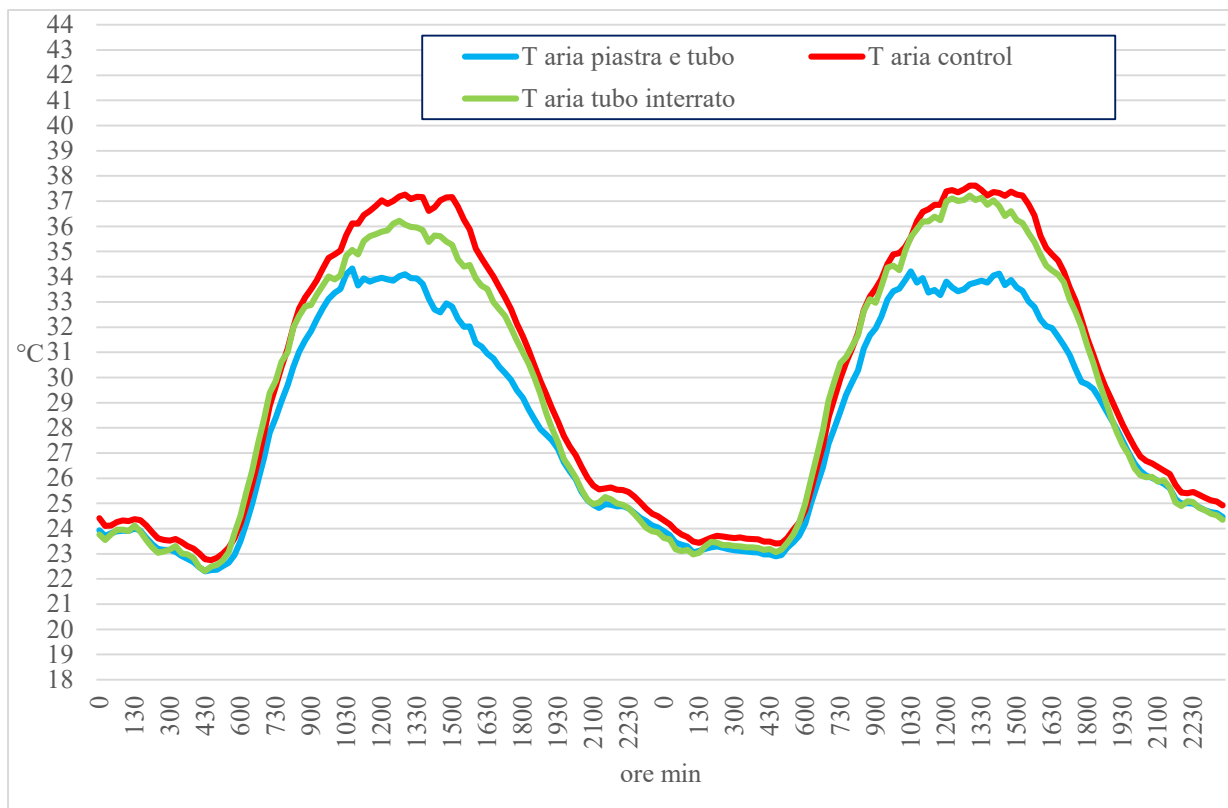


Figura 18. Temperatura dell'aria misurata nella zona di coltivazione in presenza di raffreddamento con piastra e tubo, con tubi interrati e in assenza di raffreddamento (control), 24-25/07/2019.

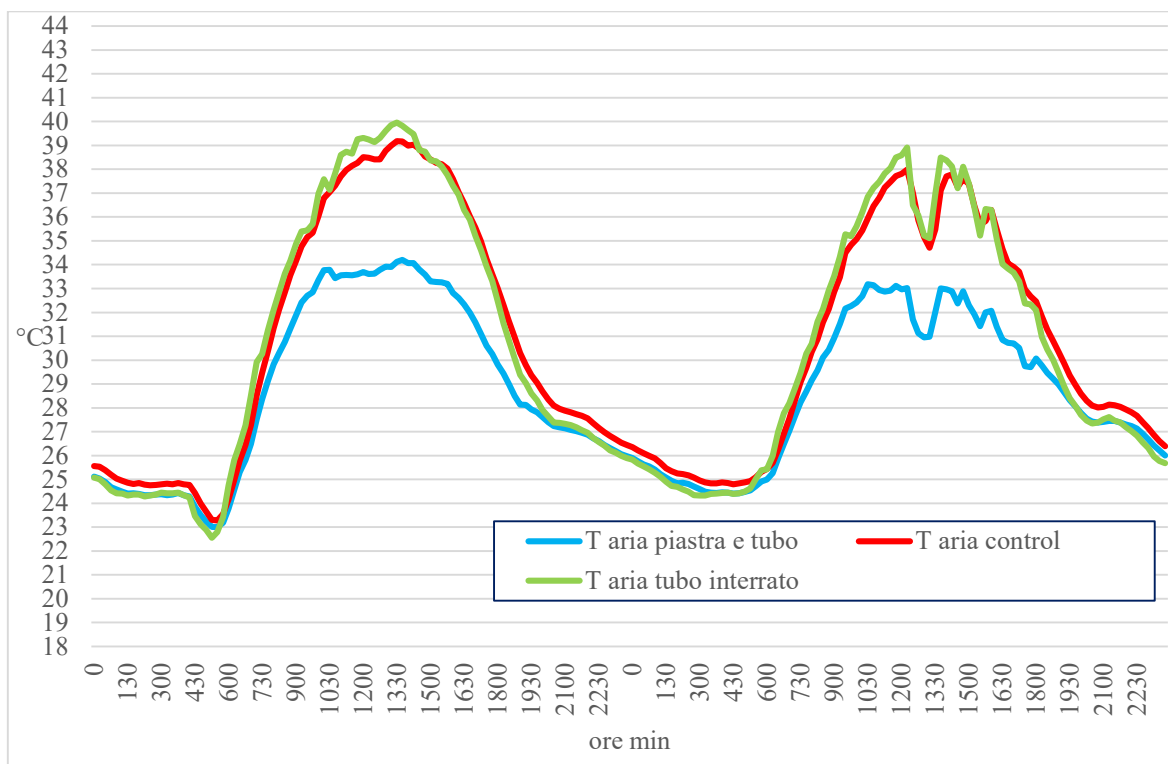


Figura 19. Temperatura dell'aria misurata nella zona di coltivazione in presenza di raffreddamento con piastra e tubo, con tubi interrati e in assenza di raffreddamento (control), 07-08/08/2019.

Le misure mostrano come sia sensibile l'effetto di raffreddamento dell'aria nella zona di coltivazione, realizzato dal sistema a piastra e tubo rispetto alla zona di controllo non raffreddata, ma anche rispetto alla zona raffreddata con i tubi interrati nel terreno (Figura 18 e Figura 19). Con il sistema a piastra e tubo si riesce ad ottenere una riduzione di temperatura prossima a 4 °C. L'effetto di raffreddamento dell'aria nella zona di coltivazione è ben inferiore con l'utilizzo dei tubi interrati, anche se esso è stato registrato dai dati medi (Figura 20). Infatti, i valori medi calcolati per due periodi, in luglio ed agosto, hanno evidenziato come il sistema a piastra e tubo sia risultato il più efficace nella riduzione della temperatura rispetto alla zona di controllo non raffreddata, ma hanno evidenziato un effetto di raffreddamento dell'aria anche nel caso dei tubi interrati (Figura 20).

In relazione alle temperature registrate nel substrato di coltivazione, i risultati migliori, per quanto concerne il raffreddamento, sono stati ottenuti con i tubi interrati. La Figura 21 e la Figura 22 mostrano la temperatura del terreno misurata in presenza di raffreddamento con piastra e tubo, con tubi interrati e in assenza di raffreddamento (controllo). Le misure sono relative ai giorni 24 e 25 luglio 2019 e ai giorni 7 ed 8 agosto 2019.

L'effetto di raffreddamento del suolo nel sistema con tubi interrati è evidente nell'andamento giornaliero, mentre è trascurabile nel caso del sistema a piastra e tubi (Figura 21 e Figura 22).

Le medie della temperatura del suolo, per i periodi 12-29 luglio 2019 e 1-18 agosto 2019, confermano l'efficacia del raffreddamento del suolo con il sistema a tubi interrati e l'assenza di raffreddamento del substrato di coltivazione ottenuto mediante il sistema con piastra e tubo (Figura 23).

Nell'estate 2019 è stata eseguita una prova agronomica al fine di comparare la crescita delle piante coltivate utilizzando due sistemi di distribuzione del freddo con la crescita di piante coltivate senza alcun raffrescamento localizzato (controllo). La prova è stata effettuata su una coltivazione di pomodori con tecnica fuori suolo. Piantine di pomodoro "Faino di Licata" sono state trapiantate nei vasi il 4 Luglio 2019 (Figura 24). Tutte le piante sono state coltivate con le stesse modalità agronomiche.

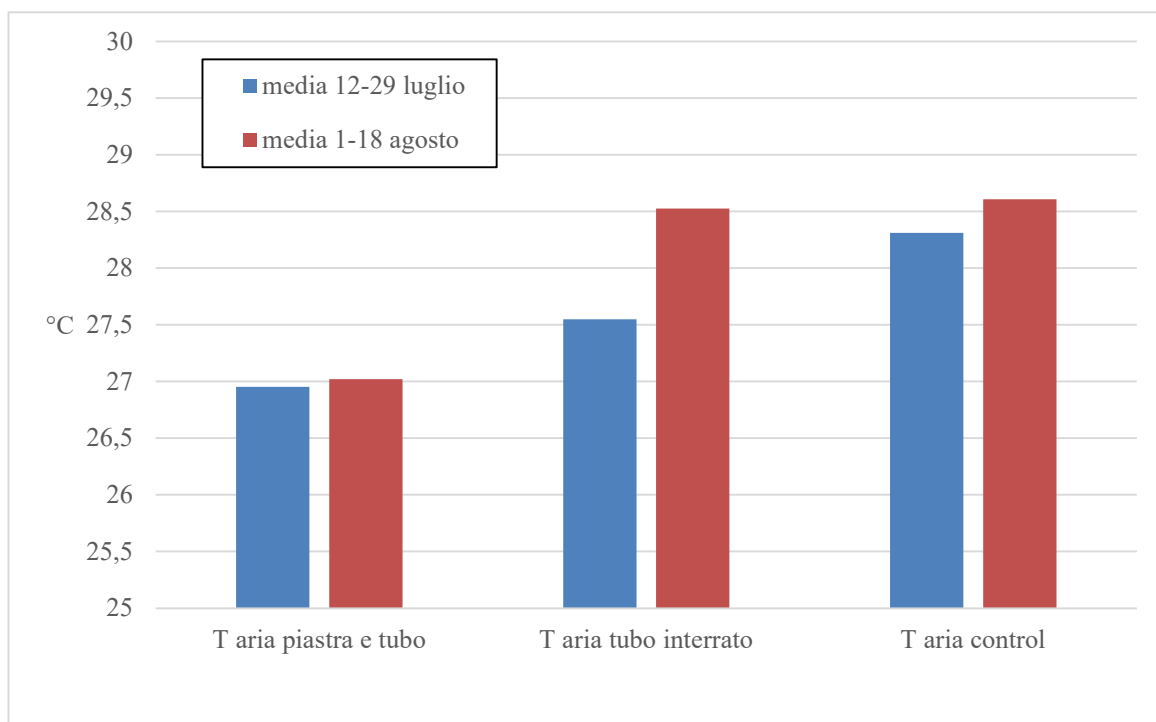


Figura 20. Media delle temperature dell'aria misurate nelle zone di coltivazione in presenza di raffreddamento con piastra e tubo, con tubi interrati e in assenza di raffreddamento (control); medie dei periodi 12-29/07/2019 e 1-18/08/2019.

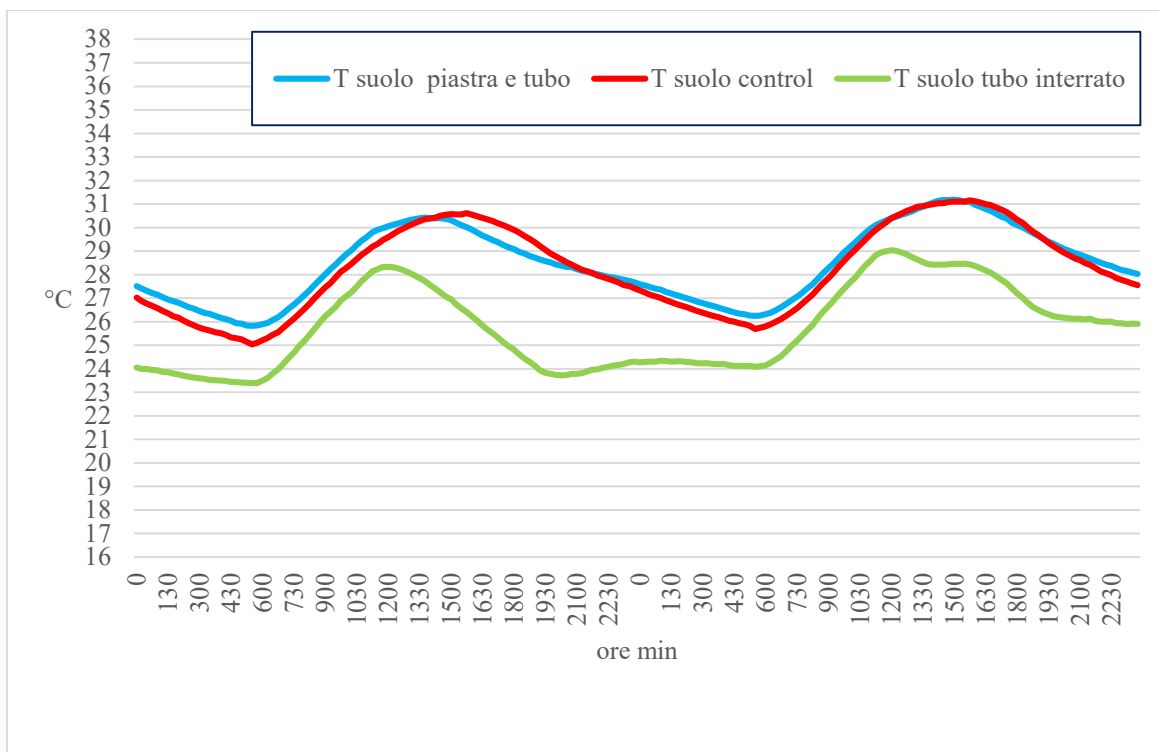


Figura 21. Temperatura del suolo di coltivazione misurata in presenza di raffreddamento con piastra e tubo, con tubi interrati e in assenza di raffreddamento (control), 24-25/07/2019.

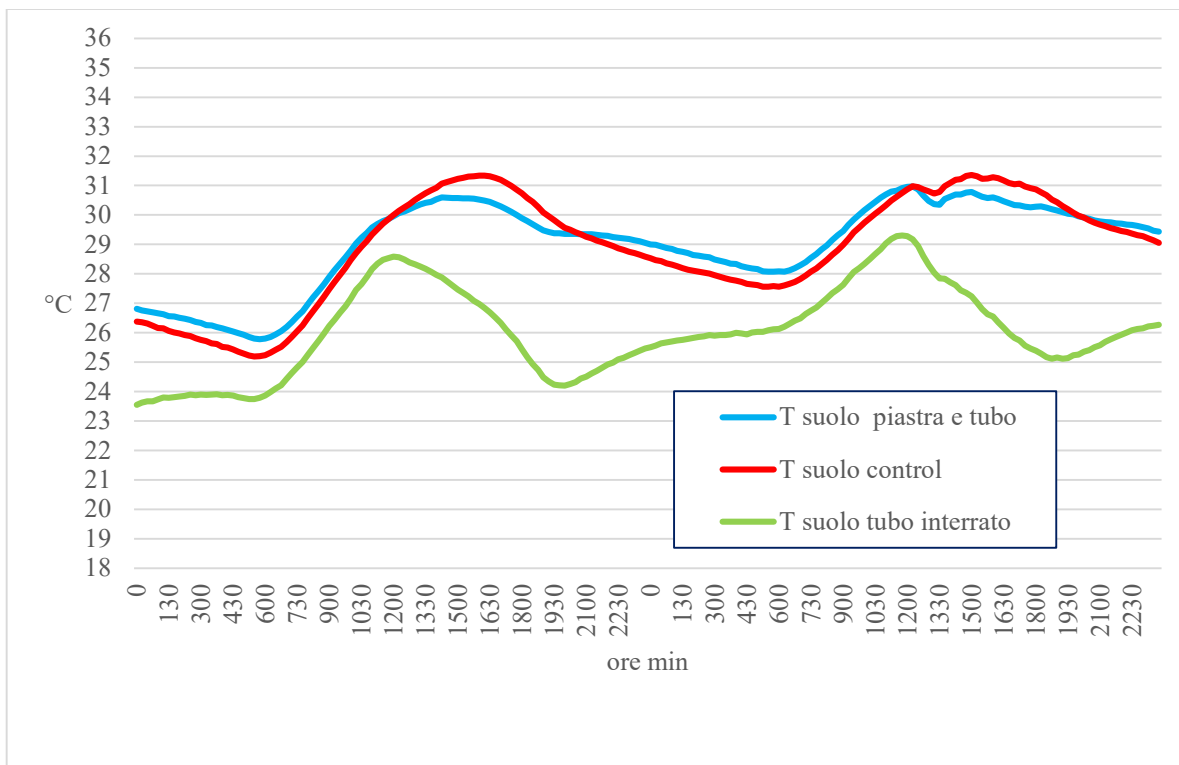


Figura 22. Temperatura del suolo di coltivazione misurata in presenza di raffreddamento con piastra e tubo, con tubi interrati e in assenza di raffreddamento (control), 07-08/08/2019.

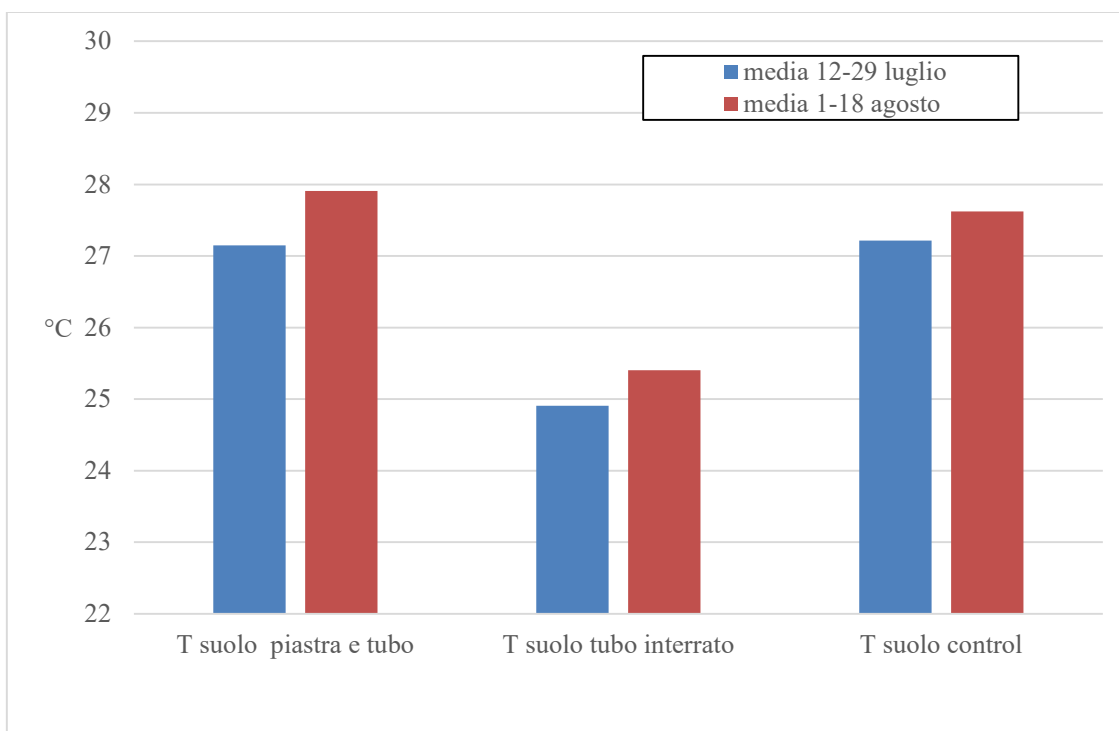


Figura 23. Media della temperatura del suolo misurata nelle zone di coltivazione in presenza di raffreddamento con piastra e tubo, con tubi interrati e in assenza di raffreddamento (control); medie dei periodi 12-29/07/2019 e 1-18/08/2019.

Le piante sono state monitorate nel corso della prova attraverso rilievi fotografici e rilievi agronomici (Tabella 3; Figura 24- Figura 32). La prova è durata 110 giorni ed è terminata il 22 ottobre 2019.

Nessuna pianta ha mostrato particolari segni di patologia, non è stato necessario effettuare alcun trattamento fitosanitario.

Tabella 3. Elenco dei rilievi effettuati sulle piante di pomodoro.

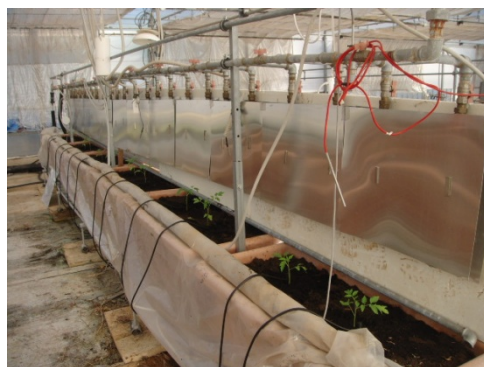
Data	Giorni dopo il trapianto	Rilievi
04/07/2019	0	I rilievo
11/07/2019	7	II rilievo
18/07/2019	14	III rilievo
25/07/2019	21	IV rilievo
02/08/2019	29	V rilievo
07/08/2019	34	VI rilievo
16/08/2019	43	VII rilievo
26/08/2019	53	VIII rilievo
05/09/2019	63	IX rilievo e I raccolto
12/09/2019	70	X rilievo e II raccolto
20/09/2019	78	XI rilievo e III raccolto
27/09/2019	85	XII rilievo e IV raccolto
09/10/2019	97	XIII rilievo e V raccolto
15/10/2019	103	XIV rilievo e VI raccolto
22/10/2019	110	XV rilievo e VII raccolto

Quando le piante hanno raggiunto un'altezza di circa 40 cm, è stato necessario inserire un tutore per pianta, cioè una bacchetta rigida di plastica cui legare le piante, con della rafia, per mantenerle erette durante il loro sviluppo (Figura 28 - Figura 32).

Le caratteristiche di crescita delle piante di pomodoro sono state misurate periodicamente durante lo svolgimento della prova. L'altezza delle piante e il numero di foglie per pianta sono stati monitorati settimanalmente, dal momento del trapianto fino all'inizio del raccolto.



(a)



(b)

Figura 24. Piante coltivate con due diversi sistemi di distribuzione del freddo: a) tubo interrato; b) piastra e tubo; giorno del trapianto nei vasi.



Figura 25. Piante coltivate con sistema di distribuzione del freddo a tubo interrato; 14 giorni dopo il trapianto.



Figura 26. Piante coltivate con sistema di distribuzione del freddo con piastra e tubo; 14 giorni dopo il trapianto.



Figura 27. Piante coltivate senza raffrescamento localizzato (controllo); 14 giorni dopo il trapianto.



Figura 28. Piante coltivate con sistema di distribuzione del freddo a tubo interrato; 21 giorni dopo il trapianto.



Figura 29. Piante coltivate con sistema di distribuzione del freddo con piastra e tubo; 21 giorni dopo il trapianto.



Figura 30. Piante coltivate con sistema di distribuzione del freddo a tubo interrato; 63 giorni dopo il trapianto.



Figura 31. Piante coltivate con sistema di distribuzione del freddo a piastra e tubo; 63 giorni dopo il trapianto.



Figura 32. Piante coltivate senza sistema di raffreddamento localizzato (controllo); 63 giorni dopo il trapianto.

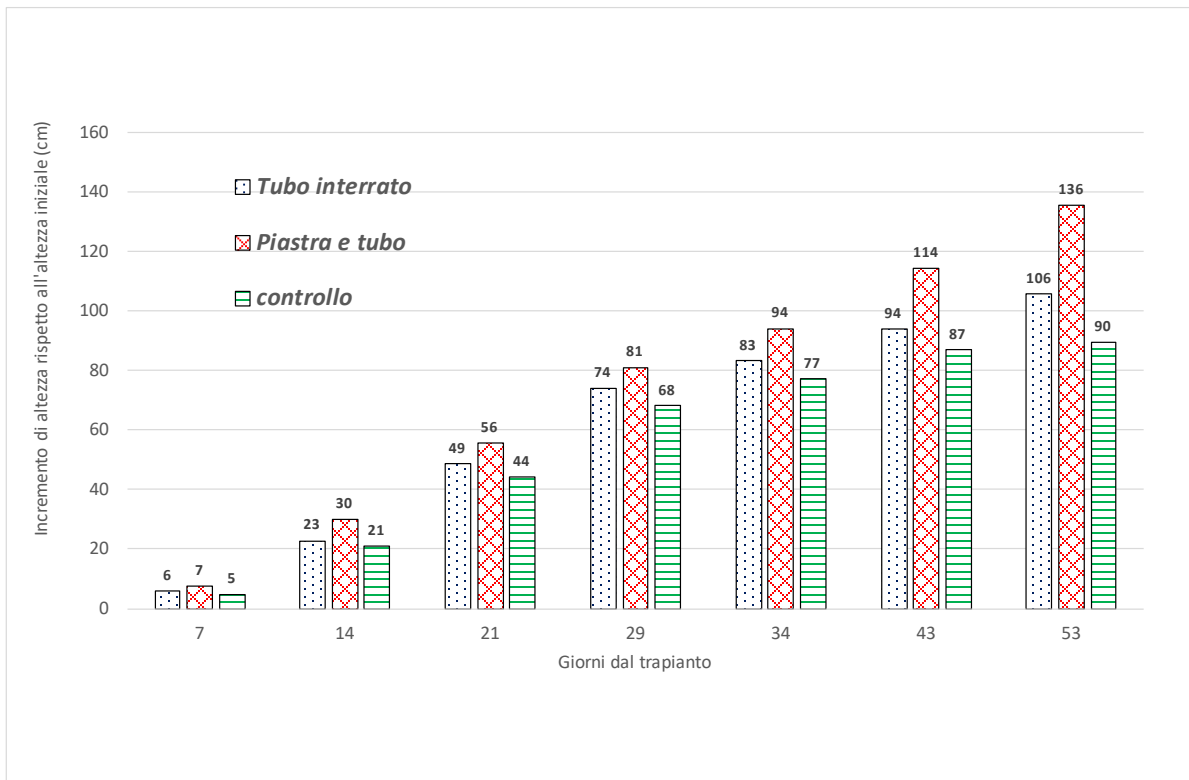


Figura 33. Incremento di altezza delle piante di pomodoro rispetto all'altezza iniziale.

La Figura 33 mostra l'incremento di altezza delle piante di pomodoro rispetto alla loro altezza iniziale. Si evince che le piante coltivate con il raffreddamento a piastra e tubo sono costantemente cresciute di più

rispetto alle altre piante. Le piante cresciute meno sono quelle del controllo, cioè le piante non raffrescate localmente in alcun modo. C'è stato un incremento di altezza rispetto all'altezza iniziale pari a 136 cm per le piante di pomodoro raffrescate con la piastra e tubo, pari a 106 cm per piante con sistema di distribuzione del freddo a tubo interrato e di soli 90 cm per le piante non raffrescate localmente in alcun modo. Dopo 53 giorni dal trapianto lo sviluppo vegetativo si è interrotto quasi completamente per la presenza dei pomodori sulla pianta.

La Tabella 4 riporta il numero medio di foglie per pianta. Nelle prime due settimane non c'è una differenza significativa tra il numero medio di foglie per pianta delle diverse piante, sia di quelle raffrescate localmente sia rispetto alle piante del controllo. Successivamente, le piante raffrescate localmente si differenziano da quelle del controllo. Il maggior numero medio di foglie per pianta pari a 34.25 si registra per le piante di pomodoro raffrescate con il sistema a piastra e tubo, mentre il minor numero medio di foglie per pianta pari a 19.96 si ha per le piante del controllo, cioè le piante non raffrescate localmente in alcun modo. Le piante più cresciute presentano il maggior numero di foglie.

Tabella 4. Numero medio di foglie per pianta.

	Giorni dal trapianto							
	0	7	14	21	29	34	43	53
Tubo interrato	3.75	6.50	10.81	13.81	16.44	19.44	20.44	25.19
Piastra e tubo	3.75	6.88	10.50	14.00	17.88	23.00	25.88	34.25
Controllo	3.88	6.33	10.15	12.96	15.33	16.88	17.58	19.96

La raccolta dei pomodori è iniziata 63 giorni dopo il trapianto ed è stata eseguita manualmente. La Figura 34 riporta il raccolto medio cumulato per pianta. Il raffrescamento localizzato, rispetto al controllo, ha indotto sui quantitativi di pomodori maturati, un comportamento diverso se si considera la prima settimana o le settimane successive.

Durante la prima settimana di raccolta, è stato ottenuto dalle piante del controllo, non raffrescate localmente in alcun modo, il 24% del raccolto totale; dalle piante con sistema di distribuzione del freddo a tubo interrato è stato ottenuto il 15 % del raccolto totale; dalle piante di pomodoro raffrescate con il sistema a piastra e tubo è stato ottenuto solo il 3.2 % del raccolto totale.

Successivamente alla prima settimana, le piante con raffrescamento localizzato hanno prodotto più pomodori rispetto alle piante del controllo. Al termine della prova, si è notato che le piante cresciute con il raffrescamento a piastra e tubo hanno prodotto molto di più rispetto alle altre piante. Le piante che hanno prodotto meno sono state quelle non raffrescate localmente in alcun modo, cioè le piante del controllo. Ogni singola pianta, mediamente, ha prodotto in totale 1.84 kg/pianta di pomodori, nel caso delle piante di pomodoro raffrescate con il sistema a piastra e tubo; 1.19 kg/pianta, nel caso delle piante con sistema di distribuzione del freddo a tubo interrato; 0.83 kg/pianta, nel caso delle piante non raffrescate localmente in alcun modo.

Il peso medio per pomodoro è riportato in Figura 35. Dopo la prima settimana, le piante con raffrescamento localizzato a tubo interrato hanno generalmente presentato un peso medio per bacca maggiore rispetto alle altre piante. Il numero medio di pomodori per pianta è riportato in Figura 34.

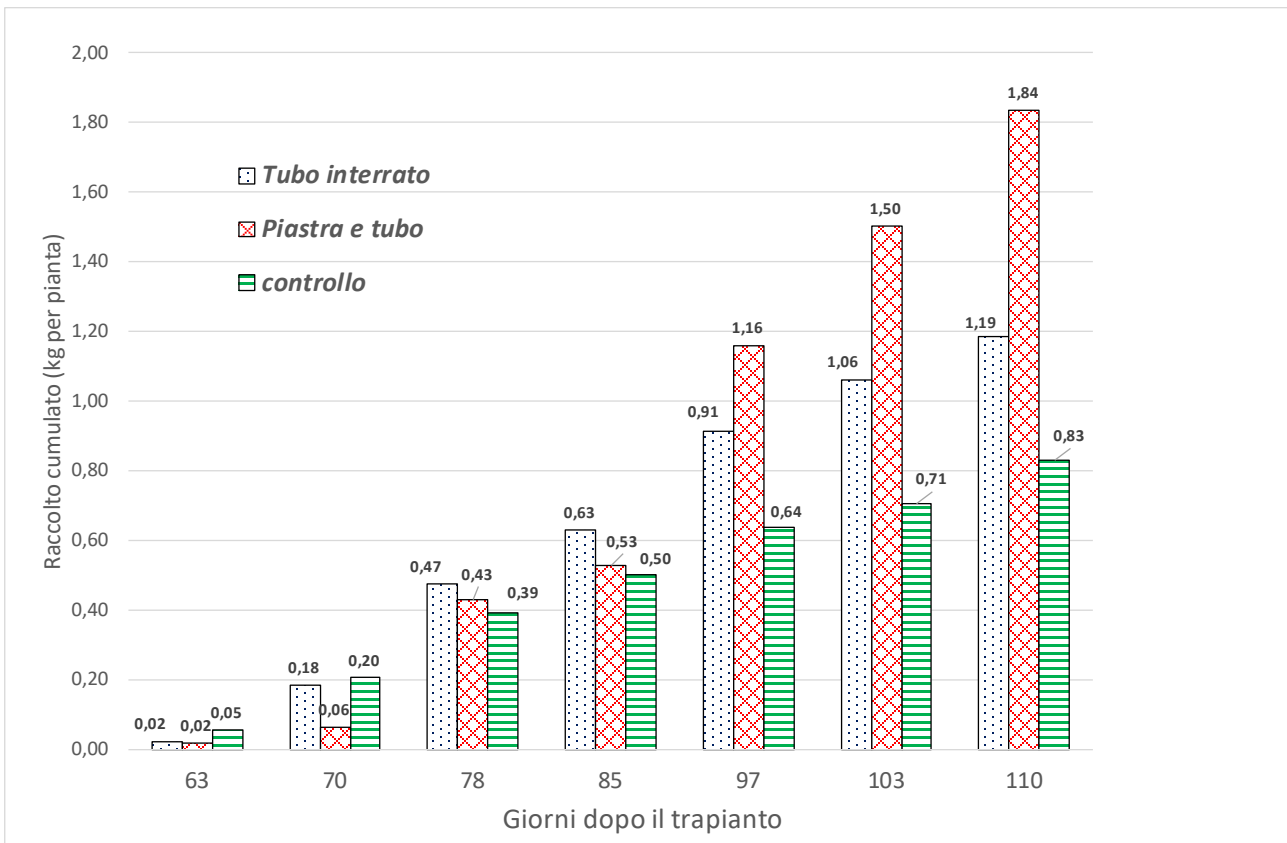


Figura 34. Raccolto cumulo per pianta.

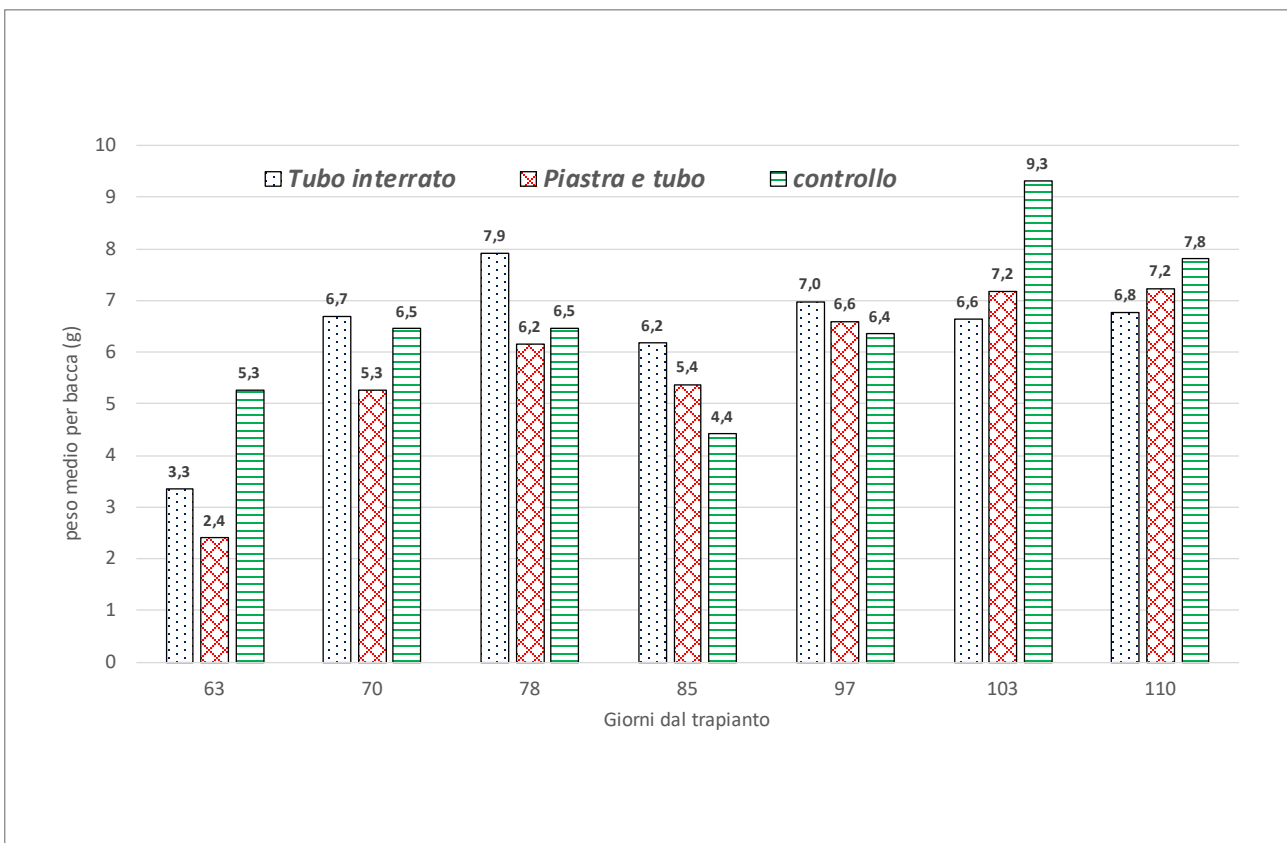


Figura 35. Peso medio per bacca.

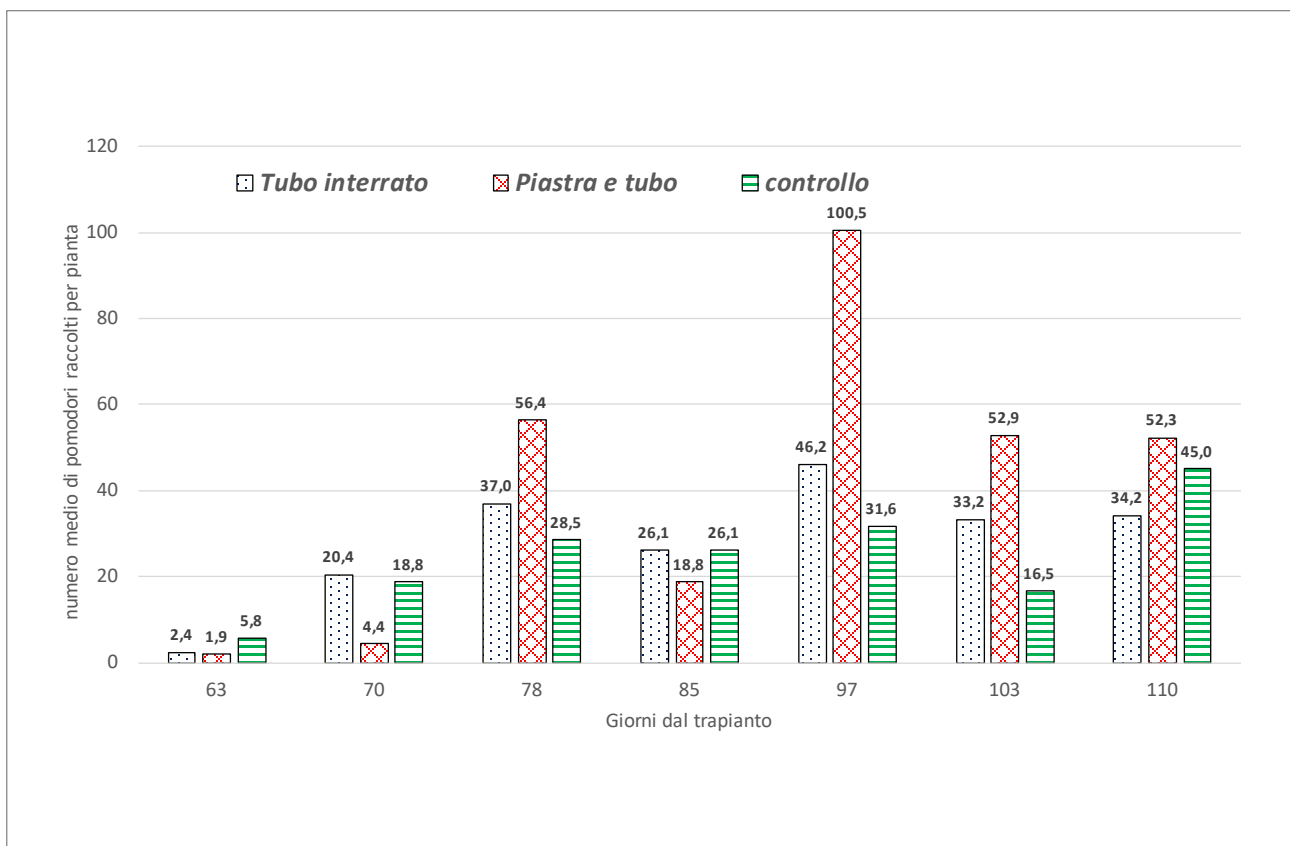


Figura 36. Numero medio di pomodori raccolti per pianta.

2.2 Definizione dello stato dell'arte dei sistemi di riscaldamento in serra

Le serre vengono impiegate per controllare i numerosi fattori ambientali che influenzano la crescita e la produttività delle piante. In generale, i più importanti fattori climatici che condizionano la qualità del microclima interno sono: la quantità e qualità della radiazione solare e la temperatura dell'aria. La temperatura dell'aria è il fattore climatico più critico per la funzionalità della serra [13]. Le produzioni orticole e floricole realizzate in ambiente protetto fuori stagione nei periodi freddi necessitano di sistemi capaci di garantire opportune condizioni microclimatiche. Sono quindi richiesti sistemi attivi di riscaldamento quali i generatori di aria calda, gli aerotermi, i sistemi a termosifone.

Il riscaldamento deve garantire una temperatura minima in serra superiore ai valori critici richiesti dalle piante per le loro esigenze fisiologiche e produttive. Gli impianti di riscaldamento a volte sono utilizzati anche per la deumidificazione dell'aria, dato che, oltre ad aumentare la temperatura dell'aria interna, provocano una riduzione dell'umidità relativa dell'aria interna.

I sistemi di riscaldamento sono utilizzati per: assicurare le migliori condizioni microclimatiche per le piante coltivate; impiegare la serra durante tutto l'anno attraverso successioni colturali che comprendono l'intera annata permettendo di ottenere un'offerta commerciale diversificata nel tempo e nei prodotti, una riduzione dei costi di produzione e degli ammortamenti del capitale.

Requisito importante di un impianto di riscaldamento per serre è la capacità di conseguire ridotti gradienti termici nell'ambiente interno al fine di uniformare le condizioni termoigrometriche di coltivazione. Infatti, in funzione della diversa densità tra aria calda e fredda si possono creare gradienti termici in senso verticale, e in funzione del tipo di impianto si possono creare gradienti termici orizzontali.

Un impianto di riscaldamento per serre deve possedere:

- scarsa inerzia termica, per poter seguire i rapidi cambiamenti indotti dalla variabilità climatica esterna, che influenzano velocemente il microclima interno delle serre per via del trascurabile calore specifico dell'aria;
- bassa velocità dell'aria a livello delle piante per non ostacolarne la crescita; l'impianto di riscaldamento non dovrebbe provocare un eccessivo movimento delle masse di aria all'interno della serra che incrementerebbe le perdite di calore e quindi si avrebbero produzioni non omogenee;
- ingombro ridotto per non ostacolare le operazioni colturali in serra e per un ridotto ombreggiamento sulle coltivazioni;
- bassi costi sia di impianto sia di esercizio;
- facilità di manutenzione;
- facilità nel reperimento e rifornimento del combustibile;
- basso impatto ambientale;
- ridotto pericolo di incendio.

Gli impianti di riscaldamento dovranno, poi, essere quanto più basati sullo sfruttamento di fonti energetiche rinnovabili, al fine di poter intervenire positivamente su costi e sostenibilità ambientale delle produzioni [14].

In considerazione della molteplicità di soluzioni [15]–[16], una prima classificazione degli impianti di riscaldamento impiegati in serra prevede la distinzione tra sistemi statici e sistemi dinamici. I sistemi statici operano una trasmissione del calore all'ambiente per mezzo di superfici riscaldate. I sistemi dinamici trasmettono il calore tramite la diffusione di aria calda per ventilazione.

I sistemi statici sono:

- impianti a termosifone;
- impianti a pannelli radianti a gas;
- lampade ad infrarossi.

I sistemi dinamici sono:

- arotermi;
- generatori di aria calda.

I sistemi più diffusi per il riscaldamento delle serre in ambito commerciale sono l'impianto a termosifone e l'impianto a generatori di aria calda con eventuale distribuzione per mezzo di manicotti forati in PE.

Gli elementi principali di un impianto a termosifone ad acqua calda sono: la centrale termica in cui è presente la caldaia (Figura 37) per la produzione di acqua calda o vapore, le pompe di circolazione per la mandata dell'acqua (nel caso di circolazione forzata), le tubazioni di mandata e di ritorno per la circolazione dell'acqua (Figura 38); vaso di espansione; termostati, manometri, valvole di miscelazione, un sistema di controllo e sonde di temperatura. Nel caso di circolazione forzata le tubazioni di distribuzione all'interno della serra possono essere disposte su uno stesso piano, a differenza del caso a circolazione naturale. Per questioni legate alla sicurezza la centrale termica è ubicata, in genere, in un ambiente separato dalle serre ma adiacente alle stesse per minimizzare i consumi energetici e di impianto del sistema quali tubazioni e relative coibentazioni, potenza delle pompe di circolazione.

In prossimità della centrale termica viene poi posizionato il serbatoio di combustibile che può essere di origine fossile (metano, GPL, gasolio, olio combustibile), oppure una risorsa di tipo rinnovabile quali biomasse legnose e residui vegetali (ad esempio il nocciolino da sanse di oleifici).



Figura 37. Caldaia in centrale termica a servizio di una serra.

Il fluido termovettore può essere l'acqua calda (con temperatura di 60 - 80 °C), acqua surriscaldata (con temperatura di 120 - 140 °C) o il vapore ad alta (> 3 atm), media (3 atm) o bassa pressione (0.5 atm). La soluzione più comune è costituita da sistemi a circolazione forzata di acqua calda. Invece i sistemi a termosifone con vapore sono meno utilizzati perché più costosi, caratterizzati da un controllo automatico della temperatura più difficile, perché creano maggiori gradienti di temperatura in serra. I termosifoni con vapore consentono di riscaldare serre di notevoli dimensioni in poco tempo tramite un minor numero di tubazioni. Inoltre, il vapore può essere utilizzato anche per operazioni di sterilizzazione del terreno [15].



Figura 38. Collettori e diramazioni di mandata e di ritorno del fluido termovettore per un sistema di riscaldamento.

Negli impianti a termosifone a circolazione naturale del fluido termovettore, questo si muove per effetto della differenza di temperatura ossia dei gradienti termici. Questi impianti presentano una grande semplicità costruttiva e di funzionamento e quindi bassi costi. Vengono utilizzati tubi metallici di mandata disposti in alto, tubi di ritorno in basso e una caldaia interrata rispetto al piano del terreno. Per facilitare la circolazione dell'acqua sono impiegati tubi di diametro maggiore (50 - 80 mm) rispetto a quelli impiegati nel caso di circolazione forzata (18 - 28 mm). Tuttavia, sono caratterizzati da un rendimento termico basso e da una difficile regolazione. Inoltre, presentano una fitta rete di tubazioni ingombranti.

Essendo sistemi di riscaldamento di tipo statico, la diffusione del calore dipende dalla disposizione dei tubi radianti, dal materiale dei tubi, dal loro numero e dal loro diametro. I tubi possono essere posizionati a livello del terreno, sotto i bancali o interrati [17].

Gli impianti a termosifone a circolazione forzata sono affidabili, non generano un ombreggiamento eccessivo sulla coltivazione ma presentano un alto costo di investimento. Le tubazioni sono lineari e percorrono la serra in senso longitudinale e possono essere realizzate in diversi materiali quali ad esempio ferro, alluminio, acciaio o polietilene (Figura 39 e Figura 40); possono essere del tipo liscio o più raramente alettate per aumentare la superficie di scambio termico.

Lo scambio di calore avviene sia per convezione con l'aria sia per irraggiamento verso le piante e il suolo, in prossimità delle tubazioni. Con il riscaldamento a termosifone, rispetto a sistemi di riscaldamento ad aria, le piante risultano generalmente più calde dell'aria circostante poiché i tubi di riscaldamento vengono spesso collocati a livello delle colture (Figura 41); pertanto riscaldano le colture sia riscaldando l'aria per convezione sia direttamente per irraggiamento [18]–[19].

Il problema dei gradienti verticali di temperatura, che generano una stratificazione dell'aria calda nella parte superiore della serra, può essere attenuato mediante l'impiego di miscelatori dell'aria o destratificatori installati all'altezza della linea di gronda (Figura 42). Il loro utilizzo permette l'ottenimento di una adeguata distribuzione del calore per un omogeneo e costante sviluppo delle piante. Inoltre, non comporta alti consumi energetici essendo i miscelatori dotati di motori elettrici a basso consumo; piuttosto, ottimizzando il funzionamento dell'impianto di riscaldamento, permettono di ridurre i consumi.



Figura 39. Sistema di riscaldamento a termosifone ad acqua calda a circolazione forzata ottenuto mediante la collocazione in serra di tubazioni in metallo di mandata e di ritorno complanari.



Figura 40. Sistema di riscaldamento a termosifone ad acqua calda con collocazione di tubazioni in acciaio a livello della base dei contenitori.



Figura 41. Sistema di riscaldamento a termosifone ad acqua calda con tubazioni in polietilene posizionate sul substrato di coltivazione.

Caratteristiche interessanti degli impianti a termosifone sono l'intrinseca inerzia termica, che risulta utile in caso di guasto dell'impianto, e la generazione di trascurabili movimenti d'aria all'interno della serra.

I sistemi di riscaldamento radianti non hanno avuto larga diffusione nel settore serricolo [20]. Il riscaldamento ad infrarossi presenta il vantaggio di trasferire prevalentemente per irraggiamento l'energia

termica direttamente alla coltivazione ed al substrato, eliminando perdite di calore per convezione e per imperfetta tenuta. Tale sistema permette di evitare di riscaldare tutta l'aria interna alla serra. I moderni sistemi di riscaldamento a infrarossi si basano sull'impiego di radiatori a gas o lampade elettriche ad infrarossi dotati di riflettori per il controllo della direzione della diffusione del flusso di calore; sono caratterizzati da alte efficienze di conversione dell'energia termica in radiazioni infrarosse, ciò implica una emissione di radiazioni fortemente concentrata e temperature esterne delle sorgenti a livelli moderati. I sistemi radianti a gas si basano sul principio dello scambio di calore per irraggiamento mediante riscaldamento di tubi scambiatori. Un sistema radiante a gas è principalmente costituito da un bruciatore, da tubi scambiatori di calore che raggiungono elevate temperature, e da una parabola riflettente posta superiormente ai tubi. La funzione della parabola riflettente è di concentrare il flusso termico verso la coltivazione. Le piastre vengono sospese alla struttura della serra, al di sopra delle colture in corrispondenza della linea di colmo della serra. Nel caso di sistemi a bassa temperatura (circa 200-300 °C) si hanno grandi superfici di scambio termico e circa il 50 % dell'energia termica totale è scambiata per irraggiamento. Nei sistemi ad alta temperatura (circa 500 °C) si adottano superfici di scambio termico inferiori e circa l'80 % dell'energia termica totale è scambiata per irraggiamento. Questi sistemi consentono di ottenere bassi gradienti termici e un riscaldamento localizzato sia del suolo che delle piante per irraggiamento, con basse perdite di calore per convezione e per imperfetta tenuta, e facilità e rapidità di installazione. Tuttavia, provocano un elevato ombreggiamento e un riscaldamento non omogeneo attraverso gli strati di vegetazione. Sono sistemi caratterizzati da alti costi di investimento e con una regolazione difficoltosa se applicata alla coltivazione delle piante in quanto il controllo si basa sulla temperatura fogliare.



Figura 42. Miscelatore d'aria installato all'altezza della linea di gronda in una serra floricola.

Un altro metodo di riscaldamento statico alternativo e poco diffuso è basato sull'impiego di lampade elettriche emettenti radiazione infrarossa a bassa intensità [21]. Il loro impiego comporta vantaggi quali bassa inerzia termica e capacità di reagire velocemente alle variazioni di temperatura esterna, facilità di implementazione nell'ambito di sistemi di controllo automatico del microclima interno, miglioramento della qualità dei prodotti ottenuta grazie ad una ridotta formazione di condensa sulla loro superficie, risparmio energetico fino al 40 – 50 % rispetto ai sistemi di riscaldamento convenzionali quali a termosifoni e ad aria calda. Comune ad altri sistemi di riscaldamento radianti è la non uniforme distribuzione della

radiazione sulla coltivazione e quindi un conseguente sviluppo disomogeneo nel caso di una non adeguata progettazione dei sistemi [16], [22]–[24].

Gli aerotermi sono corpi scaldanti costituiti essenzialmente da uno scambiatore di calore a serpentina percorso da acqua calda o vapore, un ventilatore elicoidale per la distribuzione dell'aria calda, un diffusore per la regolazione del flusso d'aria, un involucro esterno di contenimento. Essi cedono quindi calore per convezione forzata. Il fluido termovettore viene fornito dalla centrale termica alla batteria di scambio. Sono quindi apparecchiature caratterizzate da semplicità costruttiva, potenze limitate a 30 - 70 kW ciascuno, e sono idonee per riscaldare serre di ridotte dimensioni (lunghezza inferiore a 30 - 40 m). Un apparecchio è in grado di riscaldare circa 120 m². Gli aerotermi si classificano in apparecchi a proiezione orizzontale, anche detti a parete, e a proiezione verticale, detti aerotermi pensili. Gli apparecchi vanno sospesi alla struttura ad un'altezza pari a quella di gronda (Figura 43). Il posizionamento a tale altezza e non ad altezze superiori attenua la stratificazione di aria calda in sommità alla serra. Per serre caratterizzate da dimensioni e lunghezze maggiori occorre prevedere la disposizione di più apparecchi: non solo in corrispondenza delle testate ma anche al centro della serra. Gli impianti ad aerotermi consentono, se opportunamente progettati, di ottenere un'uniforme distribuzione del calore con un costo ridotto dell'impianto rispetto ad uno a termosifone, anche se il terreno risulta ricevere poco calore. Sono consentite buone possibilità di regolazione, una superficie completamente libera per la coltivazione, la riduzione della percentuale di umidità relativa interna e dei fenomeni di condensa. La presenza di apparecchiature ingombranti sospese alla struttura serricola può tuttavia provocare ombreggiamenti sulla zona di coltivazione. Inoltre, questo tipo di impianti è caratterizzato da elevate dispersioni per convezione e dalla necessità di provvedere ad una periodica manutenzione.



Figura 43. Aerotermi pensili installati all'altezza della linea di gronda, in corrispondenza di una testata di una serra per coltivazione floricola.

Un generatore di aria calda è costituito principalmente da un bruciatore, una camera di combustione, uno scambiatore di calore tra aria e fumi di combustione, un ventilatore per il passaggio dell'aria in ingresso attraverso lo scambiatore di calore, un camino per il convogliamento all'esterno dei fumi di combustione, e termostati di controllo. Il generatore può essere disposto all'interno o all'esterno della serra. Quando

esterno, il generatore sarà collocato in una posizione baricentrica. Potrebbe essere previsto un unico generatore a servizio di più serre ed essere collocato in un'apposita centrale termica.

Il generatore può essere del tipo fisso o mobile (Figura 44- Figura 45). Può quindi essere posizionato in modo fisso all'interno, in testata e all'altezza di gronda, o all'esterno dell'impianto serricolo. I generatori di tipo mobile sono carrellati ed impiegati spesso come impianti di soccorso; bisogna prevedere il posizionamento a terra baricentrico rispetto alla superficie della serra. I combustibili utilizzati di origine fossile sono il gasolio, il metano o il GPL. I generatori mobili sono dotati di serbatoio di combustibile a bordo, mentre i generatori fissi prevedono il posizionamento a distanza del serbatoio di combustibile che può essere a servizio di diversi generatori collocati in ciascuna campata.



Figura 44. Generatori di aria calda di tipo fisso.

L'aria calda prodotta presenta generalmente temperature di 35 - 45 °C e velocità di immissione nell'ambiente pari a circa 3-5 m/s. Pertanto, i moderni generatori sono perfezionati in modo da produrre grandi portate d'aria a media temperatura in grado di non investire in modo negativo le piante e di non abbassare drasticamente l'umidità relativa dell'aria. Si rendono possibili quindi una limitata stratificazione dell'aria, una rapidità nel riscaldamento dell'ambiente, alto rendimento e semplicità di installazione [15]. I generatori di calore sono caratterizzati da: costo ridotto; un ingombro globale ridotto; flessibilità nel posizionamento dell'impianto se mobile; superficie di coltivazione libera da ingombri; riduzione dell'umidità relativa dell'aria interna; bassa inerzia termica; possibilità di recupero di anidride carbonica da reimmettere nell'atmosfera della serra per lo sviluppo delle piante. Presentano tuttavia svantaggi analoghi agli aerotermini. Peraltro, se di tipo interno, comportano il rischio di produzione di gas in serra con prodotti fitotossici, di CO₂ di notte e di vapore.

Sia gli aerotermini che i generatori di aria calda possono essere equipaggiati con canali forati e microforati per la diffusione più uniforme dell'aria in tutto l'ambiente e per ridurre i gradienti termici. I canali presentano una vasta gamma di diametri, possono avere fori in numero e diametro dipendenti dalla velocità e dalla portata dell'aria e possono essere realizzati in diversi materiali quali tessuto di poliestere, acciaio, alluminio. In serra sono particolarmente idonei canali in polietilene trasparente (Figura 46) da collocare longitudinalmente al centro di ciascuna campata della serra in modo alternato tra campate adiacenti e all'altezza della linea di gronda.

Le piante sono più sensibili alle basse temperature dell'aria piuttosto che a quelle nel substrato. Il terreno, grazie alla sua inerzia termica, è in grado, a differenza dell'aria, di immagazzinare il calore assorbito dall'irraggiamento solare diurno, per cui è meno soggetto a forti variazioni di temperatura. Tuttavia, garantire temperature adeguate del suolo è utile per limitare le differenze di temperatura tra aria e terreno e quindi evitare problemi fisiologici alle piante. Il riscaldamento del suolo serve anche per massimizzare la produttività della pianta che in relazione al substrato di coltivazione necessita di temperature ottimali pari a circa 20 °C.

Pertanto, gli impianti di riscaldamento possono anche essere impiegati per il riscaldamento del suolo della serra o del substrato di coltivazione per tecniche quali l'allevamento in vaso a terra o su bancali. Il riscaldamento del substrato di coltivazione permette di coltivare con temperature dell'aria inferiori a quelle ottimali. Possono essere adottati il sistema a termosifone con tubazioni percorse da acqua calda o vapore o a resistenze elettriche. Le resistenze elettriche o le tubazioni possono essere disposte nei bancali, oppure esternamente al di sotto di essi. Un sistema alternativo è costituito dal riscaldamento del tipo a pavimento ottenuto in serre pavimentate annegando nella pavimentazione tubazioni a serpentina idonee per il passaggio di acqua calda. Per evitare danni alle radici delle piante le temperature dell'acqua nelle tubazioni a contatto con il substrato non devono essere molto elevate ovvero devono essere inferiori a 40 °C.

In generale, il sistema di riscaldamento a termosifone è una pratica molto comune per le grandi serre commerciali, mentre i sistemi di riscaldamento ad aria calda e a radiazione infrarossa sono principalmente utilizzati per piccole serre o dove il fabbisogno di riscaldamento è relativamente basso come nelle serre del Mediterraneo [18].



Figura 45. Generatore di aria calda mobile, impiegato come sistema di riscaldamento di soccorso in una serra floricola.



Figura 46. Canali in PE trasparente impiegati per una migliore diffusione di aria calda all'interno di una serra dedicata alla produzione floricola.

Le varie tipologie di riscaldamento elettrico, come anche termoconvettori e ventilconvettori elettrici, non si sono diffuse nel comparto serricolo per l'elevato costo dell'elettricità. Tuttavia, la crescente produzione e lo sfruttamento di energie rinnovabili quali quella solare, eolica e geotermica in agricoltura può consentire un impiego più diffuso di sistemi di riscaldamento alimentati da sistemi fotovoltaici quali le pompe di calore elettriche anche operanti in sinergia con sistemi solari termici (Figura 47).

Le pompe di calore abbinata a fonti geotermiche a bassa temperatura (Figura 48) si rivelano particolarmente adatte in ambito serricolo in quanto in grado di produrre acqua a temperature non troppo elevate ideali per essere sfruttate in impianti a termosifone, consentendo di raggiungere idonee condizioni climatiche all'interno delle serre con valori di C.O.P. compresi tra 3 e 4 [4], [25]-[26].



Figura 47. Collettori solari termici a servizio di una serra sperimentale collocati sulla testata a Sud.

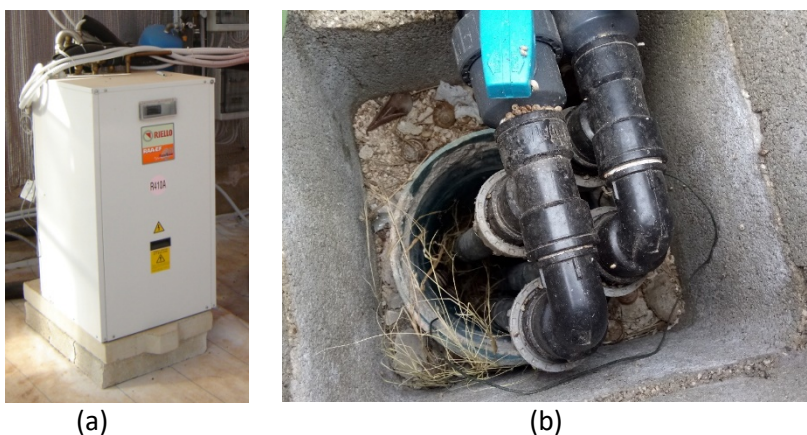


Figura 48. a) Pompa di calore elettrica geotermica installata all'interno di una serra; b) sistema di scambio termico di una pompa di calore geotermica costituito da sonde verticali a circuito chiuso inserite nel terreno.

2.3 Definizione dei requisiti microclimatici invernali della serra sperimentale

La serra è funzionale alla realizzazione di un ambiente confinato caratterizzato da condizioni ambientali che favoriscano la crescita, lo sviluppo e la massima produttività di piante coltivate in anticipo e/o in ritardo rispetto al periodo della coltivazione in pieno campo, ma anche di specie non autoctone e tipiche di contesti climatici molto differenti da quello considerato.

Per garantire il pieno svolgimento delle funzioni di una serra, occorre intervenire su quei parametri che determinano le condizioni microclimatiche adeguate alle specifiche colture. L'analisi delle esigenze delle piante, infatti, consente di soddisfare le relative necessità e di conciliare le condizioni climatiche naturali con gli impianti di climatizzazione. Temperatura e umidità relativa dell'aria, quantità e distribuzione spettrale della radiazione solare e concentrazione di CO₂ sono i parametri fondamentali da considerare e su cui intervenire.

Un'attenta progettazione della serra e degli impianti a servizio della stessa risulta, pertanto, imprescindibile, anche alla luce dei costi energetici, affatto trascurabili, per la produzione di colture in serra. La temperatura dell'aria interna è particolarmente rilevante. Essa è, contemporaneamente, un parametro da prevedere in funzione delle condizioni climatiche al contorno e un parametro da garantire mediante la necessaria fornitura di energia.

L'attività svolta finora dall'Università di Bari ha permesso di acquisire i dati climatici del sito nonché i parametri ambientali all'interno della serra sperimentale, che è una serra fredda, cioè priva di impianti di riscaldamento. Si è focalizzata l'attenzione specialmente sulle esigenze microclimatiche invernali delle colture in serra. Radiazione solare disponibile e temperatura dell'aria sono, come detto, parametri climatici particolarmente rilevanti.

A tal proposito, la Figura 49 mostra la radiazione solare disponibile presso il sito sperimentale nel corso di un intero anno. Dai dati sperimentali risulta che, durante la stagione invernale, vi è stata una disponibilità di radiazione solare complessiva pari a 750.8 MJm⁻², equivalente solo al 13.45 % dell'energia radiativa solare disponibile nell'intero anno (5584.2 MJm⁻²).

Per quanto riguarda i valori di temperatura dell'aria, sono stati considerati quelli registrati all'esterno e all'interno della serra nel corso degli ultimi tre anni: 2017 (Figura 50), 2018 (Figura 51) e 2019 (Figura 52).

Dai grafici relativi alle temperature dell'aria esterna ed in serra (Figura 50 - Figura 52) scaturiscono alcune considerazioni sull'andamento di tali parametri nel corso di un intero anno e nella stagione invernale (22 dicembre–20 marzo).

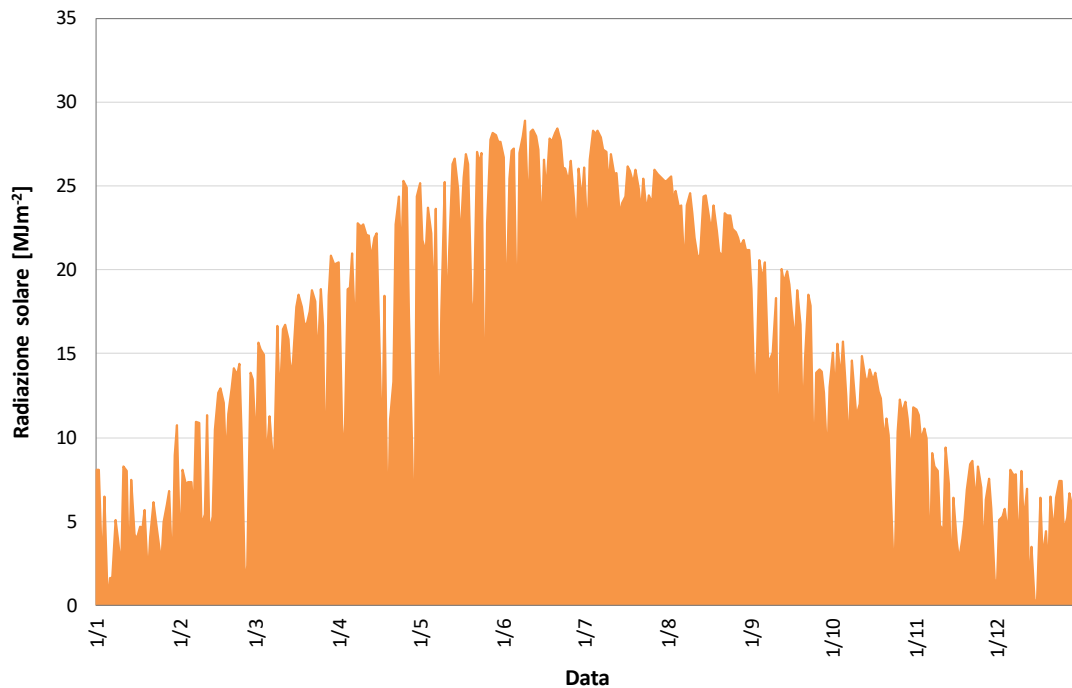


Figura 49. Valori cumulativi giornalieri di radiazione solare presso il campo sperimentale dell'Università di Bari; anno 2017.

Con riferimento all'anno 2017 (Figura 50), il valore medio registrato della temperatura dell'aria esterna è stato pari a 17.2 °C, mentre la media rilevata durante la stagione invernale è stata pari a 9.3 °C (con una minima giornaliera di -1.1 °C ed una massima di 16.0 °C). La temperatura media annua registrata in serra è stata, invece, pari a 20.3 °C e la media invernale pari a 12.3 °C (con un valore minimo giornaliero di 1 °C ed uno massimo di 20.2 °C).

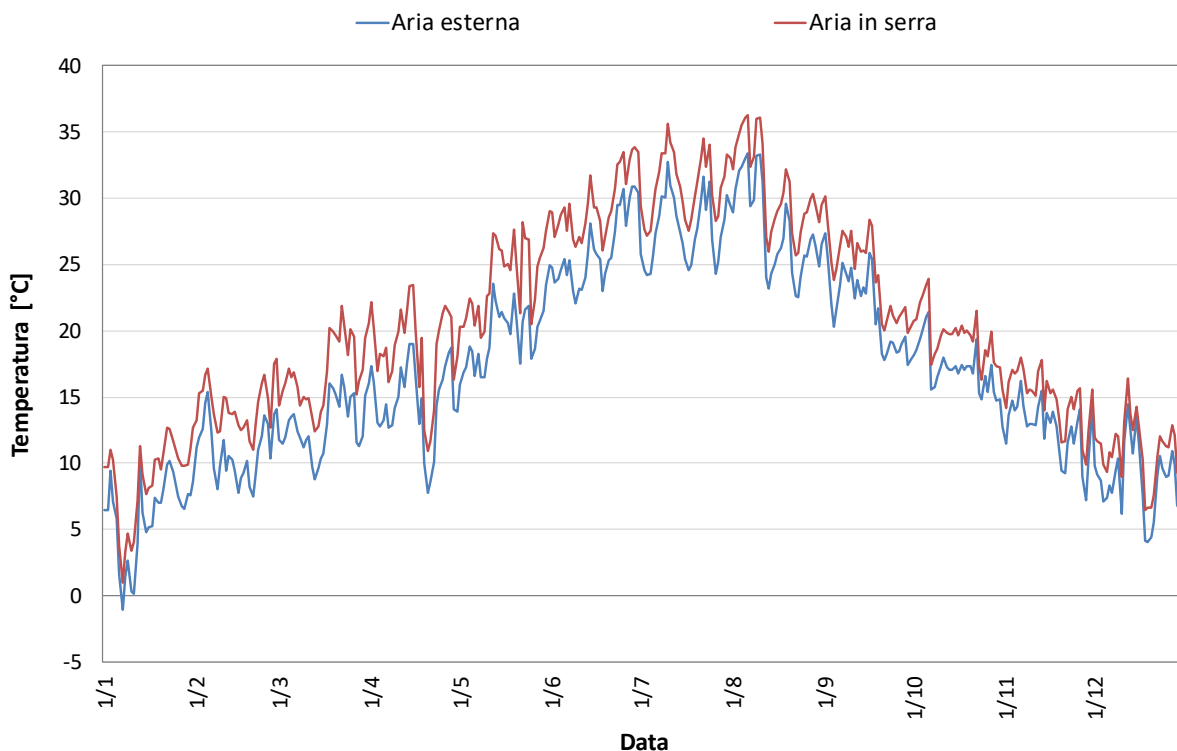


Figura 50. Temperatura dell'aria misurata all'esterno e all'interno della serra; anno 2017.

Durante l'inverno dell'anno 2018 (Figura 51), la temperatura media registrata dell'aria esterna è stata pari a 10.2 °C (con una temperatura minima giornaliera di -0.4 °C ed una massima di 16.7 °C), 7.5 °C inferiore alla media annua. All'interno della serra, invece, la temperatura media invernale è stata di 12.7 °C (con una minima di 2.4 °C ed una massima di 19.7 °C), 7.7 °C inferiore alla media annua.

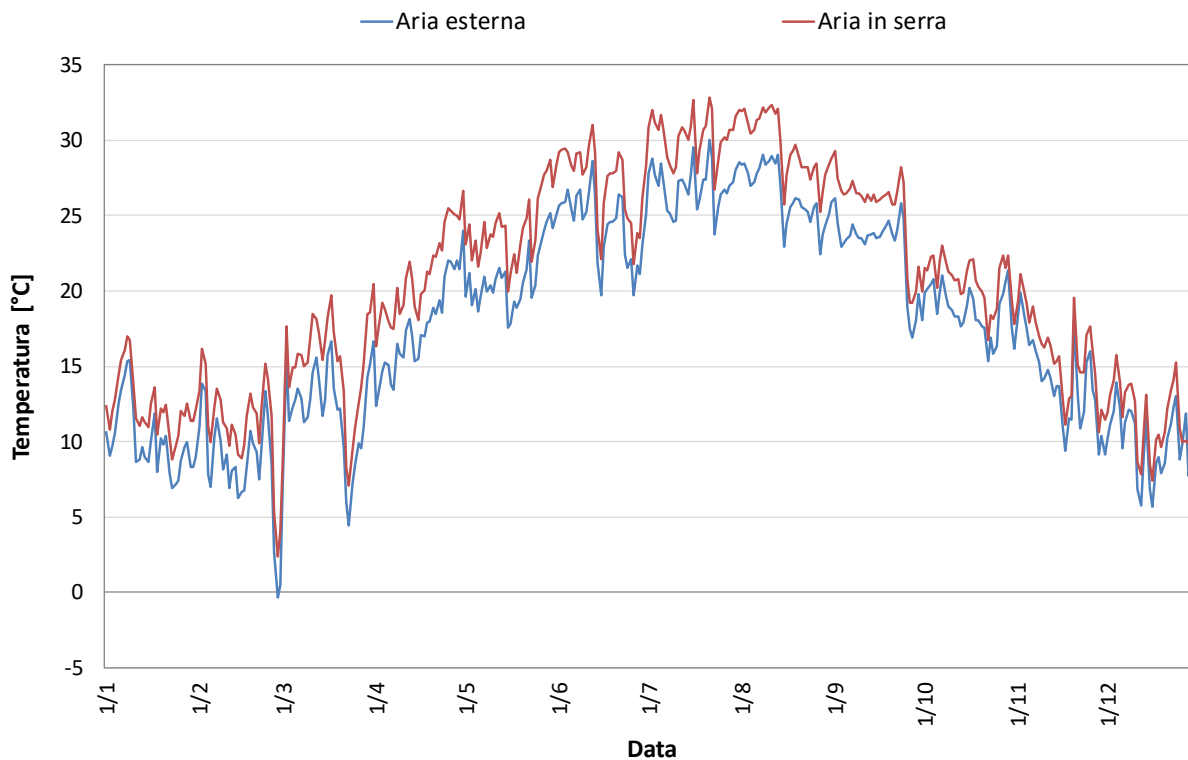


Figura 51. Temperatura dell'aria misurata all'esterno e all'interno della serra; anno 2018.

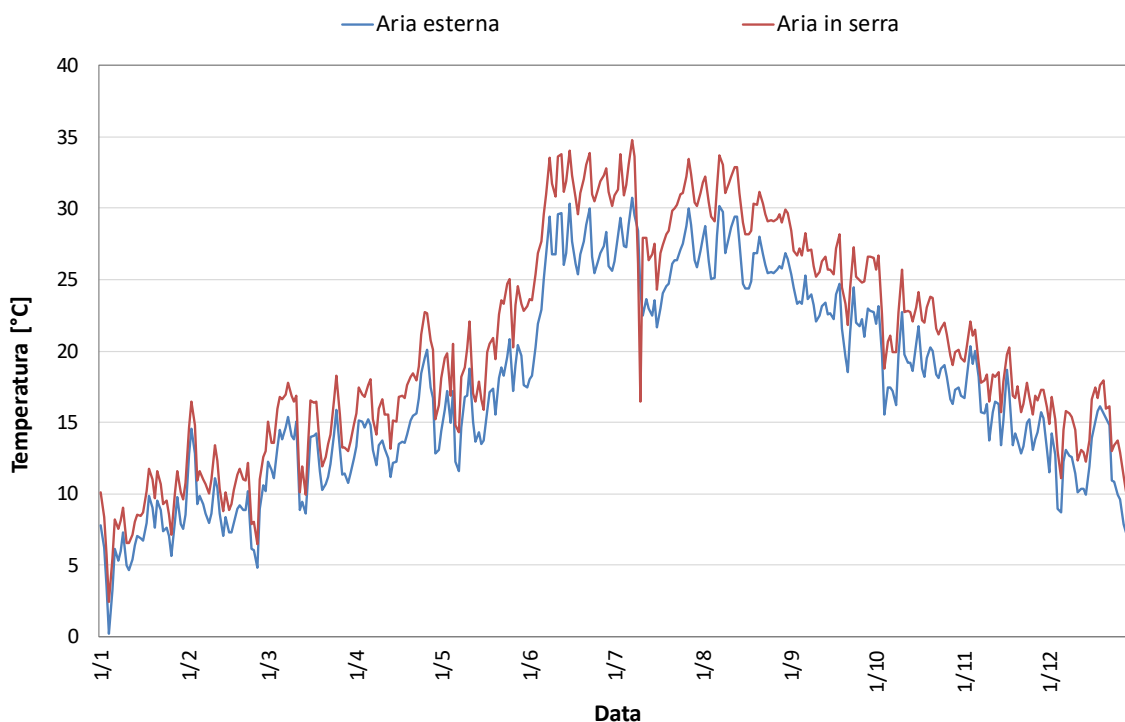


Figura 52. Temperatura dell'aria misurata all'esterno e all'interno della serra; anno 2019.

Nei mesi invernali del 2019 (Figura 52), le temperature minima, massima e media sono state rispettivamente pari a 0.2 °C, 15.4 °C e 9.1 °C. La temperatura media invernale è risultata 8.2 °C inferiore alla quella media annua. I valori minimo e massimo di temperatura invernale dell'aria in serra sono stati, invece, pari a 2.4 °C e 17.8 °C, rispettivamente. All'interno della serra, la temperatura media invernale, pari a 11.2 °C, è risultata 9.1 °C inferiore a quella media annua (20.3°C).

In generale, dai dati e dalle figure sopra riportati si evince che, mediamente, nel corso di un anno, la temperatura in serra è più elevata di circa 3 °C rispetto a quella dell'aria esterna. Le temperature medie invernali dell'aria all'interno della serra sono più elevate di quelle dell'aria esterna, con una differenza tra le due temperature compresa tra 2.1 °C e 3 °C, nei tre anni analizzati.

Tali dati devono, quindi, essere messi in relazione con i livelli termici caratteristici specifici della specie coltivata all'interno della serra [27]. In particolare, in questo studio, sono stati considerati i seguenti valori di temperatura significativi per le colture: la temperatura minima letale, la temperatura minima biologica e la temperatura ottimale nel periodo diurno e notturno. Nella maggior parte dei casi, non è possibile far riferimento ad un valore ben preciso ma piuttosto ad un range, più o meno ampio, di valori di temperatura.

Per temperatura minima letale si intende quel valore (o range di valori) di temperatura in corrispondenza del quale si manifestano danni irreversibili per la pianta e che, se mantenuto per un certo periodo di tempo, può portare alla morte della pianta stessa.

La temperatura minima biologica è quella a cui si verifica l'interruzione dell'attività vegetativa della pianta. Tale livello termico è opportuno sia mantenuto anche in caso di sospensione temporanea della produzione, in prospettiva di una ripresa della stessa.

Tabella 5: Livelli termici minimi ed ottimali dell'aria per alcune specie orticole e floricole.

Specie	Temperatura minima letale [°C]	Temperatura minima biologica [°C]	Temperatura ottimale [°C]		
			Notte	Giorno	
Orticole	cetriolo	0-4	10-13	18-20	24-28
	fagiolo	0-2	10-14	16-18	21-28
	fragola	(-2)-0	6	10-13	18-22
	lattuga	(-2) -0	4-6	10-15	15-20
	melanzana	0-2	9-10	15-18	22-26
	melone	0-2	12-14	18-21	24-30
	peperone	0-4	10-12	16-18	22-28
	pomodoro	0-2	8-10	13-16	22-26
	zucca	0-4	10-12	15-18	24-30
Floricole	ciclamino	-	2-4	12-18	20-22
	crisantemo	-	6-8	13-16	20-25
	garofano	(-4)-0	4-6	10-12	18-21
	gerbera	0-2	8-10	13-15	20-24
	gladiolo	0-2	5	10-12	16-20
	iris	-	3-5	8-15	15-20
	poinsettia	0-4	8-10	18-20	20-25
	rosa	(-6)-0	8-12	14-16	20-25
	tulipano	-	4-6	12-18	22-25

La temperatura ottimale nel periodo diurno e in quello notturno si riferisce a quei valori da garantire, durante la stagione invernale, per coltivazioni che garantiscano un ritorno economico.

Nella Tabella 5 sono riportati i valori minimi ed ottimali di temperatura dell'aria per la coltura in serra di alcune specie orticole e floricole.

Sulla base dei parametri misurati sperimentalmente nella serra e considerando i valori di temperatura significativi, sopra riportati, sono state fatte le seguenti valutazioni circa le esigenze microclimatiche invernali delle piante coltivate in serra.

Sono state individuate quattro diverse specie comunemente coltivate durante la stagione invernale: due orticole (pomodoro e lattuga) e due floricole (rosa e poinsettia) (Figura 53).

Il parametro microclimatico considerato è stato la temperatura dell'aria in serra, mentre i parametri relativi alle piante sono stati i valori minimi ed ottimali di temperatura.



Figura 53. Coltivazioni in serra di pomodori (a), lattughe (b), rose (c) e poinsettie (d). (fonte: <https://coltureprotette.edagricole.it/>)

È stato effettuato un confronto tra temperatura misurata dell'aria in serra e i differenti livelli termici, richiesti dalle quattro diverse specie. Ciò ha permesso di calcolare il numero di ore durante il quale vi sarebbe stata la necessità di accensione dell'impianto di riscaldamento, per garantire temperature dell'aria in serra superiori a quelle registrate e compatibili con quelle limite, legate alle esigenze colturali delle piante. I calcoli sono stati effettuati con riferimento a tre anni di misurazioni: 2017, 2018 e 2019. I risultati

di tali valutazioni sono riportati nelle Figura 54- Figura 58 per quanto riguarda le due specie orticole e nelle Figura 59 - Figura 63 per le due specie floricole.

Dai grafici emerge che, man mano che i limiti termici diventano più elevati, e quindi più stringenti, passando dalle temperature letali a quelle ottimali, le ore di riscaldamento necessarie aumentano, per tutte e quattro le specie considerate. In particolare, passando dalla temperatura minima letale a quella ottimale si registra un incremento di ore pari o superiore al 99 %.

Se si volessero garantire le temperature minime letali, le richieste di riscaldamento sarebbero molto ridotte, e al limite nulle, come si evince dalla Figura 54 e dalla Figura 59. Un primo significativo incremento si registra, se si passa a considerare le temperature minime biologiche (Figura 55, Figura 60).

Per poter soddisfare il livello termico ottimale, le ore di riscaldamento si attestano su valori particolarmente elevati, fino a sfiorare la metà delle ore di un intero anno (Figura 58, Figura 63). Inoltre, sempre con riferimento alle temperature ottimali, si osserva che, sebbene i valori diurni siano superiori a quelli notturni, le ore necessarie di riscaldamento aumentano passando dal periodo diurno al notturno (Figura 56, Figura 57, Figura 61, Figura 62). Il contributo della radiazione solare durante le ore diurne risulta, quindi, fondamentale nel garantire temperature più elevate dell'aria all'interno della serra.

Alla luce di queste considerazioni, si può affermare che le richieste energetiche per la climatizzazione invernale di una serra, affinché si soddisfino le esigenze microclimatiche delle specie coltivate al suo interno, possono essere molto ingenti. Pertanto, la scelta delle piante da coltivare e le soluzioni impiantistiche da adottare devono essere correlate. Altrettanto rilevante risulta la scelta dei sistemi di climatizzazione che sfruttano fonti energetiche varie e rinnovabili, al fine di limitare i consumi energetici.

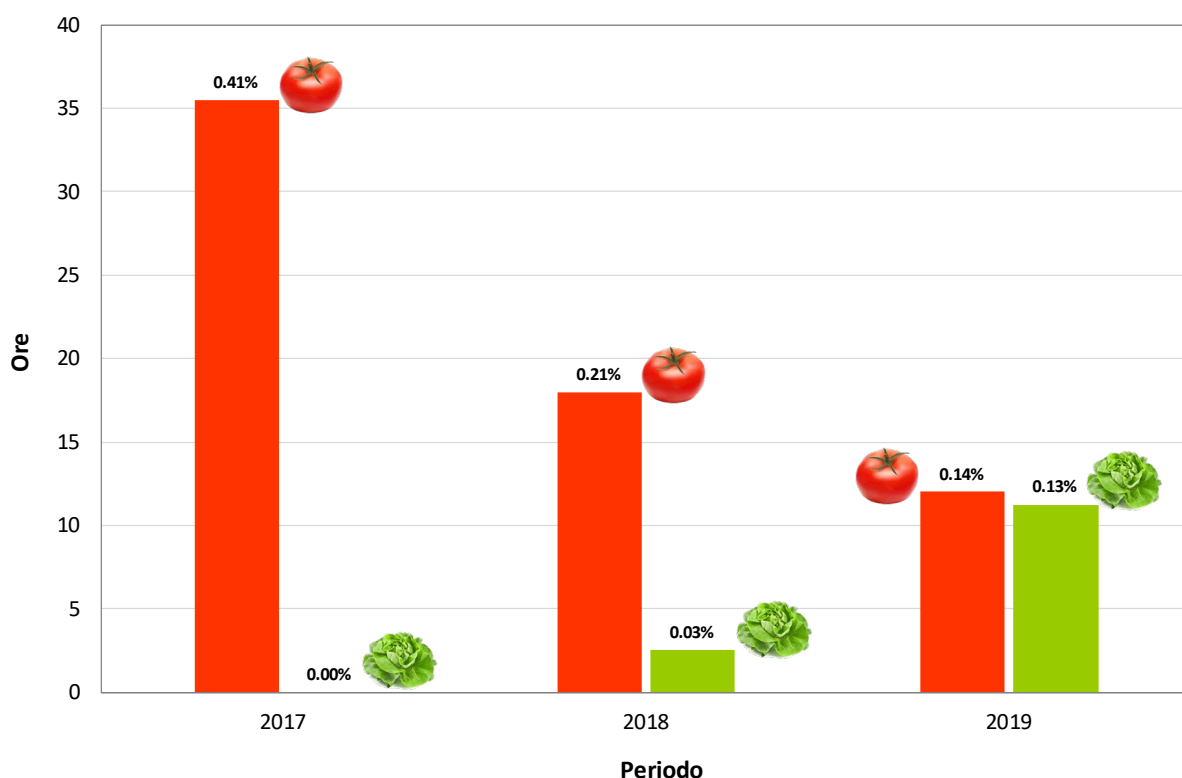


Figura 54. Esigenze microclimatiche invernali in serra per la coltivazione del pomodoro e della lattuga: ore necessarie di riscaldamento e valori percentuali rispetto alle ore degli anni 2017, 2018, 2019; valori calcolati considerando le temperature minime letali delle colture.

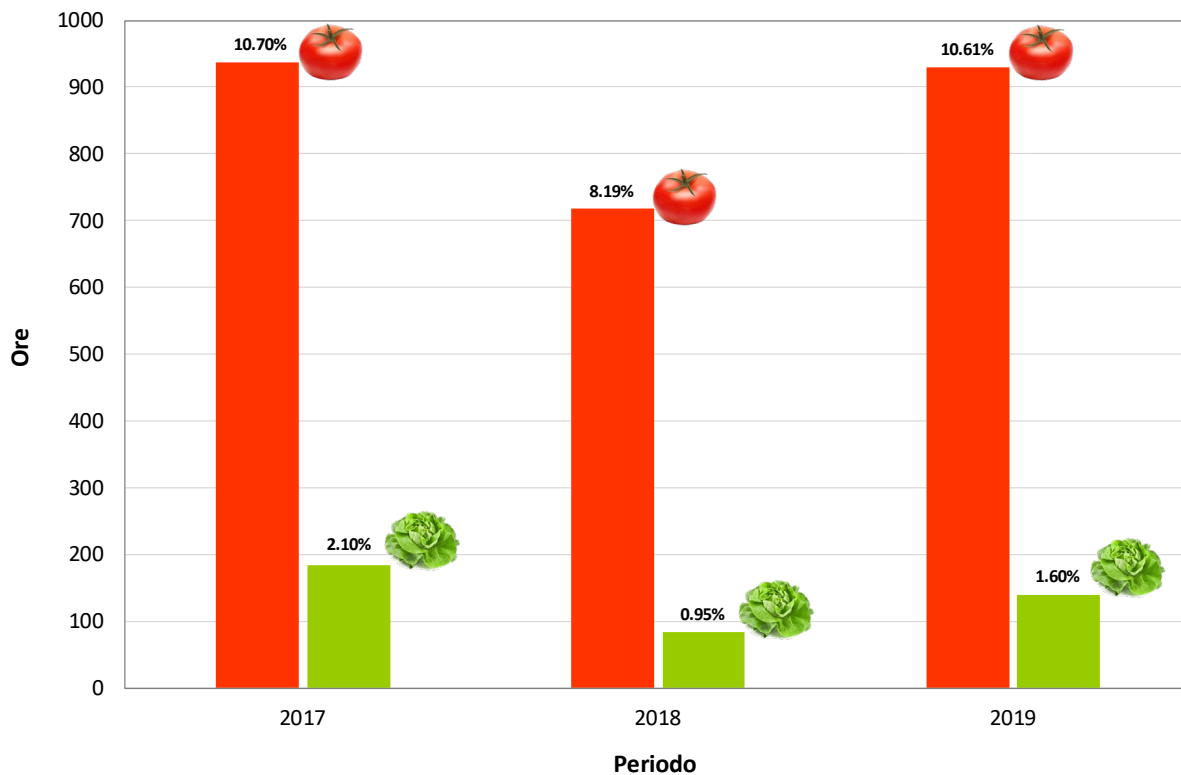


Figura 55. Esigenze microclimatiche invernali in serra per la coltivazione del pomodoro e della lattuga: ore necessarie di riscaldamento e valori percentuali rispetto alle ore degli anni 2017, 2018, 2019; valori calcolati considerando le temperature minime biologiche delle colture.

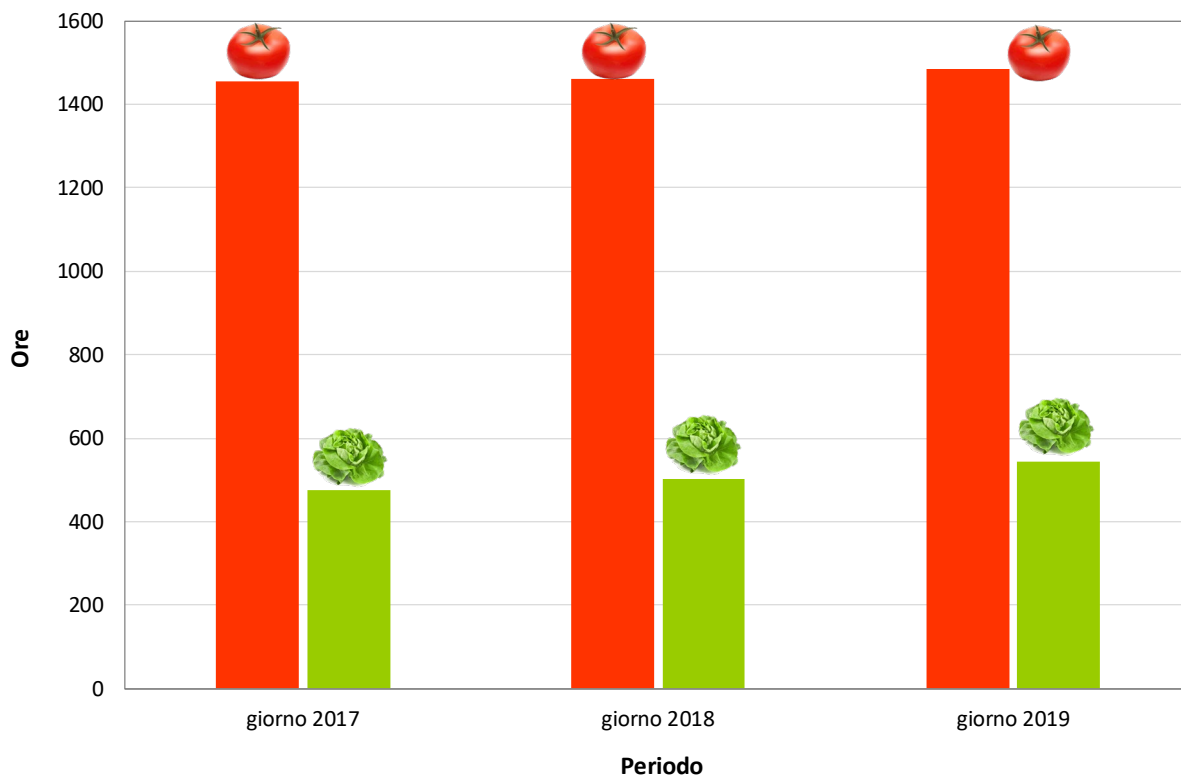


Figura 56. Esigenze microclimatiche invernali in serra per la coltivazione del pomodoro e della lattuga: ore necessarie di riscaldamento con riferimento al periodo diurno per gli anni 2017, 2018, 2019; valori calcolati considerando le temperature diurne ottimali delle colture.

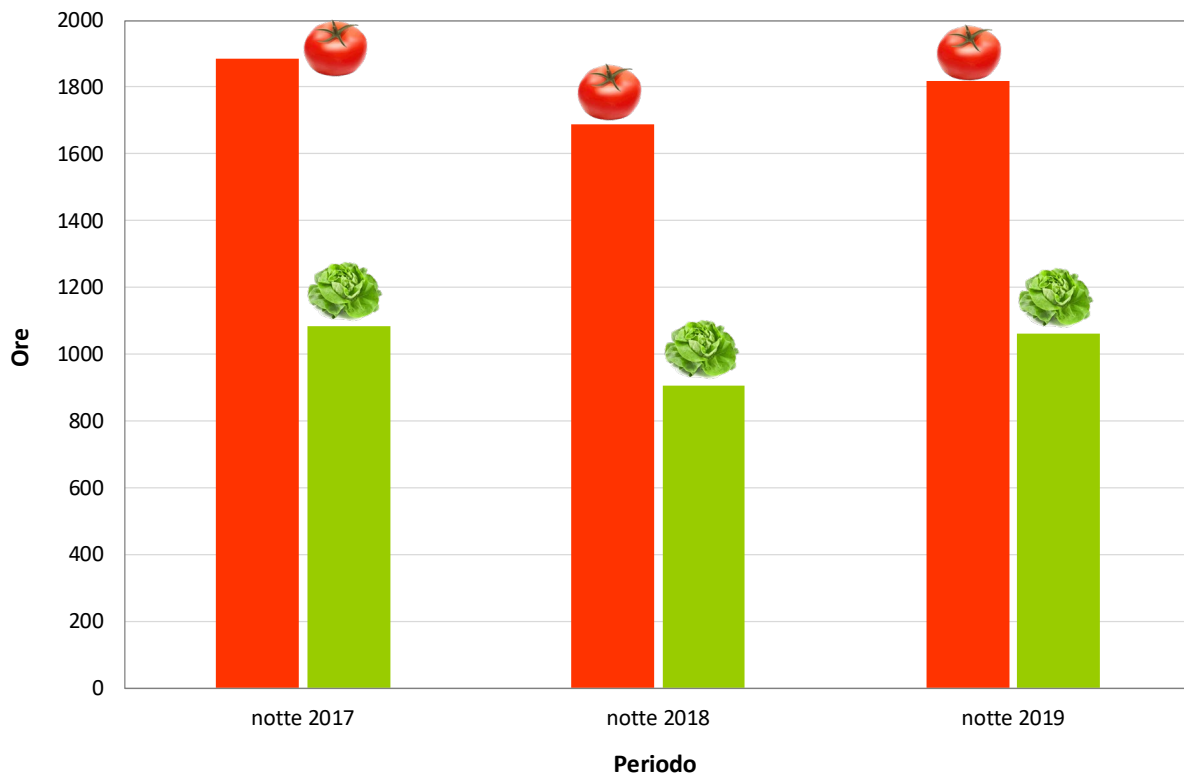


Figura 57. Esigenze microclimatiche invernali in serra per la coltivazione del pomodoro e della lattuga: ore necessarie di riscaldamento con riferimento al periodo notturno per gli anni 2017, 2018, 2019; valori calcolati considerando le temperature notturne ottimali delle colture.

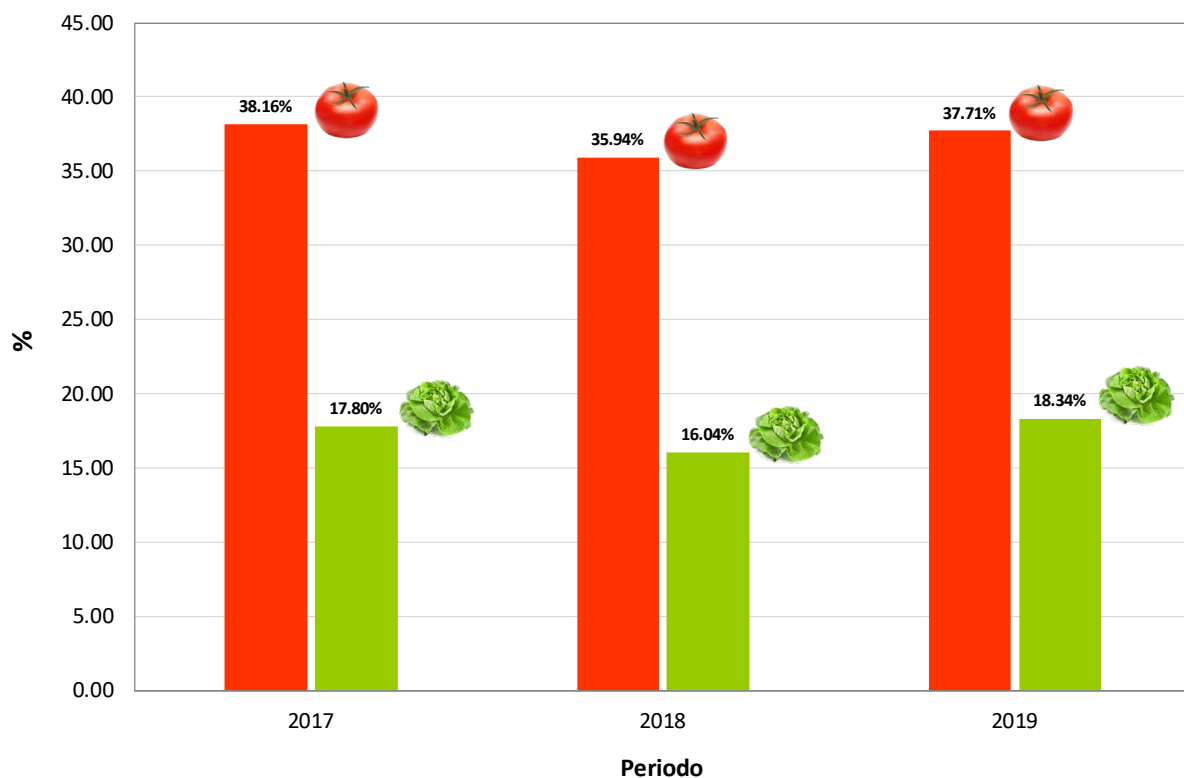


Figura 58. Esigenze microclimatiche invernali in serra per la coltivazione del pomodoro e della lattuga: percentuale di ore necessarie di riscaldamento rispetto alle ore degli anni 2017, 2018, 2019; valori calcolati considerando le temperature minime ottimali delle colture.

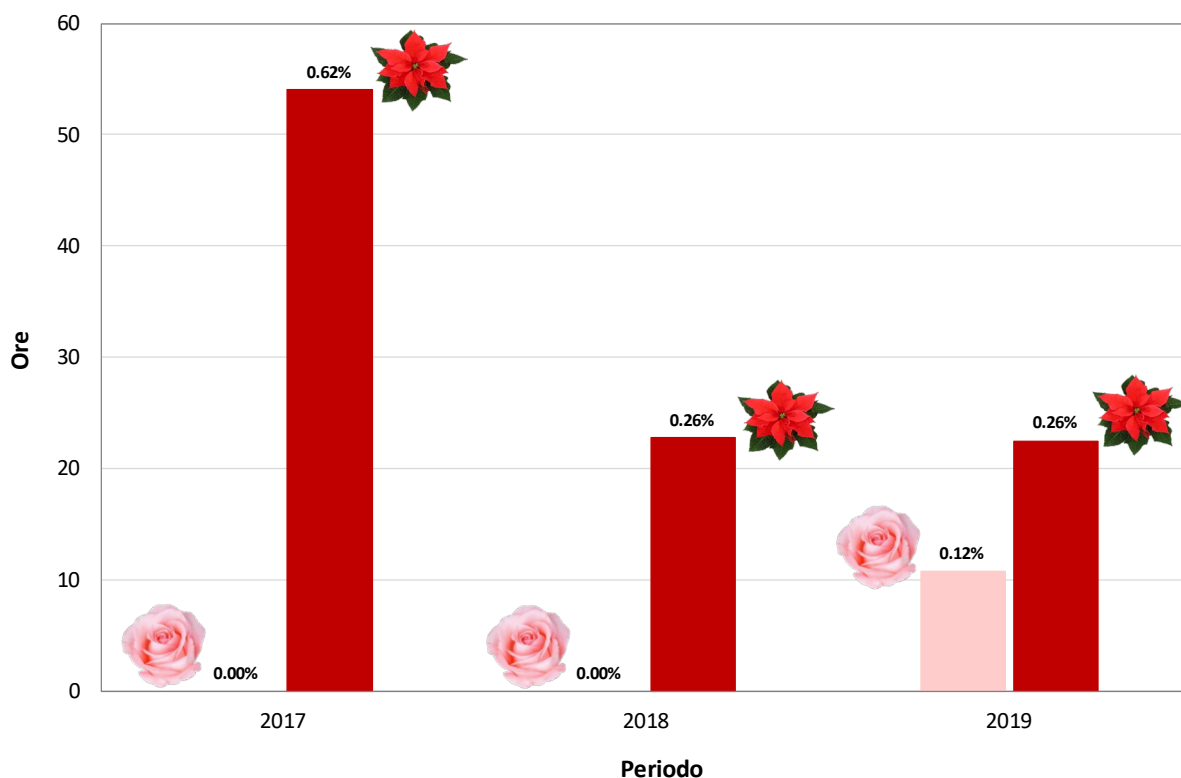


Figura 59. Esigenze microclimatiche invernali in serra per la coltivazione della rosa e della poinsettia: ore necessarie di riscaldamento e valori percentuali rispetto alle ore degli anni 2017, 2018, 2019; valori calcolati considerando le temperature minime letali delle colture.

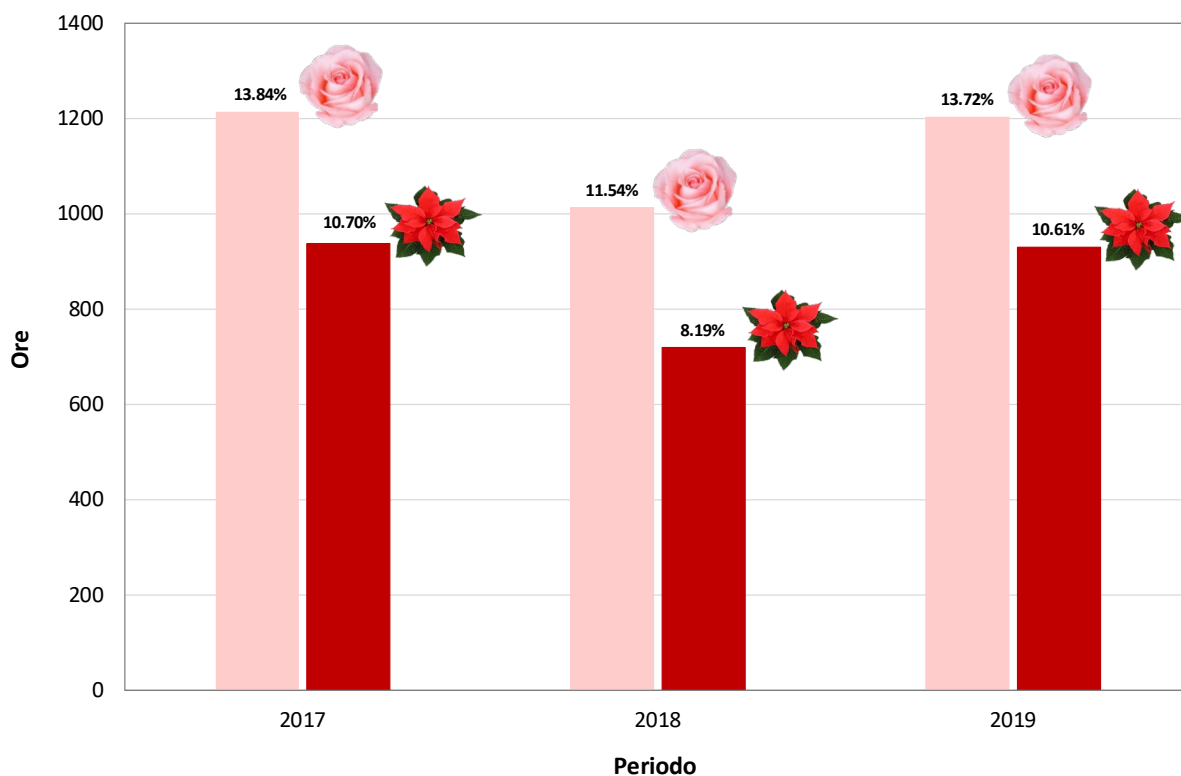


Figura 60. Esigenze microclimatiche invernali in serra per la coltivazione della rosa e della poinsettia: ore necessarie di riscaldamento e valori percentuali rispetto alle ore degli anni 2017, 2018, 2019; valori calcolati considerando le temperature minime biologiche delle colture.

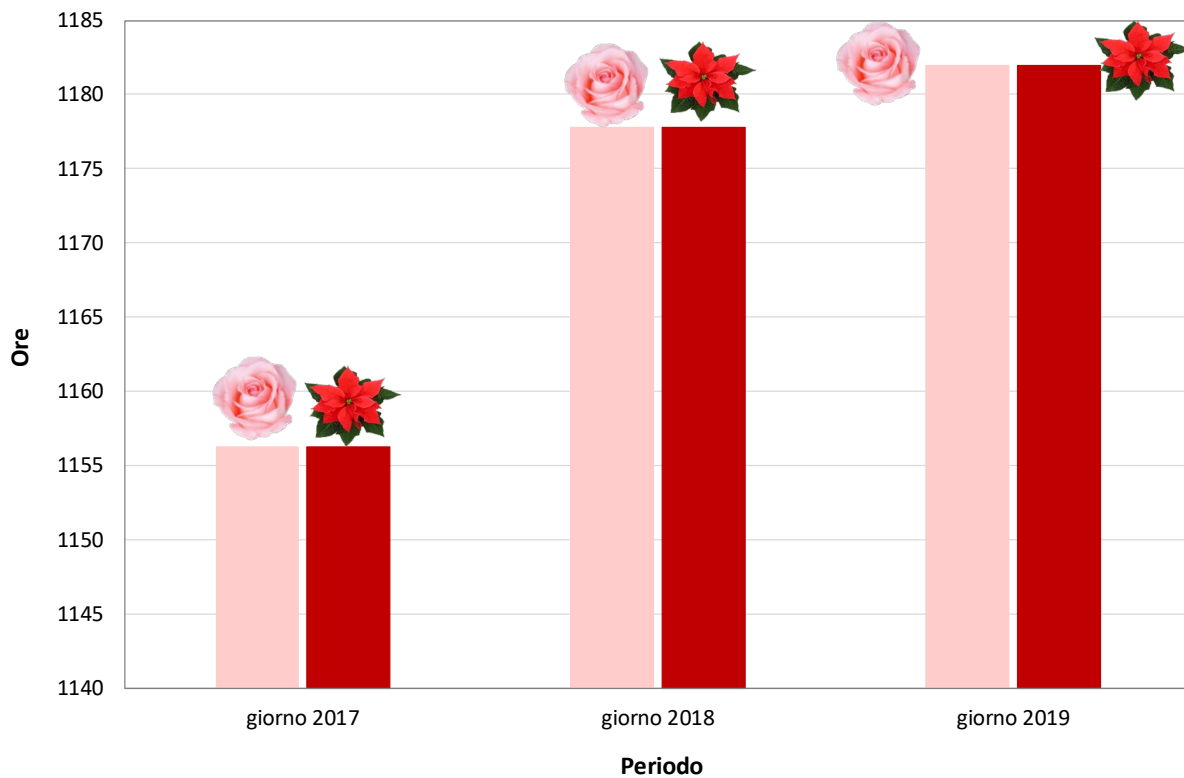


Figura 61. Esigenze microclimatiche invernali in serra per la coltivazione della rosa e della poinsettia: ore necessarie di riscaldamento con riferimento al periodo diurno per gli anni 2017, 2018, 2019; valori calcolati considerando le temperature diurne ottimali delle colture.

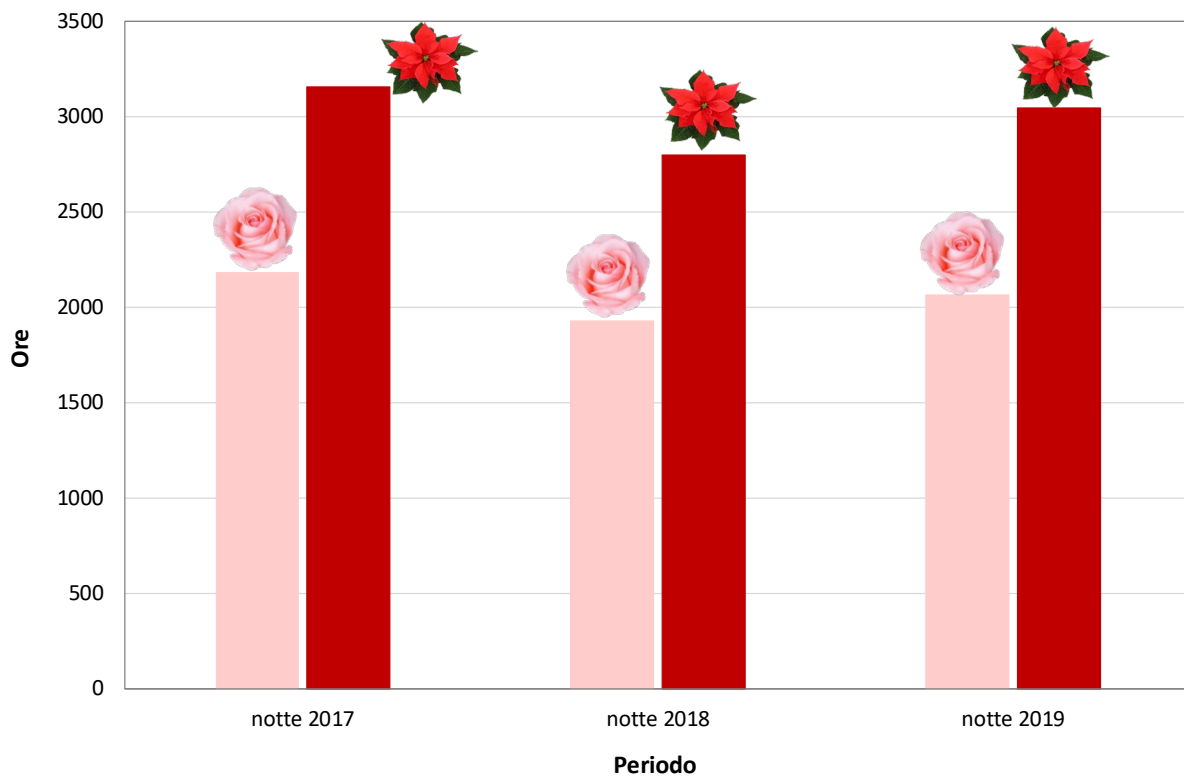


Figura 62. Esigenze microclimatiche invernali in serra per la coltivazione della rosa e della poinsettia: ore necessarie di riscaldamento con riferimento al periodo notturno per gli anni 2017, 2018, 2019; valori calcolati considerando le temperature notturne ottimali delle colture.

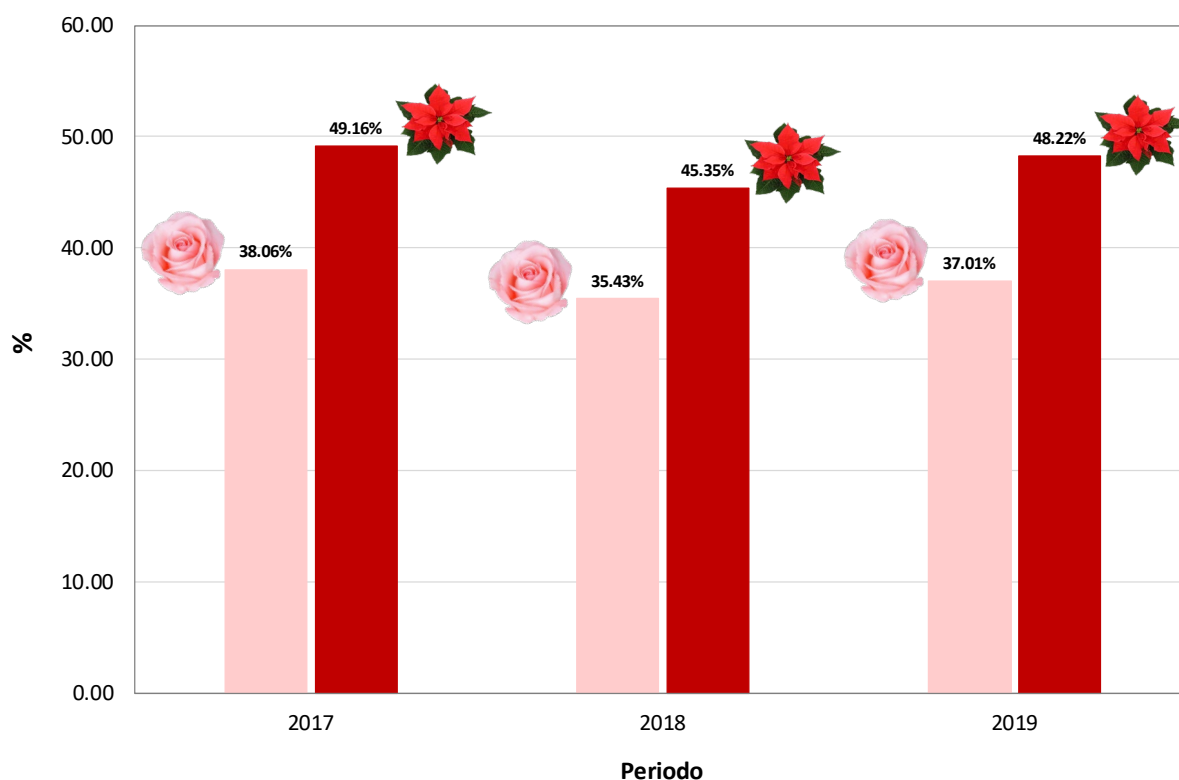


Figura 63. Esigenze microclimatiche invernali in serra per la coltivazione della rosa e della poinsettia: percentuale di ore necessarie di riscaldamento rispetto alle ore degli anni 2017, 2018, 2019; valori calcolati considerando le temperature minime ottimali delle colture.

2.4 Pubblicazioni del gruppo di ricerca

I risultati ottenuti dal gruppo di ricerca dell'Università di Bari e dall'ENEA UTEE AGR sono stati presentati durante i seguenti convegni:

1. Corso di formazione di +Community ENTI LOCALI, dal titolo "Efficienza energetica e riqualificazione degli edifici per la rigenerazione delle città", con presentazione della comunicazione dal titolo "Solar cooling" (G. Vox & E. Schettini). Sala Affreschi del Palazzo Isimbardi, sede della Città metropolitana di Milano in Via Vivaio n°1 a Milano, 5 Febbraio 2019.
2. International Symposium ISHS GreenSys 2019 on "Advanced Technologies and Management for Innovative Greenhouses", con presentazione della comunicazione dal titolo "Experimental results of a solar cooling system for greenhouse climate control" (G. Puglisi, G. Vox, C.A. Campiotti, G. Scarascia-Mugnozza, E. Schettini), Angers, France, 16-20 Giugno 2019
3. Convegno "Sostenibilità energetica e ambientale per i territori e le città", con presentazione della comunicazione dal titolo "Solar Cooling: a renewable energy solution" (G. Vox). Riserva Naturale Orientata Bosco d'Alcamo, Alcamo (Trapani), 5-6 Novembre 2019. Il convegno è stato organizzato nell'ambito della campagna nazionale "Italia in Classe A", promossa dal Ministero dello Sviluppo Economico e realizzata dall'ENEA.

Le presentazioni sono state oggetto di numerose domande e richieste di approfondimenti da parte di ricercatori partecipanti alle Conferenze.

L'articolo pubblicato è stato:

Giovanni Puglisi, Giuliano Vox, Angeliki Kavga, Fabiana Convertino, Ileana Blanco, Evelia Schettini. 2019. "Solar Cooling: A renewable energy solution" in RIVISTA DI STUDI SULLA SOSTENIBILITÀ 2 Suppl./2019, pp. 231-247, DOI:10.3280/RISS2019-002-S1015

Il seguente articolo è in corso di pubblicazione:

Giovanni Puglisi, Giuliano Vox, Carlo Alberto Campiotti, Giacomo Scarascia Mugnozza, Evelia Schettini.
Experimental results of a solar cooling system for greenhouse climate control. In stampa su *Acta Horticulturae*

3 Conclusioni

Le esigenze di condizionamento climatico nella filiera agro-alimentare fanno emergere la necessità di utilizzo di sistemi innovativi basati sullo sfruttamento di fonti energetiche diversificate e rinnovabili.

L'attività di ricerca dell'Università di Bari si è focalizzata sulle esigenze di raffrescamento e riscaldamento delle colture in serra. Lo studio è stato supportato da una campagna di sperimentazione su una serra sperimentale raffrescata mediante un impianto di solar cooling.

Sono stati sperimentati e monitorati due sistemi di distribuzione del freddo alla zona di coltivazione in serra; questi sono stati testati nell'estate 2019 per una coltivazione fuori suolo di pomodoro. Un sistema di distribuzione del freddo prevede l'impiego di tubi interrati nel substrato di coltivazione, l'altro di piastre e tubi posti nella zona areale delle piante. Sulla base dei dati raccolti, si può concludere che il principale beneficio del sistema a tubi interrati ha riguardato la riduzione della temperatura del terreno di coltivazione. La soluzione a piastre e tubi, invece, ha prodotto vantaggi in termini di riduzione della temperatura dell'aria nella zona di coltivazione e vantaggi agronomici, favorendo una maggiore crescita delle piante e produzione di pomodori.

La serra sperimentale è, attualmente, una serra fredda. Nell'ambito della ricerca, sono state valutate, per garantire nei periodi freddi le condizioni ottimali di crescita delle piante, le alternative impiantistiche disponibili per il riscaldamento invernale delle colture in serra.

In virtù della stretta relazione tra sistemi di condizionamento, condizioni climatiche locali, microclimatiche della serra e tipologia ed esigenze delle diverse specie coltivate in serra, questi aspetti sono stati indagati parallelamente. Correlando le temperature invernali misurate in serra e i livelli termici dell'aria idonei per diverse specie orticole e floricole, sono state calcolate le necessità di riscaldamento, quantificate come ore di accensione dell'impianto. Si può concludere che, in generale, le richieste energetiche per il condizionamento invernale sono notevoli e occorre, pertanto, incentivare l'utilizzo di sistemi innovativi e alimentati da fonti energetiche rinnovabili e differenziate.

4 Riferimenti bibliografici

1. G. Scarascia Mugnozza, A. Anifantis, "Dal fotovoltaico al termico", *Culture Protette*, 6 (2009), pp. 40-43.
2. G. Vox, E. Schettini, A. Lisi Cervone, A. Anifantis, "Solar thermal collectors for greenhouse heating", *Acta Horticulturae*, 801 (2008), pp. 787-794. DOI: 10.17660/ActaHortic.2008.801.92
3. G. Vox, M. Teitel, A. Pardossi, A. Minuto, F. Tinivella, E. Schettini, (2010). "Chapter 1: Sustainable Greenhouse Systems", *Sustainable Agriculture: Technology, Planning and Management*, (2010), Augusto Salazar e Ismael Rios Editors, Nova Science Publishers, Inc. NY USA. ISBN: 978-1-60876-269-9: 1-79.
4. I. Blanco, S. Pascuzzi, A. S. Anifantis, G. Scarascia Mugnozza, "Study of a pilot photovoltaic-electrolyzer-fuel cell power system for a geothermal heat pump heated greenhouse and evaluation of the electrolyzer efficiency and operational mode", *Journal of Agricultural Engineering*, 45(3) (2014), pp. 111-118. eISSN 2239-6268 - ISSN 1974-7071. DOI: 10.4081/jae.2014.238
5. C. Campiotti, F. Dondi, F. Di Carlo, M. Scoccianti, G. Alonzo, C. Bibbiani, L. Incrocci, "Preliminary results of a PV closed greenhouse system for high irradiation zones in South Italy", *Acta Horticulturae*, 893 (2011), pp. 243-250. DOI: 10.17660/ActaHortic.2011.893.18

6. S. Castellano, "Photovoltaic greenhouses: Evaluation of shading effect and its influence on agricultural performances", *Journal of Agricultural Engineering*, 45(4) (2014), pp. 168-175. DOI: 10.4081/jae.2014.433
7. G. Russo, A.S. Anifantis, G. Verdiani, G. Scarascia Mugnozza, "Environmental analysis of geothermal heat pump and LPG greenhouse heating systems", *Biosystems Engineering*, 127 (2014), pp. 11-23. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2014.08.002
8. E. Cuce, D. Harjunowibowo, P.M. Cuce, "Renewable and sustainable energy saving strategies for greenhouse systems: A comprehensive review", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 64 (2016), pp. 34-59. DOI: 10.1016/j.rser.2016.05.077
9. I. Blanco, E. Schettini, G. Scarascia Mugnozza, G. Puglisi, C. A. Campiotti, G. Giagnacovo, G. Vox, "Thermal solar collectors and absorption system applied to greenhouse cooling", *Proceedings of the 43rd International Symposium on Agricultural Engineering "Actual Tasks on Agricultural Engineering"*, 24-27/2/2015, Opatija, Croatia, 2015, pp. 713-722. ISSN 1848-4425. <http://atae.agr.hr>
10. A. Yildiz, O. Ozgener, L. Ozgener, "Energetic performance analysis of a solar photovoltaic cell (PV) assisted closed loop earth-to-air heat exchanger for solar greenhouse cooling: An experimental study for low energy architecture in Aegean Region", *Renewable Energy*, 44 (2012), pp. 281-287. DOI: 10.1016/j.renene.2012.01.091
11. G. Papadakis, D. Briassoulis, G. Scarascia Mugnozza, G. Vox, P. Feuilloley, J.A. Stoffers, "Radiometric and thermal properties of, and testing methods for, greenhouse covering materials", *Journal of Agricultural and Engineering Research*, 77(1) (2000), pp. 7-38. DOI: 10.1006/jaer.2000.0525
12. G. Vox, E. Schettini, "Evaluation of the radiometric properties of starch-based biodegradable films for crop protection", *Polymer Testing*, 26(5) (2007), pp. 639-651. DOI: 10.1016/j.polymertesting.2007.03.010
13. C. Bibbiani, C. A. Campiotti, E. Schettini, G. Vox, "A sustainable energy for greenhouses heating in Italy: Wood biomass", *Acta Horticulturae*, 1170 (2017), pp. 523-530. DOI: 10.17660/ActaHortic.2017.1170.65
14. G. Scarascia Mugnozza, S. Pascuzzi, A. Anifantis, G. Verdiani, "Photovoltaic and geothermal integration system for greenhouse heating: an experimental study", *Proceedings of the 5th Int. Sci. Symp. Farm Machinery and Process Management in Sustainable Agriculture*, Lublin, Poland, 2011, pp. 135-138. ISBN 83-922409-9-5
15. F. Gorini, "I requisiti costruttivi delle serre rispetto alla necessità di illuminazione, aereazione e di riscaldamento", *Rivista di ortoflorofruitticoltura italiana*, 46(3) (1962), pp. 272-288. www.jstor.org/stable/42874249
16. M. Teitel, L. Segal, A. Shklyar, M. Barak, "A comparison between pipe and air heating methods for greenhouses", *Journal of Agricultural Engineering Research*, 72(3) (1999), pp. 259 - 273. DOI: 10.1006/jaer.1998.0370
17. S. Kurpaska, Z. Slipek, "Optimization of Greenhouse Substrate Heating", *Journal of Agricultural Engineering Research*, 76(2) (2000), pp. 129-139. DOI: 10.1006/jaer.2000.0537
18. M. S. Ahamed, H. Guo, K. Tanino, "Energy saving techniques for reducing the heating cost of conventional greenhouses", *Biosystems Engineering*, 178 (2019), pp. 9-33. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2018.10.017
19. T. Bartzanas, M. Tchamitchian, C. Kittas, "Influence of the heating method on greenhouse microclimate and energy consumption", *Biosystems Engineering*, 91(4) (2005), pp. 487-499. DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2005.04.012
20. A. Kavga, E. Karanastasi, I. Konstas, Th. Panidis, "Performance of an Infrared Heating System in a Production Greenhouse", *IFAC Proceedings Volumes*, 46(18), 2013, pp. 235-240. DOI: 10.3182/20130828-2-SF-3019.00017
21. V.J. Sinanoglou, A. Kavga, I.F. Strati, G. Sotiroudis, D. Lantzouraki, P. Zoumpoulakis, "Effects of Infrared Radiation on Eggplant (*Solanum melongena* L.) Greenhouse Cultivation and Fruits' Phenolic Profile", *Foods*, 8 (2019), 630. DOI: 10.3390/foods8120630

22. A. Kavga, T. Panidis, V. Bontozoglou, S. Pantelakis, "Infrared Heating of Greenhouses Revisited: An Experimental and Modeling Study", Transactions of the ASABE, 52(6) (2009), pp. 2055-2065. DOI: 10.13031/2013.29208
23. A. Kavga, G. Alexopoulos, B. Bontozoglou, S. Pantelakis, T.H. Panidis, "Experimental Investigation of the Energy Needs for a Conventionally and an Infrared-Heated Greenhouse", Advances in Mechanical Engineering, 4 (2012), 789515. DOI: 10.1155/2012/789515
24. M. Teitel, A. Shklyar, Y. Elad, V. Dikhtyar, E. Jerby, "Development of a microwave system for greenhouse heating", Acta Horticulturae, 534 (2000), pp. 189 - 195. DOI: 10.17660/ActaHortic.2000.534.21
25. S. Pascuzzi, A.S. Anifantis, I. Blanco, G. Scarascia Mugnozza (2016) "Electrolyzer Performance Analysis of an Integrated Hydrogen Power System for Greenhouse Heating. A Case Study", Sustainability, 8(7) (2016), p. 629. DOI: 10.3390/su8070629
26. G. Scarascia Mugnozza, S. Pascuzzi, A. Anifantis, G. Verdiani, "Use of low-enthalpy geothermal resources for green house heating: an experimental study", Acta Scientiarum Polonorum, Technica Agraria, 11 (2012), pp. 13-19.
27. R. Tesi, "Le esigenze climatiche delle colture di serra", Rivista di Ortoflorofruitticoltura Italiana, 53(4) (1969), pp. 399-406. www.jstor.org/stable/42874939

5 Breve curriculum scientifico del gruppo di lavoro

Il Dipartimento di Scienze Agro-ambientali e Territoriali (DISAAT) dell'Università degli Studi di Bari Aldo Moro ha una lunga tradizione nell'insegnamento e nella ricerca scientifica nel campo dell'ingegneria agraria. L'area scientifica di maggiore interesse riguarda lo studio degli aspetti ingegneristici relativi alle strutture, agli impianti, ai materiali e all'energia concernenti gli insediamenti produttivi agricoli quali serre, allevamenti e industrie di trasformazione dei prodotti agricoli. Le ricerche condotte dal gruppo di ricerca del Dipartimento DISAAT sono finalizzate a ridurre l'impatto ambientale dei sistemi produttivi agricoli mediante l'individuazione di impianti e materiali finalizzati alla riduzione dei consumi energetici, alla gestione dei reflui prodotti e all'introduzione delle energie rinnovabili. Il gruppo di ricerca ha partecipato a numerosi progetti europei e nazionali, tra i quali: EC RTD "Biodegradable plastics for environmentally friendly mulching and low tunnel cultivation- Bioplastics" (2001-2005); EC LIFE Environment "Biodegradable coverages for sustainable agriculture – BIO.CO.AGRI." (2003-2005); EC CRAFT "Development of protective structures covered with permeable materials for agricultural use - AGRONETS" (2003-2006); EC Collective Research "Labelling agricultural plastic waste for valorising the waste stream - LABELAGRIWASTE" (2006-2009); MIPAF "Ricerche per il miglioramento della frutticoltura meridionale – FRU.MED." (2005-2011); Piano Annuale di Realizzazione 2012 "Modelli per l'incremento dell'efficienza energetica degli edifici mediante la copertura con essenze vegetali in ambiente mediterraneo"; Piano Annuale di Realizzazione 2013 "Eco-Greenroof & Vertical Greenery System"; Piano Annuale di Realizzazione 2015 "Sistemi di climatizzazione innovativi per edifici e sistemi serra"; Piano Annuale di Realizzazione 2016 "Analisi comparativa e sviluppo di sistemi di distribuzione del freddo negli impianti di raffrescamento solare per serra"; Piano Annuale di Realizzazione 2017 "Analisi di tecniche di raffrescamento sostenibili applicabili in edifici civili e in edifici serra"; Piano Annuale di Realizzazione 2018 "Studio di tecniche di realizzazione di un prototipo di edificio con parete verde a microclima controllato per testare il modello del flusso energetico tra la parete verde e la superficie dell'edificio"; European Territorial Cooperation Programme Greece-Italy 2007-2013 "Agricultural Waste valorisation for a competitive and sustainable Regional Development - AWARD" (2013 - 2015); "Razionalizzazione d'uso delle risorse primarie per una peschicoltura sostenibile - SUS-PEACH", finanziato dalla Regione Puglia (2017-2019).

Il gruppo di ricerca è costituito da:

prof.ssa ing. Evelia Schettini – responsabile scientifico, Professore Associato, Ingegnere Civile, PhD in Ingegneria delle Strutture, esperta di materiali di copertura e di impianti per la climatizzazione delle serre.

prof. ing. Giuliano Vox –Professore Associato, Ingegnere Elettronico, esperto di energie rinnovabili, di microclima e di sensoristica ambientale.

prof. ing. Giacomo Scarascia Mugnozza –Professore Ordinario, Ingegnere Civile, esperto di strutture serricole, di materiali costruttivi, di energie rinnovabili.

ing. Ileana Blanco – Assegnista di ricerca, Ingegnere Civile, PhD in Ingegneria dei Biosistemi, esperta di impianti per la climatizzazione delle serre alimentati da energia rinnovabile.

Ing. Fabiana Convertino –Ingegnere Civile, Dottoranda in “Biodiversità, agricoltura e Ambiente”.

Sig. Francesco Ferrulli - Tecnico, esperto di sensoristica.