



UNIVERSITA' DEGLI STUDI DELLA TUSCIA DI VITERBO

Dipartimento di

SCIENZE AGRARIE E FORESTALI - DAFNE

Corso di Dottorato di Ricerca in:

SCIENZE DELLE PRODUZIONI VEGETALI E ANIMALI – XXXI CICLO

Titolo:

**RIDUZIONE DEI CONSUMI DI ENERGIA PER IL
RISCALDAMENTO DELLE SERRE
(AGR/09)**

Tesi di dottorato di:

Dott. Ing. Chiara Terrosi

Coordinatore del corso:

Prof.ssa Stefania Masci

Direttore di Tesi:

Dott. Gianluca Burchi

ANNO ACCADEMICO 2015-2018

a Michele

L'autorità dell'opinione di mille nelle scienze
non val per una scintilla di ragione di un solo

Galileo Galilei

INTRODUZIONE**1. STATO DELL' ARTE DEI SISTEMI DI RISCALDAMENTO UTILIZZATI IN COLTURE PROTETTE: RISULTATI DI UN' INDAGINE PRELIMINARE**

1.1	Descrizione dell'attività	5-6
1.2	Sistemi e combustibili più diffusi: risultati tecnico economici.....	6-9
1.3	Conoscere per innovare: l'antitesi innovazione tecnologica - tradizione	9-11
1.4	Collaborazione imprenditore ed Energy Manager per un progetto di fattibilità.....	11-13

2. BASICAL: UN SISTEMA INNOVATIVO DI RISCALDAMENTO

2.1	Idea progettuale e obiettivi	14-17
-----	------------------------------------	-------

3. PRIMO ANNO DI SPERIMENTAZIONE_BASICAL 1.0

3.1	Materiali e metodi.....	18-35
3.1.1	Descrizione della serra utilizzata per la prova sperimentale.....	18-20
3.1.2	Strumenti di misura dei parametri termoigrometrici dell'aria e del substrato..	20-23
3.1.3	Impianto di irrigazione	23-24
3.1.4	Impianti di riscaldamento.....	24-28
3.1.5	Materiale vegetale e condizioni di crescita.....	29-33
3.1.6	Elaborazione dei dati acquisiti.....	33-35
3.2	Esposizione e discussione dei risultati.....	36-55
3.2.1	Parametri termoigrometrici interni ed esterni alla serra.....	36-45
3.2.2	Parametri agronomici.....	45-53
3.2.3	Parametri energetici.....	53-55

4. SECONDO ANNO DI SPERIMENTAZIONE_BASICAL 2.0

4.1 Utilizzo di una tecnologia rinnovabile: la pompa di calore	58-60
4.2 Materiali e Metodi.....	60-67
4.2.1 Descrizione della serra utilizzata per la prova sperimentale.....	61-62
4.2.2 Strumenti di misura dei parametri termoigrometrici dell'aria e del substrato..	62-65
4.2.3 Impianto di irrigazione.....	65
4.2.4 Impianto di riscaldamento.....	65-66
4.2.5 Materiale vegetale e condizioni di crescita.....	66-67
4.2.6 Elaborazione dei dati acquisiti.....	67
4.3 Esposizione e discussione dei risultati.....	68-84
4.3.1 Parametri termoigrometrici interni ed esterni alla serra.....	68-74
4.3.2 Monitoraggio della temperatura nella canopy nel "Lato Basale".....	75-79
4.3.3 Parametri agronomici:analisi quantitativa e qualitativa.....	79-81
4.3.4 Parametri energetici.....	82-84

5. SPERIMENTAZIONE COMPLEMENTARE: STUDIO DELLA DIFFUSIONE DEL CALORE ALL'INTERNO DEL SUBSTRATO DI COLTIVAZIONE AL VARIARE DELLA POSIZIONE DELL'IMPIANTO COASSIALE

5.1 Materiali e metodi	86-89
5.2 Esposizione e discussione dei risultati	90-98
5.2.1 Modalità di diffusione del calore: bancale non riscaldato.....	90
5.2.2 Modalità di diffusione del calore: bancale riscaldato.....	90-94
5.2.3 Mappe di temperatura: contour plot.....	95-98

CONCLUSIONI

APPENDICE A_RISCALDAMENTO BASALE A TUBAZIONI COASSIALI	I-IV
---	-------------

BIBLIOGRAFIA

ELENCO ATTIVITA' SVOLTE ANNI 2015 - 2018

Introduzione

La superficie mondiale complessiva destinata al comparto fiori e piante ornamentali è di circa 500 mila ettari, dei quali circa la metà appartengono alla Cina. La distribuzione della superficie interessa da una parte l'Asia, i cui principali Paesi sono Cina e India, dall'altra l'Europa, che rappresenta il più grande mercato di consumo [1].

Per la coltivazione in serra, i paesi possono essere classificati in paesi appartenenti a zone climatiche fredde (Olanda, Inghilterra, Germania, ecc.), paesi appartenenti a zone climatiche temperate (costa mediterranea, Spagna, Italia, Turchia, Grecia, Israele, Egitto ecc.) e paesi la cui estensione comprende entrambe le zone climatiche (Stati Uniti, Giappone, ecc.) ed in cui il tipo di tecnologia utilizzata in serra dipende dalla latitudine. In linea di massima, la coltivazione in serra è considerata energeticamente favorevole nei luoghi in cui la latitudine è compresa tra 30 e 40 gradi [2], infatti i costi necessari per il raffreddamento aumentano al di sotto del 30° grado di latitudine, mentre i costi di riscaldamento crescono superando il 40° grado di latitudine [3].

In Europa, i Paesi con le maggiori estensioni sono l'Olanda, il più importante mercato di redistribuzione a livello europeo, l'Italia, la Germania e la Francia, con una superficie complessiva di oltre 50 mila ettari. Il florovivaismo dell'agricoltura italiana, in termini di SAU (Superficie Agricola Utilizzata), corrisponde al 30% circa della superficie europea complessiva, conferendo così all'Italia una posizione dominante nell'ambito dell'UE [4]. La produzione delle aziende florovivaistiche italiane è pari a 2,5 miliardi di euro suddivisa in 1,15 miliardi per fiori e piante in vaso e 1,15 miliardi per i prodotti vivaistici (alberi e arbusti); rappresenta oltre il 5% della produzione agricola totale e deriva per il 50% dai comparti fiori e piante in vaso e il restante 50% da piante, alberi e arbusti destinati alle sistemazioni di spazi a verde [1].

Gli occupati in base al censimento Istat del 2000 sono oltre centomila e riguardano esclusivamente il settore agricolo. Le aziende nazionali per la quasi totalità sono di limitata superficie: mediamente inferiori ad 1 ettaro quelle floricole e superiori ai 2 ettari quelle che producono piante in vaso e prodotti vivaistici; di conseguenza prevalgono nel settore dei fiori recisi le aziende caratterizzate da una struttura elementare, generalmente a gestione familiare; al contrario, nel settore delle piante in vaso o del vivaismo, la gestione si ispira a principi imprenditoriali. La produzione nazionale di fiori recisi, a causa di una maggiore volatilità dei listini e a discapito di un livello minimo accettabile di prezzo medio, si è dovuta orientare verso specie coltivabili in serra fredda e a basso utilizzo di manodopera, talvolta anche di nicchia come per esempio il cavolfiore ornamentale reciso o il ramo d'ortensia. Questa strategia ha

consentito di ampliare le superfici destinate a produzioni in piena aria, molto meno onerose in termini di gestione e di costi produttivi e in grado di garantire una continuità produttiva per diversi mesi dell'anno [5,6].

Negli ultimi anni si è assistito ad una contrazione del numero di aziende causata dall'abbassamento dei margini di redditività e dall'aumento dei costi di produzione in particolare di quelli relativi ai consumi di energia. L'agricoltura protetta infatti costituisce un settore altamente energivoro nel quale è evidente che il contenimento dei consumi e dei costi energetici per il riscaldamento rappresenta un aspetto determinante per la prosperità delle aziende, oltre che per la riduzione dei gas inquinanti emessi in atmosfera [7,8]. Le stime effettuate in Spagna, Italia, Paesi Bassi e Grecia hanno riportato per questi paesi un consumo di energia fossile in serra di circa 4 Mtep [9]. Più in dettaglio, il settore delle colture protette italiano è caratterizzato da non meno di 6.000 ettari di strutture permanenti in serra dotati essenzialmente di sistemi di climatizzazione fossile, che comportano un consumo energetico totale annuale di circa 0,74 Mtep, prevalentemente proveniente da combustibili fossili [9-10]. Un altro aspetto importante è legato al tipo di combustibile utilizzato; il più diffuso è il gasolio con un consumo annuo stimato pari a circa 350 milioni di litri. L'uso del gasolio, come di altre fonti fossili, causa un significativo impatto ambientale per le emissioni di sostanze climalteranti [11-12]; per produrre infatti un MWh di energia termica utile¹ con il gasolio, vengono immessi in atmosfera 325 kg di CO₂ equivalente² per un totale annuo di circa 1,1 milioni di tonnellate di CO₂ equivalente [13-14].

In questo contesto, a causa dei grandi carichi di riscaldamento e del prezzo relativamente elevato dei combustibili fossili, l'interesse per le fonti energetiche alternative o rinnovabili per il riscaldamento delle serre è attualmente in crescita. Importanti alternative alle sorgenti di energia tradizionali sono i collettori solari, la biomassa, i sistemi cogenerativi e le pompe di calore [15].

I primi studi sulla possibilità di utilizzare la pompa di calore nelle serre risalgono agli inizi degli anni '80 quando Bailey studio la possibilità di limitare l'umidità relativa in serre isolate durante le ore notturne [16]. Il metodo più comune per ridurre l'umidità relativa è generalmente quello di aumentare i livelli di ventilazione, ma ciò comporta un aumento dei costi di riscaldamento.

¹ Per *energia termica utile* si intende l'energia direttamente a disposizione del consumatore.

² *CO₂ equivalente* è una unità di misura che esprime l'impatto sul riscaldamento globale di una certa quantità di gas serra rispetto alla stessa quantità di anidride carbonica. Permette di pesare insieme emissioni di gas serra diversi con differenti effetti climalteranti.

Lo studio di Bailey ha rilevato che l'utilizzo di una pompa di calore per la deumidificazione dell'aria comportava una riduzione dei consumi di energia del 30%.

Successivamente, alla fine degli anni '90, Garcia et al. [17] hanno condotto uno studio teorico su diverse tecnologie di riscaldamento, tra cui una pompa di calore aria-aria per il riscaldamento delle serre in sette differenti località europee. Da tale studio non fu possibile stabilire la fattibilità economica della pompa di calore per nessuna località a causa dei costi del ciclo di vita della tecnologia che in quel periodo erano ancora troppo alti.

Nel 2010, Aye et al. [18] hanno presentato i risultati di uno studio sull'utilizzo di una pompa di calore aria-acqua per una serra di 4000m² posizionata a 120 km Nord di Melbourne in Australia. Con tale studio venne mostrato che il sistema testato presentava un tempo di ritorno semplice di sei anni ed una riduzione dei consumi di GPL del 16% rispetto al precedente sistema tradizionale a caldaia. Si può considerare la fine del primo decennio degli anni 2000, come il periodo in cui l'evoluzione tecnologica di questi sistemi impiantistici, uniti all'aumento dei costi energetici, hanno portato le pompe di calore ad essere considerate valide alternative ai sistemi di riscaldamento tradizionali [19,20]

Il Mi.P.A.A.F. ha individuato, tra i punti di debolezza del settore delle colture protette, i costi di produzione e tra questi quelli energetici sottolineando la necessità di:

- incentivare il passaggio da combustibili fossili a fonti energetiche rinnovabili, con benefici per l'ambiente e la collettività, attraverso la diffusione di impianti tecnologici innovativi;
- educare e favorire le imprese per un uso più razionale e sostenibile dell'energia incoraggiando investimenti e ristrutturazioni aziendali.

Con l'obiettivo generale di occuparsi di energia in agricoltura, nasce, si sviluppa e si avvia nel giugno 2016 il progetto Agroener: "Energia dall'agricoltura: innovazioni sostenibili per la bioeconomia" [21].

Agroener, finanziato dal Mi.P.A.A.F. con DD n.26329 del 01.04.16, si articola all'interno del comparto delle agro-bio energie sviluppando nei suoi sei WP (Work Package), in particolare nella WP1 "Miglioramento, sviluppo e promozione dell'efficienza energetica delle macchine, delle attrezzature agricole e della meccanizzazione", tematiche riguardanti l'efficienza energetica di macchine ed impianti, in accordo con uno dei principali obiettivi del programma finanziario dell'Unione Europea "Horizon2020" [22].

La tematica inerente la riduzione dei consumi di energia per il riscaldamento delle serre (Task

1.8 del WP1 di progetto), è stata sviluppata mediante l'ideazione e la conduzione di prove sperimentali presso la sede di Pescia del CREA (Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria). L'obiettivo di queste prove sperimentali è stato quello di valutare la sostenibilità economica ed ambientale di un impianto di generazione di calore, applicato al settore della serra, alimentato da fonti di energia alternative al gasolio e al gpl e rinnovabili, nello specifico la pompa di calore. Tale obiettivo è stato perseguito confrontando più tipologie di generatori di calore valutandone le diverse prestazioni, i diversi consumi e quantificando il risparmio energetico che deriva dall'impiego di un sistema di nuova generazione rinnovabile a più alta efficienza come la pompa di calore, piuttosto che generatori di tipo tradizionale a minor efficienza alimentati da combustibile fossile come i bruciatori ad aria e le caldaie a condensazione.

Parte principale dell'innovazione in queste prove sperimentali ha riguardato proprio l'introduzione della tecnologia della pompa di calore nel settore serra; ad oggi infatti tale tecnologia, sebbene nota ed utilizzata comunemente nell'ambito delle costruzioni civili ed industriali, risulta ancora sconosciuta e non diffusa negli impianti serra [23,24].

Con l'obiettivo di integrare quanto già appreso in bibliografia e di strutturare prove sperimentali che rappresentassero un qualcosa di innovativo rispetto a quello realmente presente nel settore serra, è nata l'idea di condurre, preliminarmente alla strutturazione dettagliata delle prove sperimentali, un'indagine sullo stato dell'arte dei sistemi di riscaldamento utilizzati in colture protette all'interno delle principali realtà locali.

Capitolo 1.

Stato dell'arte dei sistemi di riscaldamento utilizzati in colture protette: risultati di un'indagine preliminare

1.1 Descrizione dell'attività

Nei mesi di Marzo e Aprile 2016 sono stati effettuati sopralluoghi in alcune delle più importanti aziende florovivaistiche della Toscana. Da un'indagine sul settore vivaistico ornamentale condotta nel 2016 dalla "Scuola di Agraria" dell'Università degli studi di Firenze (2018), emerge che la Toscana, con il 15% della produzione lorda vendibile florovivaistica nazionale, risulta essere la prima regione d'Italia per la produzione complessiva di fiori e piante ornamentali e contribuisce per il 6% alla formazione della produzione florovivaistica dell'Unione, rivestendo quindi una posizione di rilievo anche a livello europeo [15].

Al fine di rendere le informazioni raccolte durante le visite alle aziende rappresentative di una realtà significativa, è stato scelto di effettuare i sopralluoghi nei due distretti rurali ufficialmente riconosciuti dalla Regione Toscana, quello vivaistico ornamentale di Pistoia e quello floricolo interprovinciale di Lucca-Pistoia e nello specifico nell'area versiliese, considerati culla del vivaismo ornamentale della Toscana.

Sono state quindi selezionate 15 aziende della zona con caratteristiche differenti in termini di dimensioni (ettari di terreno occupati dall'azienda), dislocazione (sempre comunque all'interno dei due distretti rurali individuati) e indirizzo culturale ed è stato pianificato un calendario di sopralluoghi concordato con i responsabili delle aziende scelte. In alcuni casi, per motivi legati all'intensa attività lavorativa in azienda nei mesi di Marzo ed Aprile non è stato possibile effettuare nè visite guidate nè colloqui diretti con i responsabili. Per queste aziende è stato comunque possibile reperire le informazioni necessarie grazie alla disponibilità dei gestori ad effettuare colloqui telefonici e a rispondere (anche tramite e-mail) al questionario redatto per la specifica attività di indagine.

Scopo dell'indagine era quello di ottenere un quadro generale sullo stato dell'arte dei sistemi di riscaldamento utilizzati in colture protette all'interno delle principali realtà locali. Per quadro generale si intende una valutazione sia *oggettiva* della realtà impiantistica presente, sia *soggettiva*, legata alla valutazione della conoscenza e consapevolezza della tipologia di impianti installati nelle proprie aziende da parte dei responsabili nonché della loro conoscenza e sensibilità ai temi del risparmio energetico e dell'inquinamento ambientale.

La valutazione oggettiva è stata condotta attraverso sopralluoghi effettuati dal tecnico incaricato che hanno consentito di acquisire informazioni generali e dati sul tipo di produzione aziendale e conseguentemente sull'eventuale utilizzo di impianti di riscaldamento, sulle tipologie di impianto installate, sui periodi di accensione, sulle temperature desiderate in serra e infine sulla spesa sostenuta per l'acquisto del combustibile.

La valutazione soggettiva è stata ottenuta sostanzialmente da colloqui diretti con i responsabili aziendali e, quando possibile, con il personale addetto alla gestione degli impianti.

I dati raccolti sono stati post-elaborati ed, insieme alle relative considerazioni, sono stati presentati durante l'Open Day Agroener dal tema *“Soluzioni Innovative per la gestione della temperatura nelle colture protette ai fini del risparmio energetico”* tenutosi presso la sede del CREA (Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria) di Pescia il giorno 1 dicembre 2017.

1.2 Sistemi e combustibili più diffusi: risultati tecnico economici

I dati di seguito riportati sono rappresentativi di quella che è stata definita inizialmente “valutazione oggettiva”, quella cioè che nasce dall'indagine visiva effettuata durante i sopralluoghi nelle diverse aziende.

Il 20% delle serre visitate sono “serre fredde” ovvero serre dove non è presente alcun sistema artificiale di riscaldamento e dove l'unica possibilità per aumentare la temperatura all'interno è quella di sfruttare il calore dei raggi solari. Il restante 80% sono invece “serre calde” ovvero serre riscaldate artificialmente quando l'irraggiamento solare e il conseguente effetto serra non sono sufficienti a mantenere le condizioni termiche desiderate (Figura 1). Questo primo dato è strettamente legato al tipo indirizzo colturale dell'azienda. Le aziende che si occupano di floricoltura utilizzano regolarmente gli impianti di riscaldamento per mantenere la temperatura ad un livello ottimale per la coltura; le aziende del settore vivaistico utilizzano invece per lo più serre fredde e, qualora utilizzino serre riscaldate artificialmente, il loro impiego è limitato ad uno sporadico soccorso invernale quando la temperatura arriva a scendere anche sotto lo zero. Ogni azienda sceglie quale tipo di riscaldamento sia più appropriato al proprio indirizzo colturale. Tra le aziende visitate che utilizzano “serre calde”, i quattro quinti di esse utilizza sia sistemi per il riscaldamento dell'aria interna alle serre, sia sistemi di riscaldamento basale su bancali e a pavimento, mentre un quinto di esse non utilizza sistemi di riscaldamento basale. Questi due sistemi di riscaldamento, diversi in termini di funzionamento, struttura dell'impianto e finalità di impiego, vengono realizzati in serre distinte oppure all'interno della stessa serra. In

questo secondo caso i due sistemi possono funzionare alternativamente o contemporaneamente a seconda del tipo di coltura presente al momento. In tutte le aziende visitate il riscaldamento dell'aria all'interno delle serre avviene mediante impianti costituiti da uno o più generatori ad aria installati a pavimento o pensili.

Per quanto riguarda il riscaldamento basale, la distribuzione del vettore termico all'interno dei bancali o a pavimento, avviene per il 95% delle aziende visitate mediante l'utilizzo di sistemi costituiti da una serie di tubazioni poste a distanza ravvicinata all'interno delle quali scorre acqua calda, e per il restante 5%, mediante l'utilizzo di sistemi costituiti da resistenze elettriche. I generatori ad aria vengono alimentati perlopiù da combustibili di origine fossile. In particolare, il 50% delle aziende visitate utilizza impianti alimentati a gasolio, il 25% a metano; il 16,7% affianca ai generatori a gasolio nuovi impianti alimentati a biomassa e soltanto l'8,3% è passato interamente all'utilizzo di biomasse (Figura 1.1). La biomassa, anche se in piccola percentuale, è quindi l'unica, tra le energie rinnovabili disponibili, ad essere utilizzata per produrre energia termica per alimentare i generatori di calore a servizio delle serre.

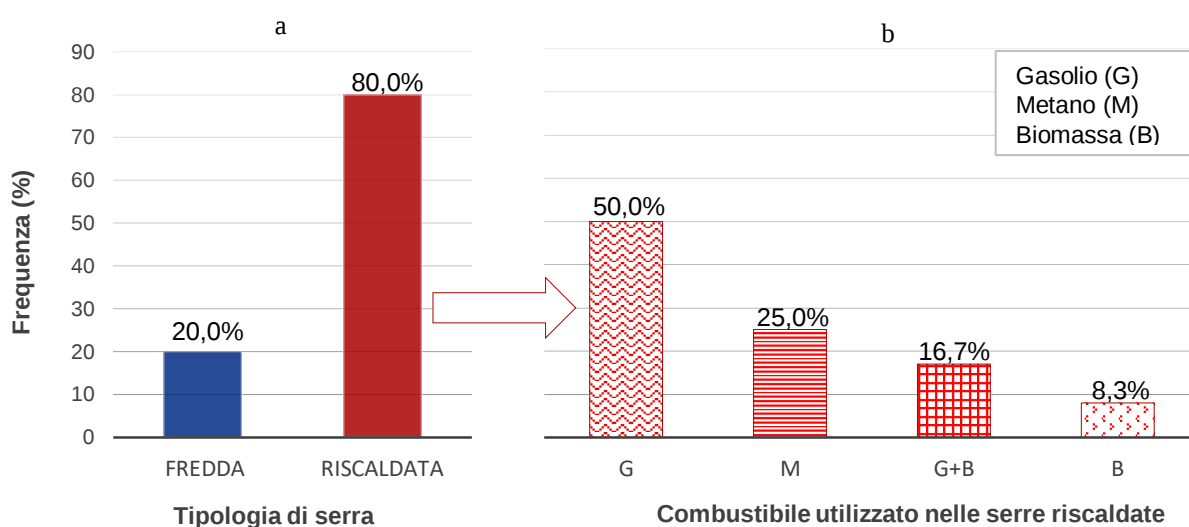


Figura 1.1 Utilizzo dei combustibili alimentanti i generatori a servizio di serre riscaldate artificialmente;
a) Diffusione tipologie di serra; b) Combustibili utilizzati per il riscaldamento delle serre

Mediamente le serre vengono riscaldate artificialmente per un periodo di circa sei mesi; gli impianti vengono accesi infatti intorno alla metà di ottobre e spenti intorno alla metà di aprile. Tutte le serre sono dotate di un sistema di regolazione della temperatura interna realizzato con uno o più termostati ambiente collegati all'impianto principale di riscaldamento.

I termostati vengono impostati sulla temperatura di set-point prescelta e regolano l'accensione

dell'impianto, qualora la temperatura dell'aria ambiente o del substrato (se in presenza di riscaldamento basale) scenda al di sotto della temperatura desiderata, e lo spegnimento dello stesso al raggiungimento della temperatura desiderata. La maggior parte delle aziende visitate, che utilizza gli impianti per il regolare riscaldamento delle serre durante il periodo invernale, utilizza una temperatura di set-point compresa tra 20 e 16 °C; le aziende che utilizzano invece gli impianti soltanto per evitare le gelate notturne invernali utilizzano una temperatura di set-point decisamente più bassa, intorno ai 5 °C. In entrambe le realtà il periodo in cui si registra il maggior utilizzo degli impianti in termini di ore di accensione giornaliere è il mese di gennaio, mentre nei periodi ottobre-novembre e marzo-aprile si registra il minor utilizzo.

Durante i sopralluoghi è emerso che il 26,7% delle aziende ha riservato le coperture di capannoni e parti di terreno non utilizzate per la produzione colturale, all'installazione di impianti solari; di cui il 75% fotovoltaici dedicati alla produzione di energia elettrica, mentre il restante 25% solari termici per la produzione di energia termica (Figura 1.2). Sia la componente elettrica che quella termica prodotta dagli impianti solari viene destinata rispettivamente agli organi elettrici degli impianti di irrigazione e alla produzione di acqua calda sanitaria ad uso esclusivo degli edifici destinati ad accogliere gli uffici amministrativi e/o commerciali dell'azienda. Non vi è quindi nessuna integrazione degli impianti solari con gli impianti destinati al riscaldamento delle serre.

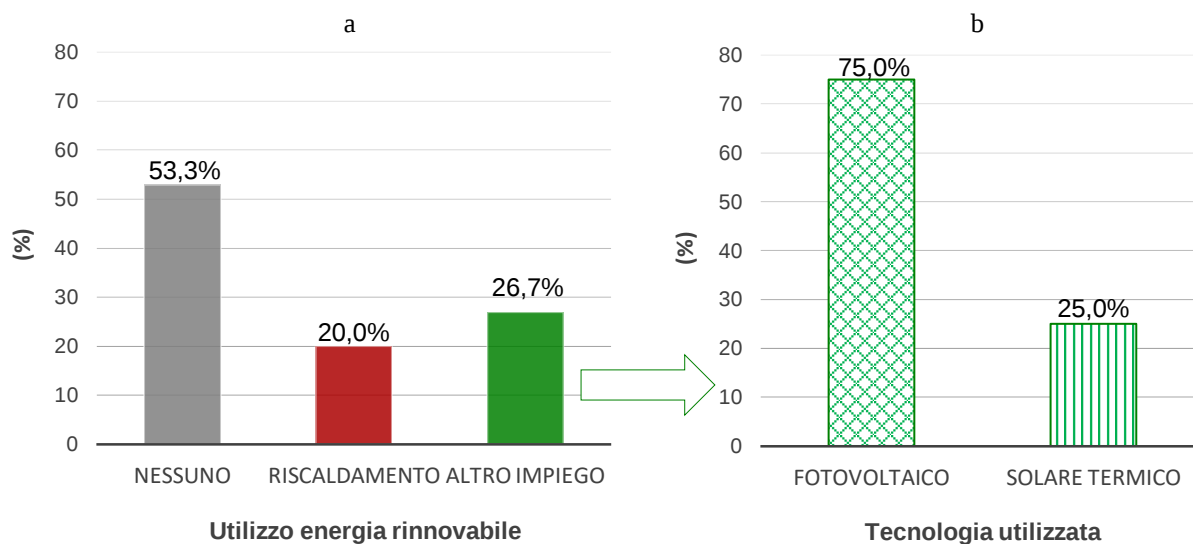


Figura 1.2 Impiego di fonti rinnovabili all'interno delle aziende visitate;
a) Utilizzo di energia rinnovabile; b) Utilizzo delle diverse tecnologie di impianto solare

La spesa media annua per il riscaldamento delle serre per una azienda con una superficie media di circa 5000 m² situata nei due distretti rurali analizzati è pari a circa 100.000€ per chi utilizza esclusivamente gasolio, mentre per chi è passato interamente alla biomassa, si riduce a 75.000€ e a 45.000€ per chi impiega rispettivamente pellet e cippato (Figura 1.3). Le aziende che sono passate dall'impiego di combustibili fossili alla biomassa hanno infatti riscontrato un risparmio del 25% per chi ha optato per il pellet e superiore al 50% della spesa sostenuta per chi ha scelto il cippato.

Non è stato possibile consultare le fatturazioni dei contratti di fornitura dei vari servizi per poter avere un quadro più dettagliato dei consumi e della spesa per l'impiego di ciascun combustibile; tuttavia le indicazioni fornite dai gestori delle varie aziende possono essere considerate attendibili poiché coerenti tra loro ed in linea con dati disponibili in rete [16].



Figura 1.3 Spesa media annua per riscaldamento per azienda di 5000 m² situata nei distretti rurali di Pistoia e di Lucca-Pistoia.

1.3 Conoscere per innovare: l'antitesi innovazione tecnologica - tradizione

Parallelamente alla raccolta di informazioni necessarie ad ottenere un quadro generale oggettivo relativo alle tipologie di impianto installate, ai combustibili e alla spesa sostenuta per il riscaldamento artificiale delle serre nelle zone oggetto dell'indagine, è stata condotta un'indagine soggettiva.

In particolare si è deciso di indagare da una parte le motivazioni che hanno spinto le aziende ad orientarsi verso una determinata scelta impiantistica, dall'altra la conoscenza e la sensibilità

delle aziende alle tematiche del risparmio energetico e dell'inquinamento ambientale derivato dall'impiego massivo di combustibili di origine fossile.

L'antitesi "innovazione tecnologica - tradizione" è profondamente radicata nell'agricoltura; in particolare, nel settore dell'impiantistica per la climatizzazione delle serre e nei sistemi di gestione dell'energia la "tradizione" continua tutt'oggi ad essere punto di riferimento per la maggior parte delle aziende. Non è un caso, infatti, che quasi tutte le aziende visitate abbiano optato per una tipologia di impianto per il riscaldamento delle serre costituita da tradizionali bruciatori ad aria alimentati a gasolio; tecnologia adottata da anni nel settore serricolo e di cui sono noti i vantaggi in termini di costi contenuti per l'installazione e la manutenzione degli impianti e per l'acquisto di gasolio nonché per la facile disponibilità dello stesso combustibile. Tuttavia alcuni importanti aspetti sfavorevoli risultano sconosciuti; in particolare vengono ignorati i bassi rendimenti³ di tali impianti e la loro conseguente bassa efficienza dal punto di vista energetico, la scarsa omogeneità della temperatura all'interno delle serre riscaldate con sistemi ad aria che può comportare un diverso riscaldamento delle colture presenti ed, infine, l'elevato impatto sulla sostenibilità ambientale dovuto all'utilizzo massivo di fonti non rinnovabili come i combustibili fossili. In Italia si stima un consumo di gasolio nel settore delle colture protette, pari a 40-50 Kg/m²/anno nelle aree settentrionali e 5 Kg/m²/anno nelle aree meridionali con un'emissione di CO₂ in atmosfera pari a 0,130-0,260 Kg/m²/giorno nell'ipotesi che il fabbisogno energetico sia fornito dalla combustione diretta di gasolio [17].

Anche qualora vi sia una consapevolezza dei limiti degli impianti tradizionali utilizzati e dell'impatto negativo sull'ambiente dell'impiego di combustibili fossili, il 75% delle aziende continua a rimanere strettamente legato ad una tradizione impiantistica che conosce, sa gestire e che, anche se solo in apparenza, sembra essere per loro quella economicamente più vantaggiosa.

Il 25% delle aziende ha scelto di staccarsi dalla tradizione e di guardare verso l'innovazione tecnologica. Alcuni hanno affrontato questo processo gradualmente affiancando alla certezza dei tradizionali impianti a gasolio, nuovi impianti a biomassa, altri hanno smantellato i vecchi impianti passando completamente alla biomassa. Ma si è trattato veramente di un passo consapevole verso l'innovazione tecnologica? La risposta a questa domanda è stata data direttamente dalle aziende che hanno affermato di aver optato per la sostituzione dei vecchi

³ Per *rendimento di impianto*, si intende il rapporto tra l'energia termica realmente ceduta dall'impianto al sistema da riscaldare e l'energia impiegata dal generatore di calore per produrre energia termica.

impianti con i nuovi a biomassa esclusivamente per i vantaggi economici derivati dagli incentivi del "Conto Termico" per gli interventi di incremento dell'efficienza energetica e per la produzione di energia da fonti rinnovabili previsti dal D.M. 28/12/12.

Abbandonare la tradizione per andare incontro ad un'innovazione tecnologica indotti dalle fortissime aspettative di risparmio dal punto di vista economico è una scelta che, se pur comprensibile in una logica di economia aziendale, potrebbe risultare dannosa per la diffusione di una cultura della sostenibilità consapevole. Infatti alcune delle aziende che, a seguito della campagna di incentivi, hanno scelto impianti a biomassa, ad oggi non rifarebbero la stessa scelta a causa di problemi riscontrati nella gestione, nella manutenzione e nel funzionamento di questi nuovi sistemi impiantistici.

Tali esperienze negative, se male interpretate, possono comportare una sfiducia nei confronti di tutto ciò che è legato all'innovazione tecnologica (si è parlato soltanto di impianti a biomassa perché gli unici impianti "innovativi" rilevati nelle aziende visitate) con conseguente scetticismo nei confronti dei concetti di efficienza, risparmio energetico, sostenibilità, ed ad un rinnovato attaccamento ai sistemi tradizionali.

Occorre però tenere presente che spesso si corre il rischio di escludere o di giudicare sbagliato un determinato sistema impiantistico "innovativo" solo perché in una precedente esperienza non era corretta la sua modalità di impiego e/o gestione e non perché fosse effettivamente sbagliato il tipo di tecnologia utilizzata.

1.4 Collaborazione imprenditore e tecnico per un progetto di fattibilità

Sulla base di quanto è stato possibile dedurre dalle osservazioni emerse durante i colloqui con i responsabili delle aziende è apparso evidente che non si può fare credere ad un qualsiasi imprenditore che voglia investire nelle agroenergie che una mera sostituzione di un impianto tradizionale con un impianto innovativo, solo perché incentivata, sia di per se una scelta corretta per l'azienda e che possa essere considerata un intervento di efficientamento energetico. Un intervento valido per un'azienda ed energeticamente efficiente può essere ottenuto soltanto qualora l'imprenditore della specifica azienda, accompagnato da un tecnico del settore come un Energy Manager, segua un percorso metodologico che si svolga secondo le tappe di un progetto di fattibilità. Tale percorso prevede una continua collaborazione tra Energy Manager e imprenditore che non si conclude con la realizzazione dell'intervento, ma prosegue anche nei periodi successivi con attività di controllo, finalizzate a verificare che i dati attesi in fase di progettazione siano realmente soddisfatti.

Il tecnico come prima attività effettua sopralluoghi mirati all'azienda confrontandosi direttamente con tutto il personale, dal gestore al lavoratore. Entrambi infatti, con informazioni di diverso carattere, contribuiscono a delineare un quadro generale della realtà aziendale. La conoscenza approfondita dell'azienda è indispensabile perché il tecnico possa conoscerne le problematiche e individuarne le necessità. Nella fase successiva il tecnico effettua una diagnosi energetica dell'azienda finalizzata ad individuare dove e come l'energia viene consumata e a valutare con precisione, utilizzando strumenti di misura o consultando le fatture di fornitura dei vari servizi, la quantità e la qualità dell'energia utilizzata per le diverse finalità come riscaldamento, raffrescamento se presente, illuminazione, impianti di irrigazione ect.

Alla diagnosi energetica segue una fase in cui il tecnico individua una o più soluzioni tecnologiche possibili e le propone all'imprenditore rendendolo partecipe e consapevole degli aspetti tecnici, organizzativi, autorizzativi, economici e finanziari di ogni soluzione. In questa fase l'imprenditore, seppur guidato dal tecnico, sceglie consapevolmente l'intervento di efficientamento energetico che più risponde alle necessità della propria azienda. Al termine dello studio di fattibilità si passa poi alla realizzazione dell'intervento.

La finalità di un percorso di fattibilità di questo tipo è sicuramente quella di dare la possibilità all'azienda di realizzare un reale intervento di efficientamento energetico che possa far crescere l'azienda sia dal punto di vista economico che tecnologico, ma parallelamente quella di rendere partecipe l'imprenditore in ogni tappa del processo in modo che possa avere la consapevolezza di che cosa significhi investire sull'efficientamento energetico e sulla sostenibilità ambientale. E' fondamentale che l'imprenditore sia a conoscenza del rapporto costi-benefici dell'intervento che sta finanziando e dei risultati che dovrà attendersi, che conosca a fondo la nuova tecnologia su cui ha investito e che la sappia mantenere e gestire nella maniera corretta secondo le indicazioni dell'Energy Manager.

Alla luce di questa indagine sarebbe auspicabile che si consolidasse nel tempo una collaborazione tra gli imprenditori del settore ed i tecnici esperti nella gestione dell'energia con l'obiettivo comune di diffondere la cultura della sostenibilità anche nel settore delle colture protette. D'altro canto i tecnici dovrebbero imparare a conoscere il settore delle colture protette ed interessarsi alle loro esigenze poiché ad oggi questo, se confrontato ad esempio con il mondo dell'edilizia, è un settore dove ancora c'è molto da fare, dove la potenzialità di sviluppo e di miglioramento è realmente elevata e non può continuare ad essere trascurata. E' indispensabile che i tecnici effettuino campagne divulgative sulle tematiche precedentemente esposte, informando in maniera più pratica, scendendo in campo per conquistare la fiducia degli

imprenditori che, soltanto in questo modo, cominceranno a guardare positivamente verso l'innovazione tecnologica ed a investire consapevolmente sulla gestione dell'energia nelle proprie aziende.

In accordo con il tema del risparmio energetico previsto dal progetto Agroener e attraverso le informazioni acquisite durante l'indagine sopra descritta in merito alle più diffuse tecnologie di riscaldamento e loro applicazione nel settore serricolo locale, si va a strutturare la prova sperimentale dal nome BasiCal condotta nel biennio 2016-2018 presso le strutture del Crea, sede di Pescia.

Parte dei risultati presentati nel presente capitolo sono stati pubblicati nell'articolo: "Terrosi C. Riscaldamento colture protette: stato dell'arte e prospettive. *Il floricultore* 2018, 55(7-8), pp. 44-47" [18].

Capitolo 2.

BasiCal: un sistema innovativo di riscaldamento

2.1 Idea progettuale e obiettivi

La prova BasiCal nasce dalla volontà di sperimentare un sistema di riscaldamento diverso, per la tecnologia impiantistica scelta e per la sua applicazione, da quelli maggiormente diffusi nel comparto serricolo locale.

In accordo con quanto emerso dall'indagine condotta nelle aziende florovivaistiche locali e con il WP1 del progetto Agroener inerente la riduzione dei consumi di energia per il riscaldamento delle serre [21], presso le strutture della sede del Crea di Piacenza, è stato progettato, realizzato e sperimentato un innovativo impianto di riscaldamento basale su bancali [29]. L'innovazione ha riguardato il sistema di distribuzione del vettore termico e dei generatori di calore alimentanti le linee dell'impianto basale nonché la sua applicazione.

La tecnologia che utilizza impianti idraulici per il riscaldamento basale delle colture è assai diffusa. Dall'indagine preliminare condotta è emerso infatti che il 63% delle aziende florovivaistiche locali utilizza impianti di riscaldamento basale a terra o su bancali. Lo schema impiantistico più diffuso nel territorio locale, estendibile anche a quello nazionale, prevede l'utilizzo di tubazioni in PE (polietilene) come sistema di distribuzione del vettore termico (acqua calda), e caldaie di tipo tradizionale, caratterizzate da bassi rendimenti, come sistema di generazione.

Negli anni 2008-2009 presso la sede del Crea di Piacenza, all'interno del progetto di ricerca nazionale Florener (Florovivaismo: Logistica e Risparmio Energetico), è stato sperimentato un innovativo sistema di riscaldamento basale costituito da tubazioni coassiali con flussi idraulici controcorrente per la distribuzione del vettore termico (Appendice A) a confronto con il sistema di tipo tradizionale maggiormente diffuso nelle aziende [30]. Sebbene l'utilizzo di tubazioni coassiali sia largamente diffuso [31,32] come nei circuiti di refrigerazione [33], nel trasporto di gas tossici o pericolosi [34], nei sistemi di controllo servo-pneumatici [35], nei problemi di gestione della contaminazione dell'aria [36] e nei sistemi termoisolanti [37], nel progetto Florener è stato impiegato un impianto a tubazioni coassiali specifico, brevettato per l'utilizzo in agricoltura [30, 38-40].

Il confronto tra il sistema coassiale e il sistema tradizionale, ha evidenziato la significativa maggior efficienza del sistema innovativo in termini di risparmio di energia e di omogeneità nel riscaldamento del terreno di coltura [41-44].

Avendo la possibilità di utilizzare un sistema di riscaldamento basale innovativo, è stato necessario riflettere su quale potesse essere una sua applicazione altrettanto innovativa. E' nata quindi l'idea di sperimentare il riscaldamento basale in colture nelle quali tradizionalmente questa tecnologia non viene impiegata, valutandone la fattibilità, gli effetti sulla produzione e sui consumi di energia.

Questo nell'ottica di massimizzazione dell'utilizzo del riscaldamento basale da parte di un'azienda o di un agricoltore che volesse investire su un impianto basale alternativo a quello comunemente diffuso.

L'obiettivo principale di BasiCal è quello di valutare la possibilità di coltivare su bancali una coltura dalla canopy piuttosto contenuta come il basilico, riscaldando soltanto il volume d'aria intorno alla canopy piuttosto che l'intero volume d'aria contenuto nella serra (Figura 2.1).

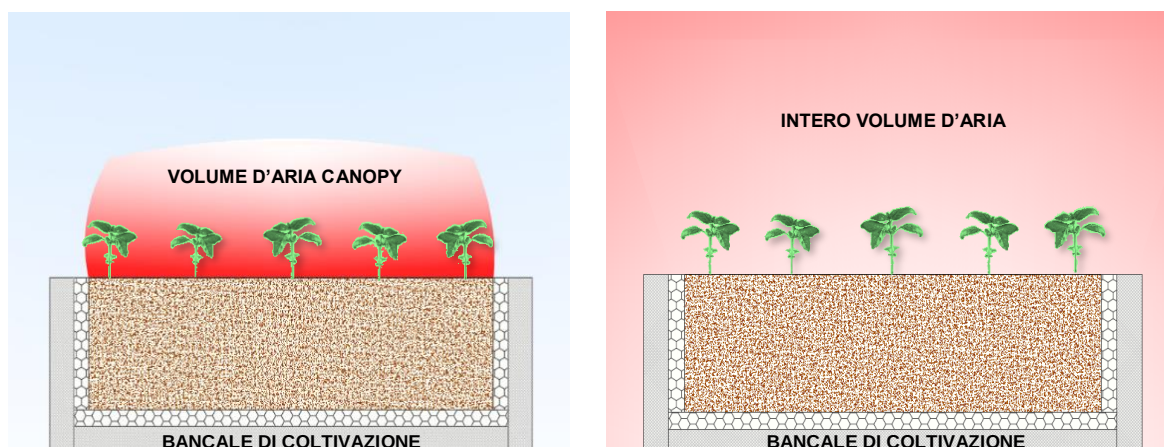


Figura 2.1 Rappresentazione dei due diversi volumi d'aria riscaldati durante la sperimentazione.

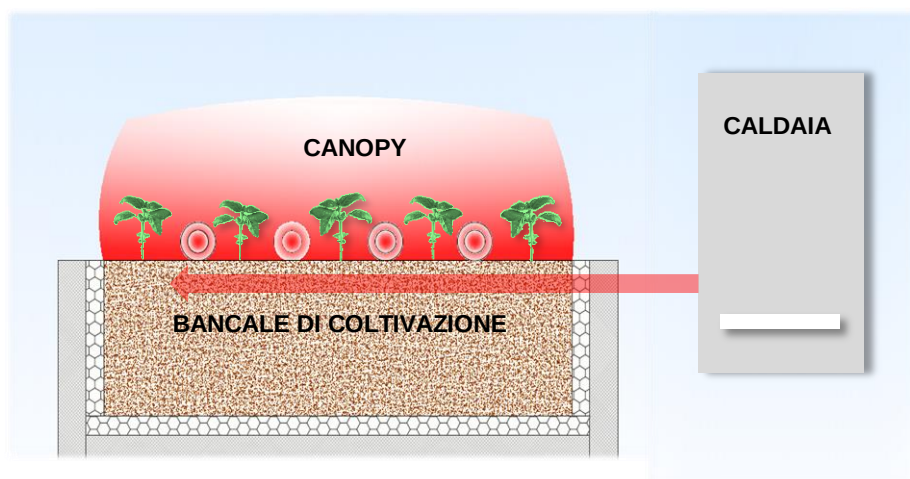
La canopy viene riscaldata utilizzando il riscaldamento basale coassiale con tubazioni posizionate sulla superficie del substrato di crescita ed alimentate una linea con caldaia a condensazione (generatore tradizionale a combustibile fossile), un'altra con pompa di calore aria acqua (generatore innovativo a fonti rinnovabili). Il riscaldamento del volume d'aria dell'intera serra viene effettuato utilizzando un tradizionale bruciatore ad aria a basso rendimento.

La fattibilità o meno di quanto espresso nell'obiettivo principale si determina con il perseguire di altri due obiettivi, uno legato all'aspetto produttivo, l'altro a quello energetico. Il primo sotto obiettivo è quello di confrontare le produzioni ottenute con le varie modalità di riscaldamento sperimentate, in termini quantitativi e qualitativi; il secondo è quello di determinare l'indice di

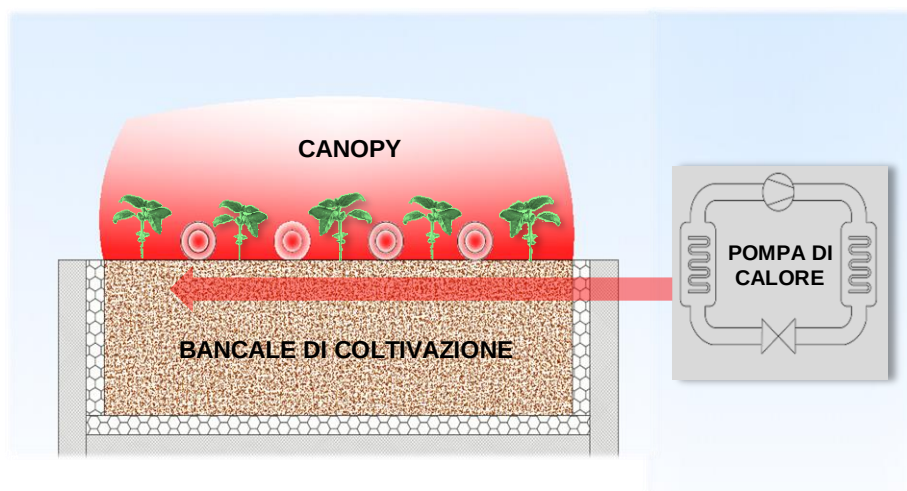
efficienza nell'uso dell'energia in termini di grammi di peso fresco prodotto per caloria fornita per ciascuno dei sistemi di riscaldamento sperimentati (Figura 2.2):

- a) riscaldamento della canopy con basale e caldaia a condensazione;
- b) riscaldamento della canopy con basale e pompa di calore;
- c) riscaldamento dell'intero volume di serra con bruciatore ad aria.

a) Riscaldamento della canopy con tubazioni coassiali alimentate da caldaia a condensazione



b) Riscaldamento della canopy con tubazioni coassiali alimentate da pompa di calore



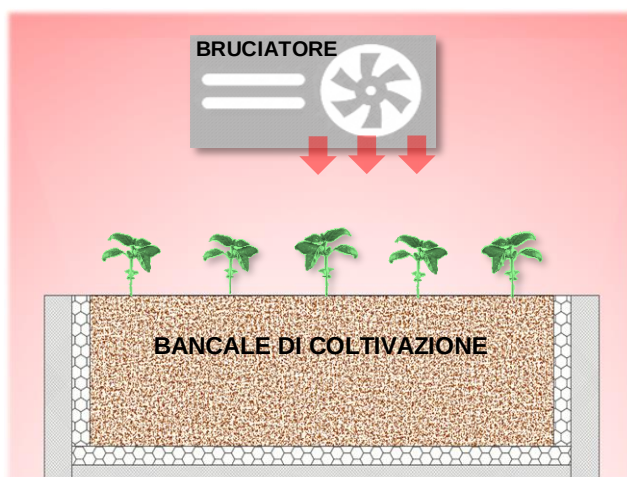
c) Riscaldamento dell'intero volume di serra con bruciatore ad aria

Figura 2.2 I tre sistemi di riscaldamento messi a confronto durante la sperimentazione.

Nasce così la prova BasiCal: dal progetto Agroener con l'impiego di energie rinnovabili, attraverso l'indagine preliminare nelle aziende locali, sperimentando un sistema innovativo di riscaldamento basale a tubi coassiali applicato in maniera innovativa.

La prova è stata condotta nei mesi di febbraio e marzo del 2017 (BasiCal 1.0) e replicata l'anno successivo nello stesso periodo (BasiCal 2.0).

Capitolo 3.

Primo anno di sperimentazione: BasiCal 1.0

La prova BasiCal 1.0 è stata condotta all'interno di una delle serre sperimentali del Crea di Pescia nel trimestre Gennaio-Marzo dell'anno 2017. I tre mesi di sperimentazione sono stati preceduti da un periodo di preparazione nel quale sono state condotte attività di allestimento della serra, installazione e regolazione degli impianti di riscaldamento e di irrigazione, preparazione del substrato di crescita e semina delle piantine di basilico in camera di crescita. Durante il primo anno di sperimentazione sono stati messi a confronto due dei tre sistemi di riscaldamento disponibili: l'impianto basale a tubazioni coassiali alimentato da caldaia a condensazione (Figura 3.1a) e l'impianto tradizionale con bruciatore ad aria calda (Figura 3.1b). L'impianto basale alimentato da pompa di calore è stato sperimentato e messo a confronto con gli altri due durante il secondo anno di sperimentazione (Capitolo 4).

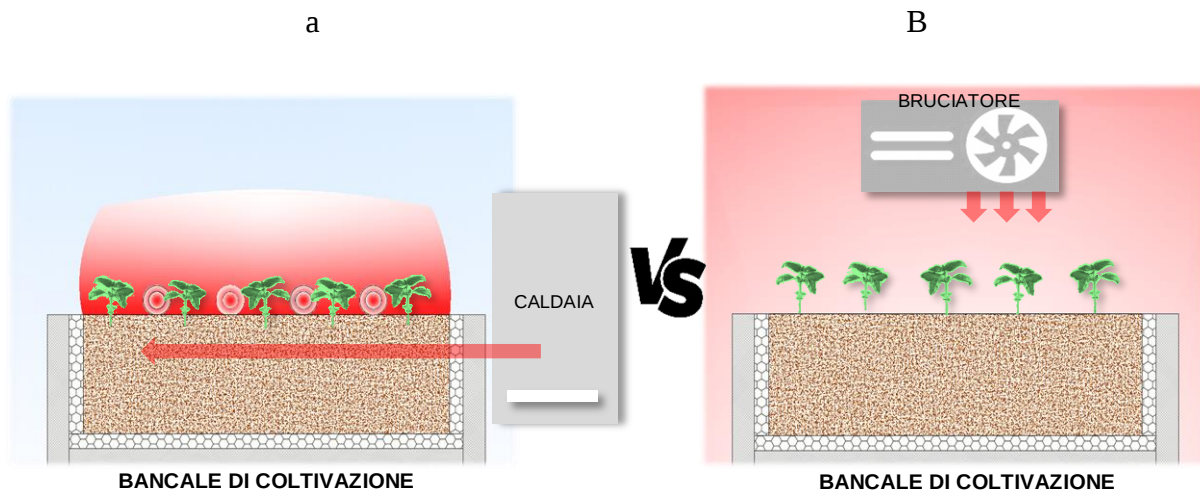


Figura 3.1 I due impianti a confronto nel primo anno di sperimentazione;
 a) impianto basale a tubazioni coassiali alimentato da caldaia a condensazione;
 b) impianto tradizionale con bruciatore ad aria calda.

3.1 Materiali e metodi

3.1.1 Descrizione della serra utilizzata per la prova sperimentale

La serra dove è stata condotta la prova fa parte delle strutture sperimentali di proprietà del Crea ed è situata negli spazi pertinenti alla sede di Pescia, in via dei Fiori n.8 (43° 53' 13'' N - 10° 41' 12'' E). La serra, di superficie in pianta pari a 400 m² e altezza al colmo pari a 3,50 m, è orientata longitudinalmente lungo l'asse nord/est - sud/ovest ed è costituita da una struttura

portante in ferro zincato, copertura in lastre di polycarbonato e laterali in teli di polietilene. Confina con spazi aperti a nord, sud ed ovest e con un'altra serra, adiacente ad essa, a est (Figura 3.2). Durante la sperimentazione la copertura e i laterali della serra adiacente sono stati mantenuti sempre aperti per ricreare le stesse condizioni termoigrometriche presenti sugli altri tre lati della serra di prova, confinanti con l'esterno.



Figura 3.2 La serra dove è stata condotta la sperimentazione.

Per poter condurre l'attività di comparazione dei due sistemi di riscaldamento, la serra è stata suddivisa, utilizzando teli in polietilene dello spessore di 2 mm, in due zone ugualmente dimensionate e attrezzate (superficie e volume di ogni zona pari a 100 m^2 e 300 m^3), diverse soltanto per il tipo di impianto di riscaldamento installato nel seguito denominate "Lato Aria" e "Lato Basale".

In ogni zona sono stati allestiti due bancali in cemento per la messa a dimora delle piantine di basilico riempiti con un substrato di coltivazione costituito da una miscela di torba e perlite 50:50 V/V. Ogni bancale, di dimensioni pari a $7 \times 0,80 \times 0,30 \text{ m}$ (lunghezza, larghezza, altezza) e sollevato da terra di circa 0,12 m, è stato rivestito internamente con pannelli isolanti di polisterolo dello spessore di 30 mm. Il pannello posizionato sul fondo del bancale è stato adeguatamente forato per consentire il corretto drenaggio dell'acqua di irrigazione (Figura 3.3).

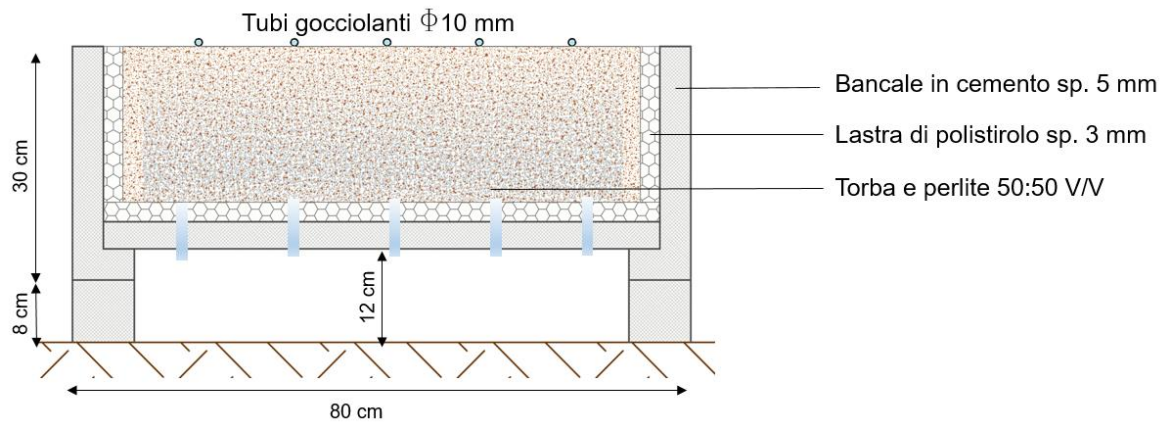


Figura 3.3 Sezione del banco tipo.

3.1.2 Strumenti di misura dei parametri termoigrometrici dell'aria e del substrato

Le due zone sono state dotate di una serie di strumenti di misura delle principali grandezze termoigrometriche dell'aria e del substrato di coltivazione nei bancali e dell'irraggiamento solare. Nello specifico ogni zona è stata dotata di (Figure 3.4-3.5):

n°2 datalogger del tipo Testo 175 T2 a due canali con sensore di temperatura integrato e sonda esterna fissa con manicotto in alluminio NTC per registrare:

- la temperatura dell'aria (T_a) ad una distanza di 5 cm dalla superficie del substrato di coltivazione misurata dal sensore di temperatura interno allo strumento;
- la temperatura del substrato (T_s) di coltivazione ad una profondità di 5 cm misurata dalla sonda NTC esterna allo strumento.

n°1 datalogger del tipo Testo 175 T1 a un canale con sensore di temperatura integrato per registrare:

- la temperatura dell'aria (T_a) ad una distanza di 100 cm dal piano di calpestio misurata dal sensore di temperatura interno allo strumento.

n°1 datalogger del tipo Decagon EM 50 collegato a tre sonde esterne per registrare:

- la temperatura (T_a) e l'umidità (H_a) dell'aria a 200 cm dal piano di calpestio misurata dalla sonda VP-3 Humidity-Temperature;
- il PAR (photosynthetically active) misurato dalla sonda QSO-S PAR Photon Flux;
- l'umidità del substrato (H_s) di coltivazione misurata dal sensore Decagon ECH₂O EC-5.

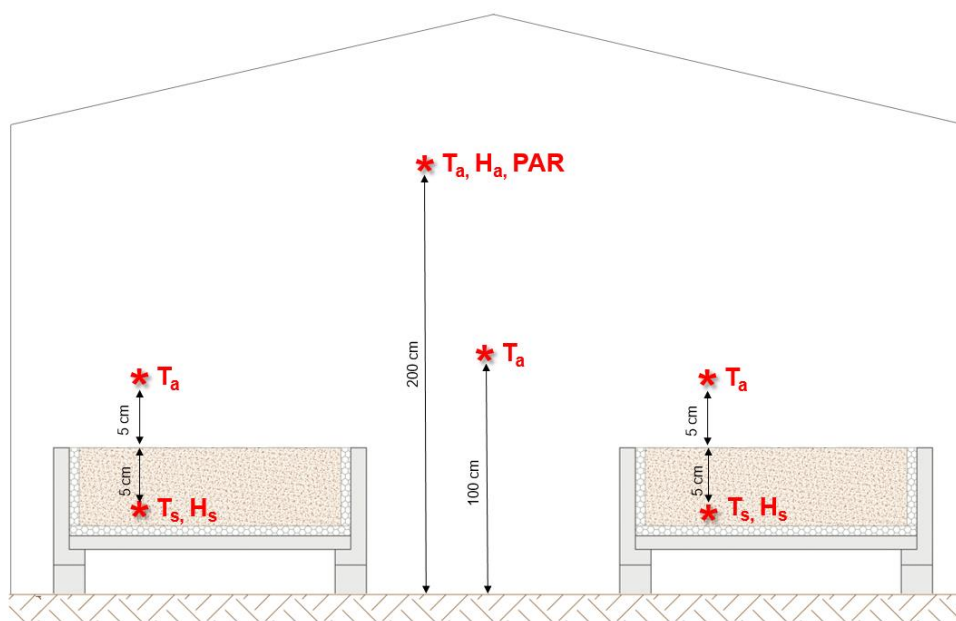


Figura 3.4 Punti di misura dei parametri termoigrometrici dell'aria e del substrato e dell'irraggiamento solare.



Testo 175 T2 a due canali e sonda esterna fissa NTC



Decagon EM 50



VP-3 Humidity-Temperature



QSO-S PAR Photon Flux



Decagon ECH₂O EC-5

Figura 3.5 Strumenti di misura utilizzati.

Per tutta la durata della prova, le misure dei parametri termoigrometrici interni sono state acquisite con intervallo di 5 minuti e raccolte in un database Excel appositamente creato. I dati

relativi alla temperatura media giornaliera dell'aria all'esterno della serra sono stati reperiti nel database dell'applicazione 3B Meteo per la località di Pescia.

E' stata inoltre installata una termocamera ad infrarossi, *Flir ThermaCam S Series*, per la valutazione qualitativa dell'andamento della temperatura superficiale del substrato, delle piante di basilico e delle tubazioni coassiali, quest'ultima sola per la sola zona "Lato Basale".

Le caratteristiche tecniche della termocamera (camera con obiettivo a focale fissa) e la limitata distanza tra il bancale e il punto dove è stato possibile posizionare la macchina, hanno permesso di acquisire immagini termografiche relative soltanto ad un'area di bancale di circa 1 m². La termocamera è stata agganciata ad apposito sostegno ad una distanza di circa 2,30 m dalla superficie del bancale (Figura 3.6).

Avendo a disposizione una sola termocamera ma dovendo acquisire immagini termografiche in entrambe le zone oggetto di sperimentazione ("Lato Basale" e "Lato Aria"), è stato necessario spostare quotidianamente lo strumento da una zona all'altra secondo uno schema prestabilito (Figura 3.7).



Figura 3.6 Posizionamento della termocamera sopra il bancale e dimensione area acquisizione.

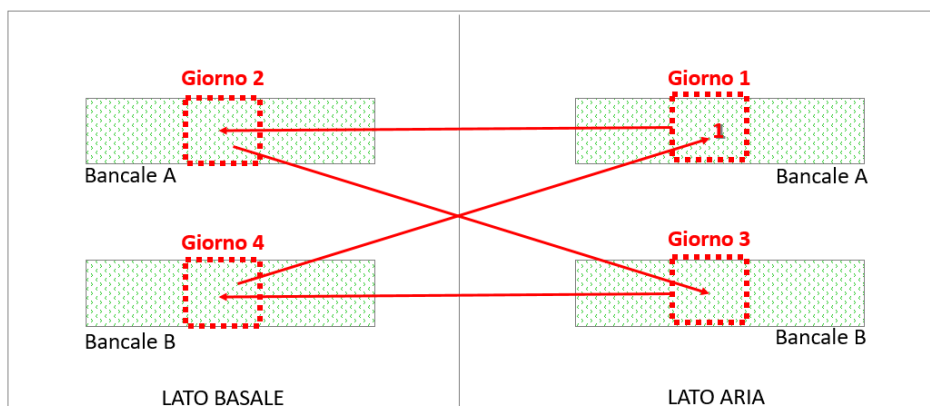


Figura 3.7 Schema acquisizione immagini termografiche.

Le immagini termografiche sono state acquisite con un intervallo di 10 minuti e visualizzate in tempo reale su apposito pc collegato alla termocamera, per un totale di 4608 immagini registrate (Figura 3.8).

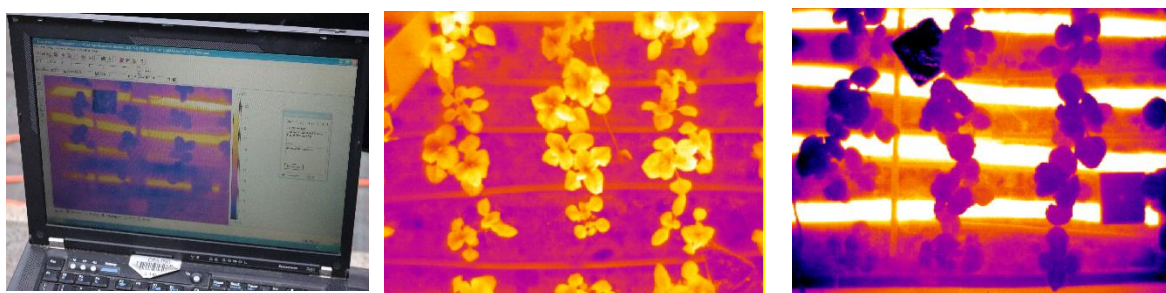


Figura 3.8 Esempio di visualizzazione immagini termografiche al pc.

Prima della sperimentazione tutti gli strumenti di misura (acquisitori e sonde) sono stati intercalibrati in laboratorio all'interno di cella climatica mantenuta a temperatura e umidità costanti. Questa procedura ha permesso di minimizzare gli errori sistematici strumentali e di semplificare le elaborazioni dei dati.

3.1.3 Impianto di irrigazione

Tutti i banchali sono stati dotati di un impianto di microirrigazione a tubi gocciolanti in polietilene di diametro esterno 10 mm, portata 2 l/h e passo 30 cm. Sulla superficie del substrato di ciascun bancale sono stati disposti cinque tubi gocciolanti ad una distanza di circa 12 cm l'uno dall'altro in modo da garantire un'irrigazione uniforme del substrato (Figura 3.3). La

gestione irrigua è stata effettuata mediante elettrovalvola collegata ad un timer programmabile fino a sette interventi giornalieri. Le tubazioni gocciolanti sono state alimentate da una cisterna della capacità di 1000 l dotata di sistema di contabilizzazione dell'acqua in ingresso e in uscita. La cisterna è stata utilizzata per la distribuzione dei fertilizzanti insieme all'acqua di irrigazione. Per il mantenimento delle medesime condizioni di umidità dei substrati nelle due zone di sperimentazione, sono stati monitorati quotidianamente i valori registrati dai datalogger posizionati a circa 5 cm di profondità. Conseguentemente sono stati regolati gli interventi irrigui in frequenza e volume per mantenere un VWC (volumetric water content) nel substrato pari a 0,30-0,35 m³/m³. Tale valore deriva da prove sperimentali effettuate precedentemente in laboratorio volte a determinare la capacità di campo del substrato tramite curva di ritenzione idrica.

3.1.4 Impianto di riscaldamento

Le due zone denominate “Lato Aria” e “Lato Basale” create all'interno della serra sperimentale differiscono soltanto per la modalità di riscaldamento delle piante di basilico e per la tipologia di impianto utilizzata a tal fine. Mentre infatti le piante di basilico nei bancali “Lato Aria” sono state coltivate riscaldando l'intero volume della zona con un impianto ad aria di tipo tradizionale, quelle nei bancali “Lato Basale” riscaldando soltanto il volume d'aria intorno alla canopy con un innovativo impianto basale a tubazioni coassiali alimentato da caldaia a condensazione (Figura 3.9). Il “Lato Aria” è stato dotato di un impianto ad aria di tipo tradizionale costituito da un bruciatore termoventilato mobile a pavimento del tipo Gentili Junior 85 SP di potenza pari a 118 kW e rendimento del 91%, alimentato a gasolio (Figura 3.10 a). Il “Lato Basale” è invece stato dotato di un impianto basale costituito da una caldaia a condensazione del tipo Ferroli Econcept 15A di potenza pari a 15 kW e rendimento del 98% alimentata a gpl (Figura 3.10 b). Il sistema di distribuzione dell'acqua calda è stato realizzato con 4 linee di tubazioni coassiali in PE (polietilene) di diametro pari a 16 cm il tubo interno e 23 cm il tubo esterno, posizionate sulla superficie del substrato dei due bancali ad una distanza di circa 12 cm. Lo schema di posa delle tubazioni coassiali è stato progettato per consentire una corretta densità colturale e una distribuzione uniforme del riscaldamento. Il monitoraggio dei consumi di entrambi gli impianti di riscaldamento è stato effettuato quotidianamente alla solita ora del giorno mediante lettura di due contatori dedicati: uno relativo ai consumi di gasolio installato nel “Lato Aria”, l'altro ai consumi di gpl installato nel “Lato Basale”.

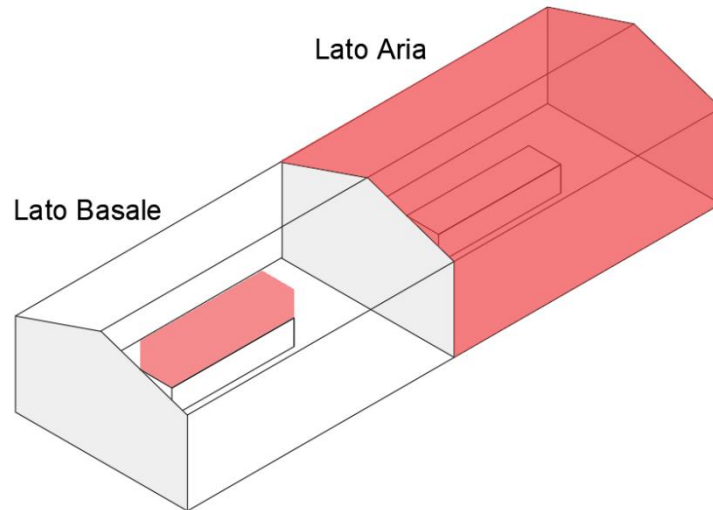


Figura 3.9 Rappresentazione dei due volumi di aria riscaldati: Lato Aria con impianto tradizionale con bruciatore ad aria; Lato Basale con impianto basale coassiale a tubazioni coassiali.

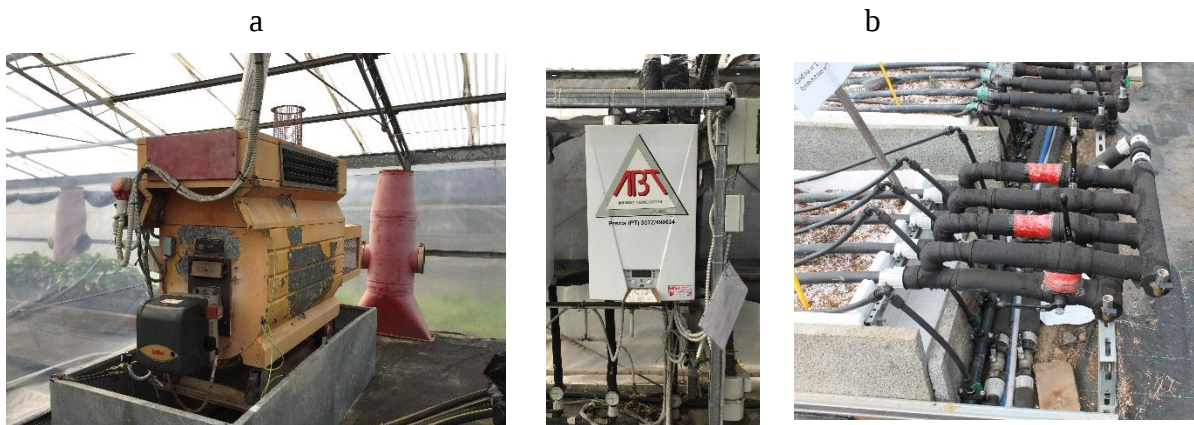


Figura 3.10 Impianti di riscaldamento a confronto;

a) Bruciatore termoventilato “Lato Aria”; b) Caldaia a condensazione “Lato Basale”

Avendo deciso di coltivare le piante di basilico ad una temperatura dell'aria della canopy intorno a 15 °C è stato necessario posizionare adeguatamente i termostati dei due impianti per ottenere e mantenere questo valore di setpoint. Questa fase è risultata in assoluto la più complessa a causa del diverso modo di riscaldare dei due impianti. E' necessario a questo punto fare alcune importanti considerazioni.

Il termostato è l'organo che accende e spegne il generatore di calore al raggiungimento della temperatura desiderata. Nel “Lato Aria” l'aria calda in movimento che esce dal bruciatore va a riscaldare per convezione l'intero volume di serra generando una condizione di temperatura più o meno costante in tutto il volume riscaldato e conseguentemente anche nella canopy il cui

volume è limitato a quello occupato da una pianta di basilico la cui altezza massima raggiungibile è solitamente pari a 50 cm. Nel “Lato Basale” invece, allontanandosi dalla sorgente calda rappresentata dalle tubazioni poggiate sul substrato, la temperatura dell’aria diminuisce comportando inevitabilmente nella canopy un gradiente di temperatura non presente invece nella tesi “Lato Aria” (Figura 3.11).

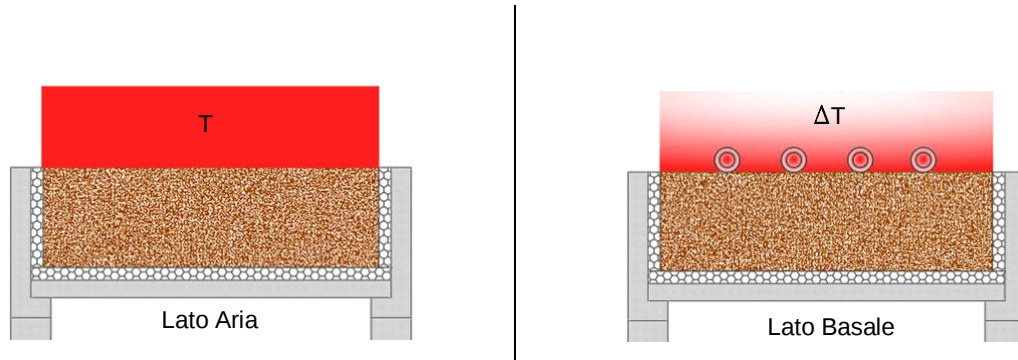


Figura 3.11 Diversa distribuzione della temperatura dell’aria nella canopy riscaldata con impianto ad aria e con basale.

Questo significa che nel “Lato Aria”, in qualsiasi punto della canopy venga posizionato il termostato (T), la temperatura della canopy verrà mantenuta pari a 15 °C.

Contrariamente, nel “Lato Basale” la posizione del termostato comporterà che le zone comprese tra la sorgente di calore e il termostato stesso registreranno temperature maggiori di 15°C, mentre quelle sopra il termostato temperature inferiori (figura 3.12)

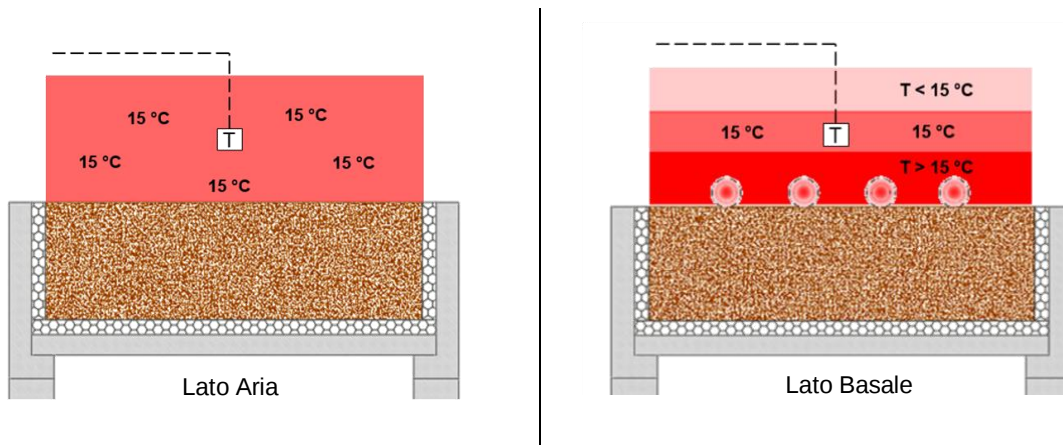


Figura 3.12 Distribuzione della temperatura dell’aria nella canopy in funzione della posizione del termostato nel “Lato Aria” e nel “Lato Basale”.

Mentre quindi parlare di temperatura media nel “Lato Aria” significa riferirsi ad una temperatura mantenuta tale nel tempo in tutto il volume della canopy, parlare di temperatura

media nel “Lato Basale” significa riferirsi ad una temperatura, mantenuta nel tempo, ma registrata soltanto ad una certa distanza dalla sorgente calda.

Per condurre la sperimentazione è stato quindi deciso di posizionare il termostato dell’impianto basale ad una distanza di circa 5 cm dalle tubazioni calde in modo da ridurre il più possibile il gradiente di temperatura nel volume di canopy compreso tra le tubazioni e il termostato con lo scopo di garantire alle piante di basilico, almeno nel primo periodo di sviluppo, le stesse condizioni termiche di crescita delle piante coltivate nella tesi riscaldata ad aria (Figura 3.13). Si osservi quindi che nel seguito del lavoro, il termine “temperatura della canopy” sarà riferito alla temperatura media misurata a 5 cm dalla superficie del substrato di coltivazione.

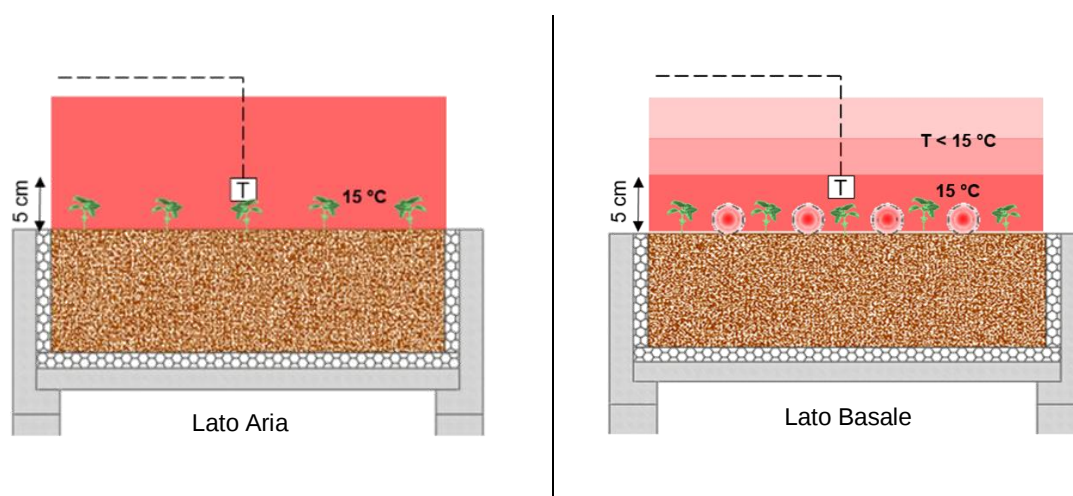


Figura 3.13 Posizionamento del termostato e condizioni di crescita durante la sperimentazione.

La mancanza di un numero di datalogger sufficiente, non ha consentito di misurare, durante il primo anno di sperimentazione, la temperatura dell’aria della canopy a diverse distanze dalle tubazioni calde e determinare la “distanza di influenza del riscaldamento” ovvero la distanza alla quale la temperatura dell’aria della canopy non risente del calore proveniente dalle tubazioni calde. Tale aspetto è stato sviluppato durante il secondo anno di sperimentazione.

Per il “Lato Basale” è stato necessario effettuare un’ulteriore operazione di settaggio e di regolazione a livello di caldaia. In questo tipo di impianto infatti il calore viene ceduto all’aria per irraggiamento dalla superficie delle tubazioni all’interno delle quali scorre l’acqua calda proveniente dalla caldaia. Il raggiungimento e il mantenimento della temperatura di 15 °C desiderata è quindi dipendente dalla temperatura dell’acqua all’interno delle tubazioni che a sua volta dipende dalla regolazione che viene effettuata in caldaia. Le moderne caldaie a condensazione sono collegate ad una sonda climatica posizionata all’esterno (Figura 3.14), che

permette di regolare la temperatura dell'acqua di mandata in funzione della temperatura dell'aria esterna secondo una curva di compensazione climatica scelta dall'utente e impostabile direttamente in caldaia. Variando la curva di compensazione, varia la temperatura dell'acqua di mandata in funzione della temperatura dell'aria esterna.

Per raggiungere e mantenere la temperatura di 15 °C nella canopy durante tutto il periodo di sperimentazione è stata impostata in caldaia la curva di *compensazione 10* con temperatura dell'acqua massima raggiungibile impostata a 55 °C (Figura 3.14).

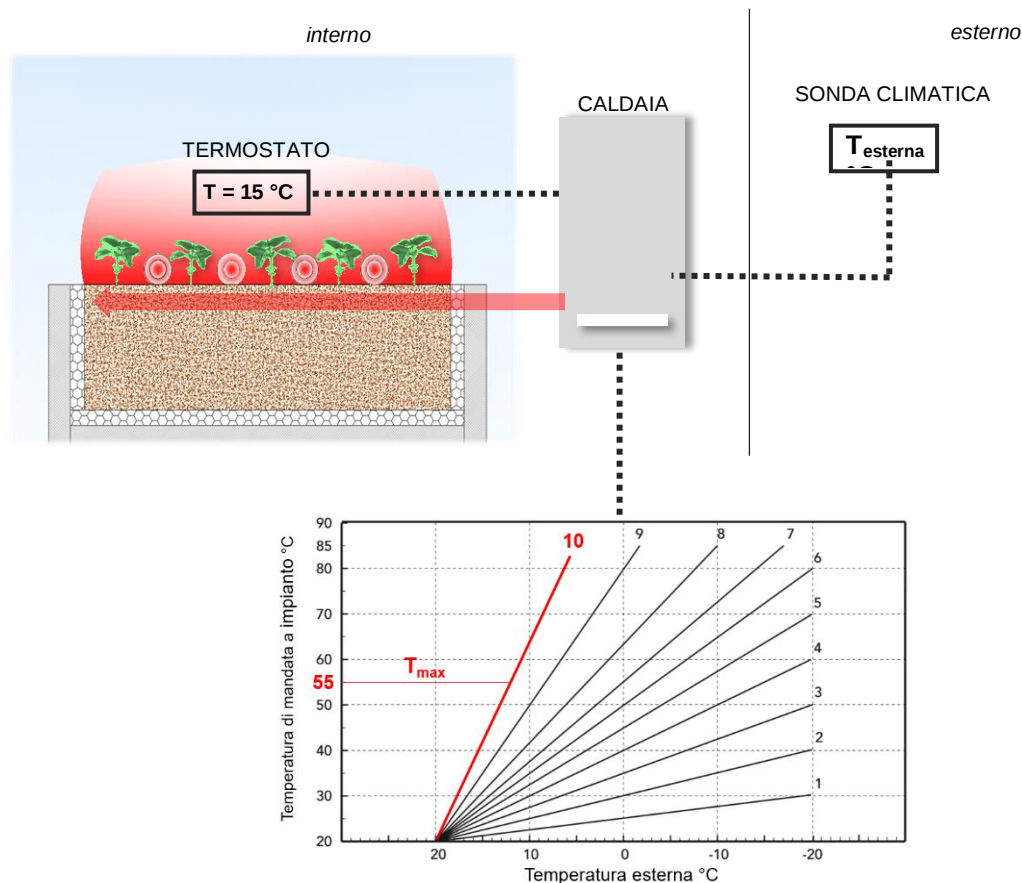


Figura 3.14 Termoregolazione impianto “Lato Basale” con termostato e curve di compensazione climatica.

3.1.5 Materiale vegetale e condizioni di crescita

Parallelamente alle attività di allestimento delle due zone e di installazione degli impianti di riscaldamento effettuate in serra, sono state condotte in laboratorio, una serie di attività finalizzate alla preparazione delle piantine di basilico e della soluzione nutritiva da somministrare attraverso fertirrigazione durante il periodo di sperimentazione.

Le piante di basilico (*Ocimum basilicum*, L.) sono state seminate in data 12.01.2017 in n°7 plateau da 104 fori ciascuno riempiti con un substrato a base di torba (20-40 mm) senza aggiunta di concimi. Dopo la semina i semi sono stati ricoperti con uno strato di vermiculite in modo da rendere più semplici le operazioni di irrigazione e per mantenere le condizioni di umidità idonee per la germinazione. Effettuata la semina, i plateau sono stati trasferiti e mantenuti per quattro settimane in camera di crescita appositamente impostata per mantenere un'intensità luminosa di $1000 \mu\text{mol m}^2 \text{sec}^{-1}$ PAR, temperatura costante di 25°C , umidità relativa dell'80% e fotoperiodo di 14 ore (Figura 3.15).

L'irrigazione è stata effettuata in modo da garantire alle piantine ottimali condizioni di crescita. Durante ogni intervento irriguo è stata somministrata attraverso fertirrigazione una soluzione nutritiva standard di Hoagland diluita al 50% [45] riportata in Tabella 3.1.

SOLUZIONE STANDARD DI HOAGLAND			
Azoto nitrico	7,0 mM	Ferro	22,5 uM
Azoto ammoniacale	0,5 mM	Boro	22,5 uM
Fosforo	0,5 mM	Rame	0,5 uM
Potassio	3,0 mM	Zinco	0,5 uM
Calcio	2,0 mM	Manganese	5,0 uM
Magnesio	1,0 mM	Molibdeno	0,5 uM
Zolfo	1,0 mM		

Tabella 3.1 Composizione soluzione nutritiva standard di Hoagland.

Per il controllo delle fitopatie è stato seguito un normale protocollo intervenendo, quando necessario, con opportuni trattamenti.

In data 24.01.2017 è stato effettuato il diradamento eliminando le piantine con le foglie più deboli per favorire la crescita di quelle più robuste (Figura 3.15).



Figura 3.15 Sviluppo delle plantule nella camera di crescita.

In data 06.02.2017, le piantine di basilico sono state trasferite in serra e messe a dimora a blocchi completamente randomizzati e per un totale di 520 piante, nei quattro bancali precedentemente preparati, due per il “Lato Aria”, due per il “Lato Basale”. In ogni bancale sono state trapiantate 130 piantine suddivise in 2 repliche da 65 piantine ciascuna. In ogni replica le piantine sono state disposte secondo una griglia a maglie rettangolari di dimensioni 26 x 13 cm (Figura 3.16).

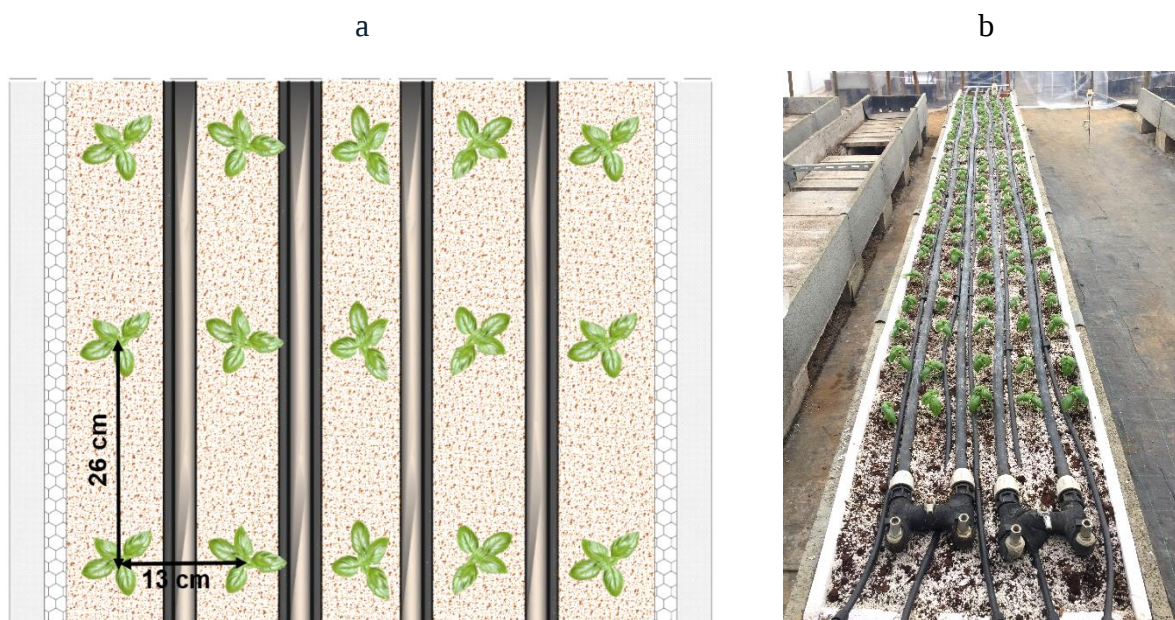


Figura 3.16 Trapianto nei bancali;

a) schema della disposizione delle piantine; b) vista d'insieme di bancale tipo

La fase sperimentale ha avuto inizio il giorno successivo al trapianto delle piantine di basilico nei bancali (7 febbraio 2017) e si è conclusa dopo due cicli colturali della durata complessiva di 45 giorni, con l'estirpazione delle piante (23 marzo 2017). Sono stati effettuati quindi due sfalci, uno alla fine del primo ciclo (9 marzo 2017), l'altro prima dell'estirpazione finale (23 marzo 2017).

Durante i quarantacinque gironi di sperimentazione in serra le piantine di basilico sono state concimate attraverso fertirrigazione con una soluzione nutritiva calcolata utilizzando il software freeware *Sol-Nutri 1.3* sviluppato presso il *Dipartimento di Scienze Agrarie, Alimentari e Agroambientali* dell'Università di Pisa. La soluzione nutritiva madre è stata preparata con un grado di concentrazione di 1:100 all'interno di due contenitori "A" e "B" ciascuno della capacità di 50 l. La composizione della soluzione nutritiva è riportata in Tabella 3.2.

QUANTITA' DI SALI DA SCIOLGERE NEI CONTENITORI DI SOLUZIONE MADRE					
CONTENITORE A:			CONTENITORE B:		
Solfato di Magnesio	2,35	kg	Nitrato di Calcio agricolo	3,75	kg
Fosfato Monopotassico	1,36	kg	Nitrato ammonico	0,50	kg
Nitrato di Potassio	0,02	kg	Nitrato di potassio	0,78	kg
Solfato di Potassio	1,45	kg	Ferro Chelato Eddha	0,18	kg
Acido Borico	11,91	g			
Rame chelato (EDTA)	2,03	g			
Solfato di zinco	3,62	g			
Manganese chelato	21,05	g			
Molibdato di sodio	1,21	g			

Tabella 3.2 Composizione soluzione madre.

Giornalmente tutte le piante sono state sottoposte ad un esame visivo in modo da poter intervenire tempestivamente rispetto ad ogni eventuale anomalia riscontrata; settimanalmente sono stati effettuati il rilievo delle altezze (Figura 3.17 a) e dell'indice SPAD (Figura 3.17 b) per la stima del contenuto di clorofilla su un campione di 20 piante per replica. Le misure dell'indice SPAD sono state effettuate su 4 foglie per pianta utilizzando lo strumento *Konica Minolta Chlorophyll Meter, SPAD-502Plus*.

Il giorno precedente il secondo e ultimo sfalcio sono state condotte sullo stesso campione di piante, analisi per la valutazione dell'attività fotosintetica e degli scambi gassosi (Figura 3.17 c) utilizzando lo strumento *PP SYSTEM, CIRAS-2R portable CO2 and H2O Gas Analyzer*.

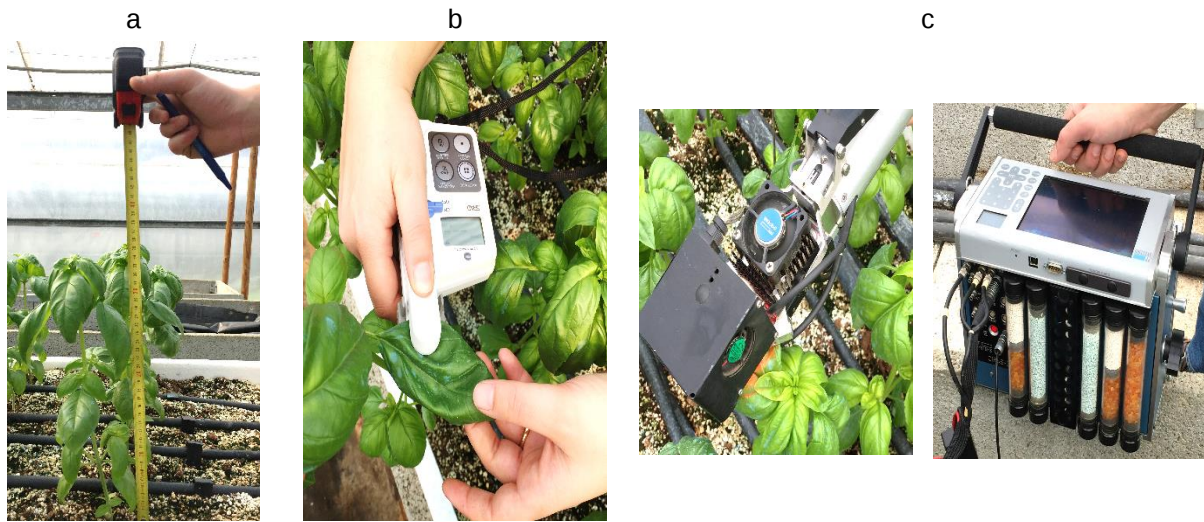


Figura 3.17 Rilievi effettuati sulle piante di basilico durante la sperimentazione;

a) Rilievo delle altezze; b) Rilievo indice SPAD; c) Analisi attività fotosintetica e scambi gassosi

Al termine di ogni ciclo colturale le piante sono state sfalciate, appena sopra il primo palco al primo sfalcio e al colletto al secondo, e pesate. Successivamente sono stati eseguiti in laboratorio i rilievi distruttivi sulla parte aerea di un campione randomizzato di 10 piante per replica (4 repliche Tesi “Lato Aria” e 4 repliche Tesi “Lato Basale”). In particolare è stato determinato il peso fresco di foglie e steli, la superficie fogliare tramite analizzatore di immagini *Delta-T Devices, WinDIAS Image Analysis* (Figura 3.18), il peso secco di foglie e steli dopo un periodo in stufa di 5 giorni ad una temperatura di 75 °C.

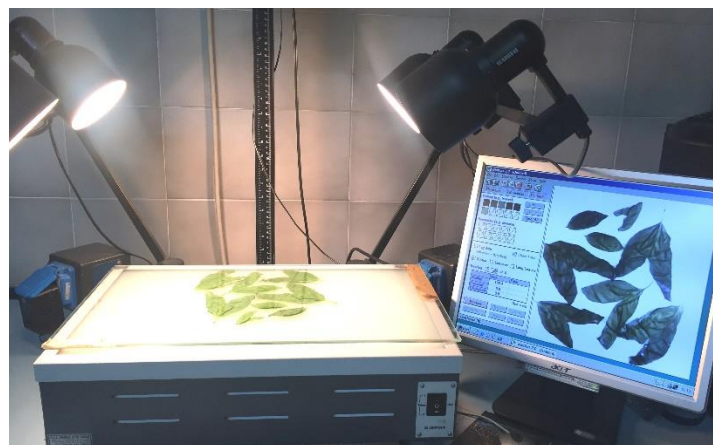


Figura 3.18 Determinazione della superficie fogliare mediante utilizzo di analizzatore di immagini *Delta-T Devices, WinDIAS Image Analysis*.

Sui campioni essiccati e trituriati finemente sono state effettuate specifiche analisi per la determinazione dei contenuti di:

- **Azoto organico:** determinato tramite metodo Kieldahl dopo digestione con acido fosforico come riportato in [46];
- **Azoto nitrico:** determinato tramite metodo modificato dell'acido salicil-solforico [47], dopo estrazioni in acqua;
- **Potassio:** determinato tramite spettroscopia di assorbimento atomico dopo digestione perclorico-nitrica;
- **Fosforo:** determinato attraverso metodo spettrofotometrico dopo digestione perclorico-nitrica.

Prima di porre le foglie in essiccazione sono stati prelevati campioni di sostanza fresca (circa 100 mg per replica) per l'analisi del contenuto in clorofilla a e b e dei carotenoidi. E' stata effettuata una doppia estrazione in metanolo (99% V:V) e sono stati mantenuti i campioni in digestione ad una temperatura di -20 °C per 48 ore. Le letture sono state effettuate tramite spettrofotometro rispettivamente a 665,2, 652,4 e 470,0 nm.

3.1.6 Elaborazione dei dati acquisiti

I dati termoigrometrici sono stati raccolti in un database Excel appositamente creato, in cui sono state riportate separate in periodo diurno e notturno in relazione all'orario di acquisizione, le misure registrate da tutti i datalogger per l'intero periodo di sperimentazione. Si osservi che per periodo diurno è stato assunto l'intervallo di tempo 7:30-17:30 mentre per periodo notturno l'intervallo di tempo complementare 17:30-7:30. Gli estremi degli intervalli sono corrispondenti con buona approssimazione (variazione di orario inferiore ai 30 minuti) all'alba e al tramonto del sole a Pescia durante il periodo di sperimentazione. Tale separazione dei dati è stata necessaria per tenere conto del diverso funzionamento degli impianti di riscaldamento in questi due periodi. I parametri termoigrometrici sono stati acquisiti con lo scopo di verificare quotidianamente il corretto funzionamento degli impianti. Per ogni datalogger sono state effettuate le medie aritmetiche dei dati registrati nei due periodi notturno e diurno.

L'analisi dei consumi dei due impianti di riscaldamento è stata suddivisa in due fasi: la prima finalizzata al calcolo dell'energia consumata dai due impianti, la seconda alla determinazione della loro efficienza energetica.

L'energia consumata (E_{imp}) è stata calcolata dividendo la quantità di combustibile utilizzato per il relativo potere calorifico inferiore secondo la formula 3.1.

$$E_{imp} = \frac{Q}{PCI} \quad 3.1$$

dove:

Q quantità di combustibile espressa in m³ di gpl o kg di gasolio;

PCI^4 potere calorifico inferiore del combustibile pari a 21954 kcal/m³ per gpl e 10200 kcal/kg per gasolio.

Si osservi che per il gasolio, la conversione da litri a kg è stata effettuata moltiplicando i litri registrati dal contatore per la sua densità pari a 0,85 kg/l.

L'efficienza energetica è la capacità di un determinato “sistema fisico” di ottenere un “dato risultato” utilizzando meno energia rispetto ad un altro sistema a minor efficienza. Identificando con “sistema fisico” i due impianti di riscaldamento e come “dato risultato” la produzione di basilico, è stato creato, con i dati elaborati durante l'analisi dei distruttivi e rilevati durante l'attività di monitoraggio dei consumi, un indice di efficienza energetica (*EUE: Energy Use Efficiency*) che metta in relazione l'energia fornita e la produzione ottenuta per entrambi i sistemi di riscaldamento a confronto. In particolare tale indice è stato calcolato per la biomassa totale fresca ($EUE_{F,totalbiomass}$) e per la biomassa totale secca ($EUE_{D,totalbiomass}$) secondo le formule 3.2 e 3.3.

$$EUE_{F,totalbiomass} = \frac{g_F}{E_{imp,n}} \quad [\text{g/cal}] \quad 3.2$$

$$EUE_{D,totalbiomass} = \frac{g_D}{E_{imp,n}} \quad [\text{g/cal}] \quad 3.3$$

dove:

g_F biomassa totale fresca espressa in grammi di peso fresco;

g_D biomassa totale secca espressa in grammi di peso secco;

$E_{imp,n}$ energia fornita dall'impianto normalizzata sulla superficie coltivata.

⁴ PCI = Potere calorifico inferiore è la quantità di calore prodotta dalla combustione completa di un quantitativo unitario di combustibile, in peso o volume, in determinate condizioni di pressione e temperatura.

Si noti che sia la produzione che le calorie sono state normalizzate rispetto al m² di superficie coltivata.

Infine è stata calcolata l'emissione di CO₂ equivalente in atmosfera (CO_{2e}), moltiplicando l'energia consumata dall'impianto per i relativi coefficienti di produzione della CO₂ ricavati dalla Tabella dei Parametri Standard nazionali del Ministero Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare [48] e dal National Inventory Report dell'ISPRA [49], (formula 3.4)

$$CO_{2e} = E_{imp} \times K \quad [\text{kg}] \quad 3.4$$

dove:

K fattore di produzione della CO₂ equivalente, pari 0,265 kgCO₂eq/kWh per il gasolio [48] e 0,236 kgCO₂eq/kWh per il gpl [49].

Si osservi che per determinare la CO₂ equivalente emessa in atmosfera occorre trasformare l'energia consumata in kWh attraverso una semplice conversione (1kcal = 0,001162 kWh).

I parametri relativi ai consumi e agli aspetti agronomici sono stati sottoposti ad analisi della varianza (ANOVA) multifattoriale. Il confronto tra i trattamenti è stato eseguito utilizzando il test di Student-Newman-Keuls (STD) per la separazione delle medie ($P = 0,05$). Tabelle e grafici, se non specificato, riportano i valori medi $\pm$ la deviazione standard (DS) dei replicati. L'analisi statistica è stata effettuata con il software Statgraphics Centurion XVI (Statpoint Technologies, Inc., Warrenton, Virginia, USA); la realizzazione dei grafici è stata effettuata con il programma Microsoft Excel.

3.2 Esposizione e discussione dei risultati

3.2.1 Parametri termoigrometrici interni ed esterni alla serra

Nei 45 giorni di sperimentazione (Pescia: 7 febbraio - 23 marzo 2017) la temperatura media dell'aria all'esterno della serra ($T_{m,air,out}$) è risultata pari a 10,6°C, con un valore massimo di 22°C e minimo di 1°C registrati rispettivamente i giorni 10 marzo e 15 febbraio. In figura 3.19 sono riportati gli andamenti giornalieri della temperatura media, massima e minima dell'aria esterna registrati durante l'intero periodo di prova.

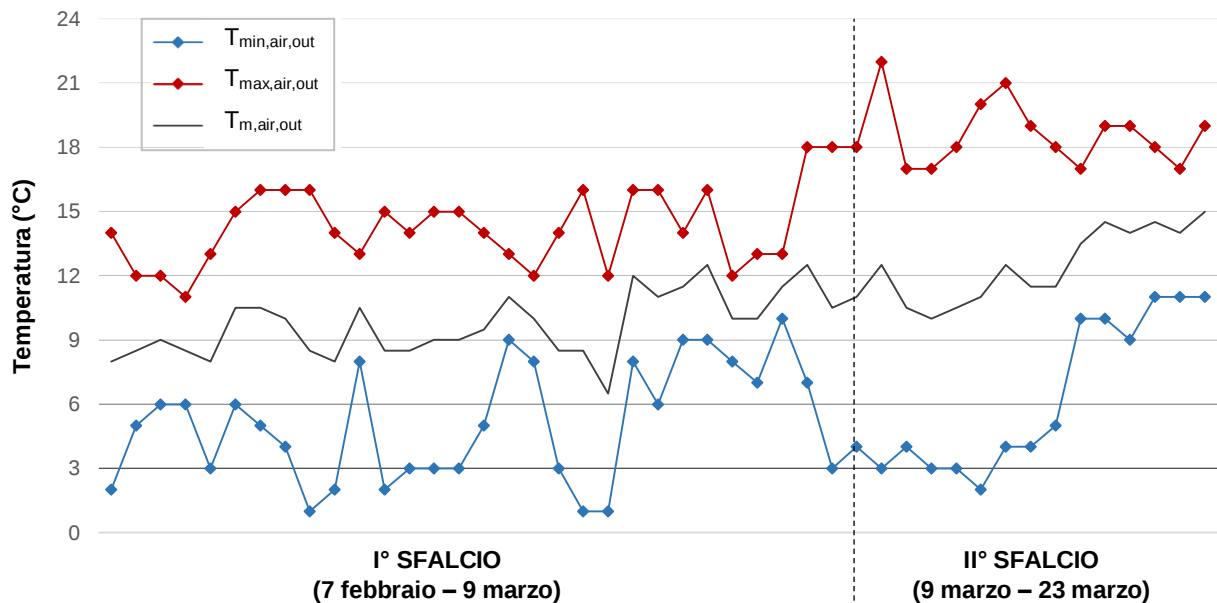


Figura 3.19 Temperatura media, massima e minima giornaliera registrata durante la prova.

Si riportano di seguito i risultati relativi ai parametri termoigrometrici interni alla serra.

Periodo diurno

Nelle due zone sperimentali “Lato Aria” e “Lato Basale”, durante i 45 giorni di prova, la temperatura media dell'aria registrata a 2 metri dalla superficie del suolo ($T_{m,air,2m,d}$) è risultata rispettivamente pari a 22,6 °C e 22,4 °C, a 1 metro dalla superficie del suolo ($T_{m,air,1m,d}$) pari a 22,3 °C e 21,9 °C, a 5 cm dalla superficie del substrato di coltivazione ($T_{m,air,canopy,d}$) pari a 21,6 °C e 21,5 °C (Figura 3.20).

L'irraggiamento medio solare ($I_{m,2m}$) registrato è pari a 324,86 W/m² “Lato Aria” e 324,80 W/m² “Lato Basale” ha consentito di ottenere nelle due zone sperimentali temperature dell'aria nelle ore diurne (7:30 – 17:30) superiori alla temperatura di setpoint di 15 °C impostata sui termostati dei due impianti a confronto i quali quindi, durante il periodo diurno, sono rimasti spenti eccetto nelle prime due ore della mattina (7:30 – 9:30) in cui gli effetti dell'irraggiamento

solare non sono ancora sufficienti ad innalzare la temperatura fino a quella di setpoint, e il giorno 4 marzo 2017 in cui la temperatura dell'aria interna è scesa al di sotto dei 15 °C a causa delle condizioni metereologiche (cielo completamente coperto).

La dipendenza quindi della temperatura dell'aria dal solo irraggiamento solare nel periodo diurno, ha comportato che nelle due zone sperimentali si registrassero i medesimi valori di temperatura con una variazione di $\pm 0,3$ °C non rilevante dal punto di vista tecnico-impiantistico, con una naturale stratificazione dell'aria calda verso l'alto (Figura 3.20).

Per quanto riguarda l'umidità relativa media dell'aria interna ($H_{m,air,2m,d}$) sono stati registrati valori del 41% nel “Lato Aria” e 43% nel “Lato Basale”.

Per completezza in Tabella 3.3 si riportano tutti i valori medi dei parametri termoigrometrici dell'aria interna e dell'irraggiamento solare suddivisi per sfalcio e zona sperimentale.

Dai risultati dell'analisi dei parametri termoigrometrici relativi al periodo diurno si può dedurre che, dal punto di vista tecnico, tra le due zone sperimentali non sono state riscontrate differenze rilevanti. Tale risultato è particolarmente importante in quanto, affinché il confronto tra le produzioni ottenute nelle due zone sperimentali fosse significativo, era necessario che ad eccezione dei due impianti utilizzati, non vi fossero ulteriori differenze.

Condizioni al contorno differenti (p.e. temperatura aria interna, umidità relativa e irraggiamento), avrebbero infatti potuto falsare i risultati relativi alla quantità e qualità della produzione ottenuta.

		I° SFALCIO (7 FEBBRAIO – 9 MARZO)		II° SFALCIO (9 MARZO – 23 MARZO)	
		LATO ARIA	LATO BASALE	LATO ARIA	LATO BASALE
$T_{m,air,2m,d}$	°C	21,30	21,20	23,90	23,70
$T_{m,air,1m,d}$	°C	21,10	20,80	23,40	23,10
$T_{m,air,canopy,d}$	°C	21,40	20,40	22,90	22,60
$H_{m,air,2m,d}$	%	42	47	40	40
$I_{m,2m}$	W/m ²	246,97	279,33	402,80	370,30

Tabella 3.3 Periodo diurno: valori medi dei parametri termoigrometrici dell'aria interna e dell'irraggiamento solare suddivisi per sfalcio e zona sperimentale.

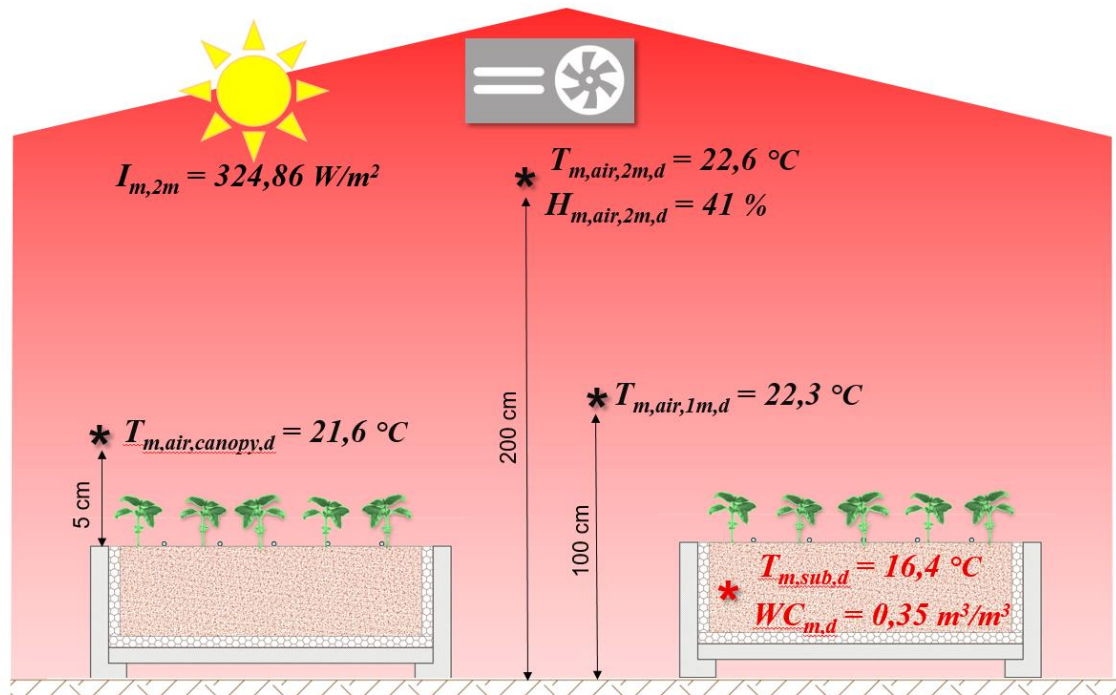
Per quanto riguarda invece la temperatura del substrato di coltivazione ($T_{m,sub,d}$) tra le due zone sperimentali sono state ottenute differenze tecnicamente rilevanti a causa dei due tipi di impianto utilizzati. Il riscaldamento basale ha infatti comportato una temperatura media del substrato maggiore rispetto alla stessa temperatura media nel lato riscaldato con l'impianto ad

aria; in particolare la temperatura media del substrato nell'intero periodo di prova registrata ad una profondità di 5 cm, è risultata pari a 16,4°C nel "Lato Aria" e 21,1°C nel "Lato Basale". Nonostante, come già detto sopra, gli impianti siano entrati in funzione quasi esclusivamente nelle ore notturne, la temperatura del substrato è risultata più alta nel "Lato Basale", rispetto al "Lato Aria", anche nelle ore diurne. Tale risultato è dovuto al fatto che il substrato del "Lato Basale" durante le ore notturne accumula parte del calore rilasciato dalle tubazioni calde poggiate sulla superficie e mantiene una temperatura maggiore anche nelle ore successive allo spegnimento dell'impianto.

Il contenuto volumetrico d'acqua ($WC_{m,d}$), registrato anch'esso ad una profondità di 5 cm è risultato mediamente pari al 0,35 m³/m³ nel "Lato Aria" e 0,28 m³/m³ nel "Lato Basale". Si osserva che avendo a disposizione un unico impianto di irrigazione non è stato possibile gestire separatamente gli interventi irrigui nelle due zone sperimentali per cui inevitabilmente il substrato nel "Lato Basale" costantemente a temperatura più elevata è risultato avere mediamente un contenuto volumetrico d'acqua più basso rispetto al "Lato Aria".

In Figura 3.20 viene rappresentata una sintesi dei valori medi diurni dei parametri termoigrometrici sopra esposti registrati nei 45 giorni di prova nelle due zone sperimentali.

LATO ARIA
7.02.17 – 23.03.17 - DIURNO



LATO BASALE
7.02.17 – 23.03.17 - DIURNO

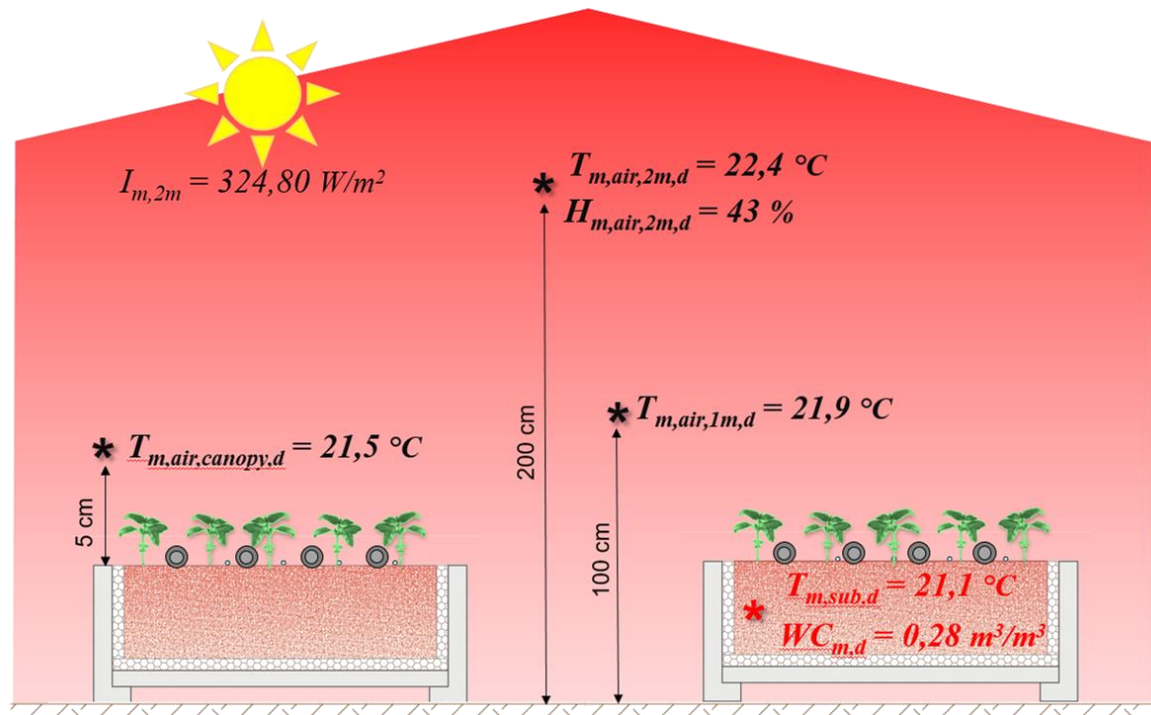


Figura 3.20 Sintesi dei valori medi diurni dei parametri termoigrometrici registrati durante i 45 giorni di prova per ciascuna zona sperimentale. In rosso sono indicati i due parametri la cui differenza nelle due tesi sperimentali “Lato Aria” e “Lato Basale” è risultata tecnicamente rilevante.

Periodo notturno

Mentre nel periodo diurno la sola presenza dell'irraggiamento solare come fonte di riscaldamento dell'aria interna determina una sostanziale uguaglianza in termini di condizioni termoigrometriche delle due zone sperimentali, nel periodo notturno i due impianti di riscaldamento (diversi per tipologia e modalità di diffusione del vettore termico), fanno registrare nelle due zone sperimentali condizioni termoigrometriche diverse. Unica eccezione è rappresentata dalla canopy in cui le condizioni termoigrometriche non hanno comportato differenze tecnicamente rilevanti. Qui infatti, secondo il protocollo di sperimentazione, la temperatura dell'aria in entrambe le zone sperimentali viene mantenuta intorno ai 15 °C per consentire alle piante di crescere all'interno di una canopy con condizioni di temperatura identiche per entrambe le zone (con le limitazioni del caso già trattate nel paragrafo 3.1.4). Durante la sperimentazione infatti non ci sono state rilevanti differenze della temperatura nella canopy tra le due zone sperimentali; in particolare la temperatura della canopy ($T_{m,air,canopy,n}$) è risultata mediamente pari a 15,1 °C nel "Lato Aria" e 15,3 °C nel "Lato Basale".

Nel "Lato Aria" riscaldando l'intero volume, si sono registrate temperature dell'aria misurate a 2 metri e 1 metro dalla superficie del suolo più elevate di quelle registrate nel "Lato Basale" dove il riscaldamento è stato limitato al solo volume della canopy. In particolare la temperatura media dell'aria registrata a 2 metri ($T_{m,air,2m,n}$) e 1 metro ($T_{m,air,1m,n}$) dalla superficie del suolo nel "Lato Aria" è stata mediamente pari a 19,1 °C e 14,9 °C per effetto della naturale stratificazione dell'aria calda verso l'alto, mentre nel "Lato Basale" è stata mediamente pari a 11,5 °C a 2 metri ($T_{m,air,2m,n}$) e 11,3 °C a 1 metro ($T_{m,air,1m,n}$) dalla superficie del suolo. Riscaldare due volumi d'aria di dimensioni diverse, comporta anche ottenere due diversi valori di umidità relativa dell'aria interna ($H_{m,air,2m,n}$). Infatti nel "Lato Basale" l'umidità relativa misurata a 2 metri dalla superficie del suolo è risultata pari al 73% significativamente maggiore di quella registrata nel "Lato Aria" pari al 50%.

In Tabella 3.4 si riportano tutti i valori medi dei parametri termoigrometrici dell'aria interna suddivisi per sfalcio e zona sperimentale.

		I° SFALCIO (7 FEBBRAIO – 9 MARZO)		II° SFALCIO (9 MARZO – 23 MARZO)	
		LATO ARIA	LATO BASALE	LATO ARIA	LATO BASALE
$T_{m,air,2m,n}$	°C	18,75	11,59	19,60	11,50
$T_{m,air,1m,n}$	°C	14,97	11,23	14,90	11,30
$T_{m,air,canopy,n}$	°C	14,75	15,20	15,50	15,40
$H_{m,air,2m,n}$	%	50	77	50	70

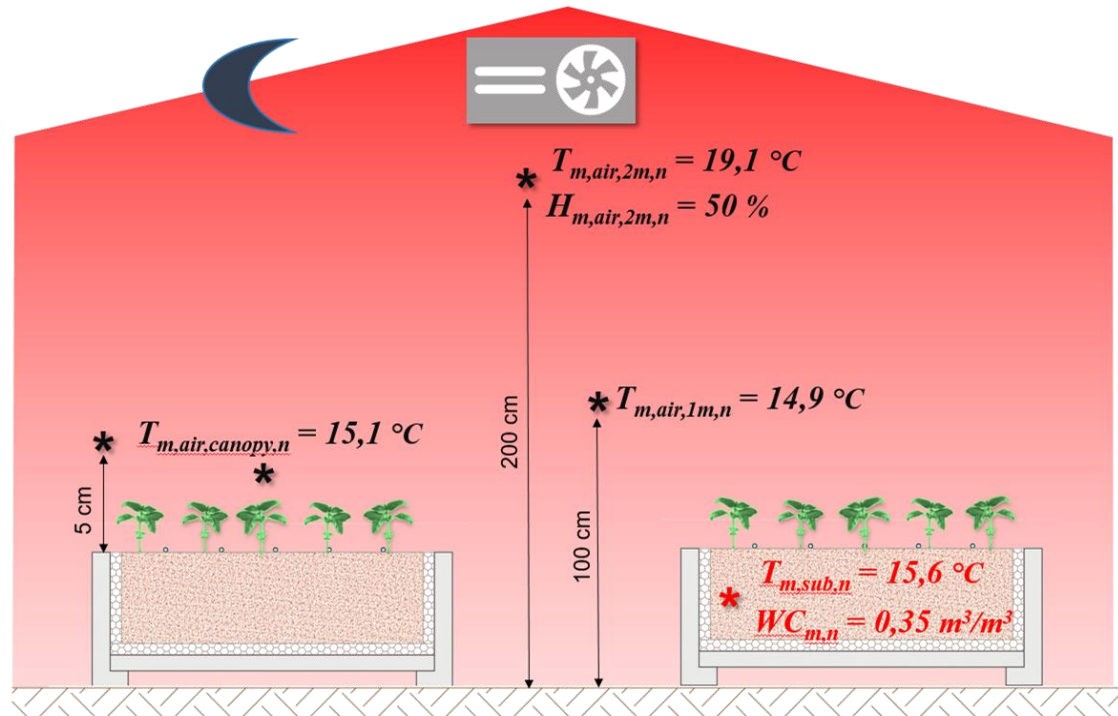
Tabella 3.4 Periodo notturno: valori medi dei parametri termoigrometrici dell'aria interna suddivisi per sfalcio e zona sperimentale.

La temperatura del substrato ($T_{m,sub,n}$) e il contenuto volumetrico d'acqua ($WC_{m,n}$), registrati ad una profondità di 5 cm sono risultati mediamente pari a 15,6 °C e 0,35 m³/m³ nel “Lato Aria” e 20,8 °C e 0,27 m³/m³ nel “Lato Basale”. Le osservazioni sul temperatura e contenuto d'acqua del substrato nel periodo notturno sono le stesse illustrate per il periodo diurno.

In Figura 3.21 viene rappresentata una sintesi dei valori medi notturni dei parametri termoigrometrici sopra esposti registrati durante tutto il periodo di prova nelle due zone sperimentali.

LATO ARIA

7.02.17 – 23.03.17 - NOTTURNO



LATO BASALE

7.02.17 – 23.03.17 - NOTTURNO

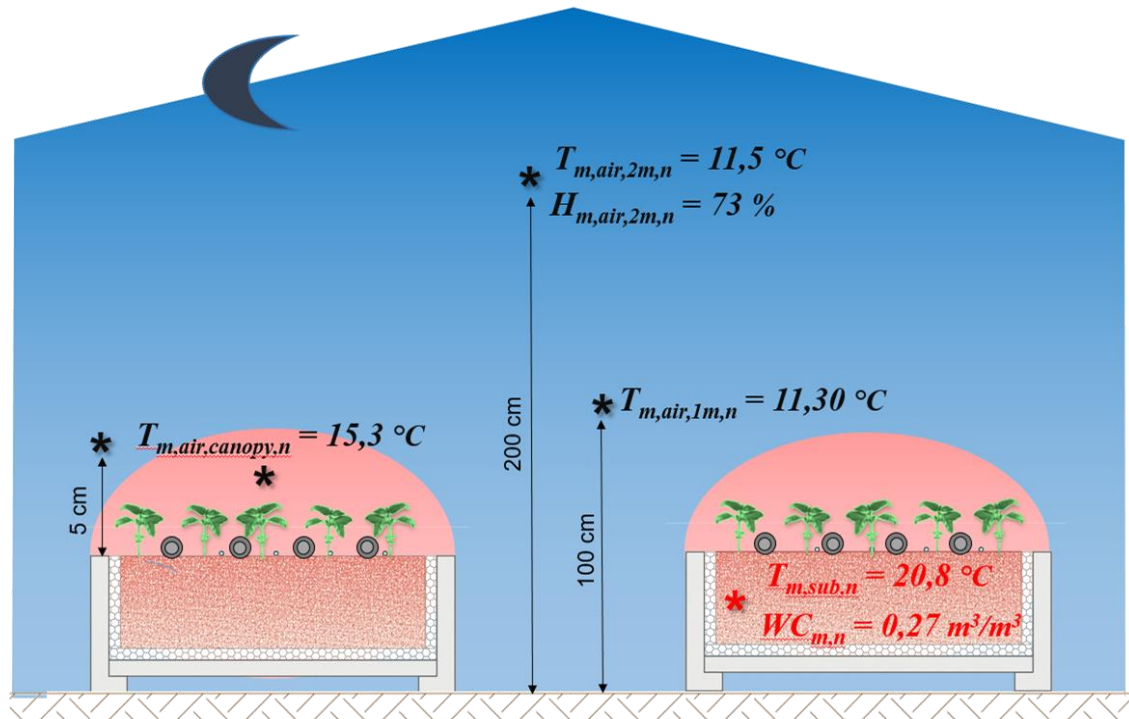


Figura 3.21 Sintesi dei valori medi notturni dei parametri termoigrometrici registrati durante la prova per ciascuna zona sperimentale. In rosso sono indicati i due parametri la cui differenza nelle due tesi sperimentali "Lato Aria" e "Lato Basale" è risultata tecnicamente rilevante.

Il monitoraggio dei dati di temperatura nel periodo notturno ha inoltre evidenziato gli effetti delle diverse modalità di riscaldamento dei due impianti legati all'inerzia termica⁵ dei due fluidi termovettori a confronto: l'acqua per l'impianto basale e l'aria per l'altro impianto. L'aria rispetto all'acqua ha un'inerzia termica molto più piccola per cui si riscalda e si raffredda molto più velocemente.

Occorre inoltre tenere presente che l'impianto di riscaldamento (sia ad acqua che ad aria) entra in funzione ogni volta che la temperatura della canopy scende al di sotto del valore minimo prefissato (15 °C) e interrompe il proprio funzionamento quando tale valore viene raggiunto.

Di conseguenza, l'impianto ad aria per mantenere la temperatura desiderata nella canopy deve compiere dei cicli di accensione e spegnimento frequenti e di breve durata.

Nel lato basale invece la temperatura dell'aria nella canopy dipende dalla temperatura dell'acqua che scorre all'interno delle tubazioni coassiali; poiché l'acqua ha un'inerzia termica maggiore rispetto all'aria (si riscalda e raffredda più lentamente), l'impianto deve compiere dei cicli di accensione e spegnimento meno frequenti e di durata maggiore.

In figura 3.22 a titolo esemplificativo di quanto appena esposto, si riporta l'andamento della temperatura nella canopy per entrambe le zone sperimentali, registrato nella notte tra il 19 e il 20 febbraio 2017. Ogni notte, per tutta la durata della prova, l'andamento della temperatura dell'aria nella canopy è stato il medesimo di quello riportato in figura 3.22.

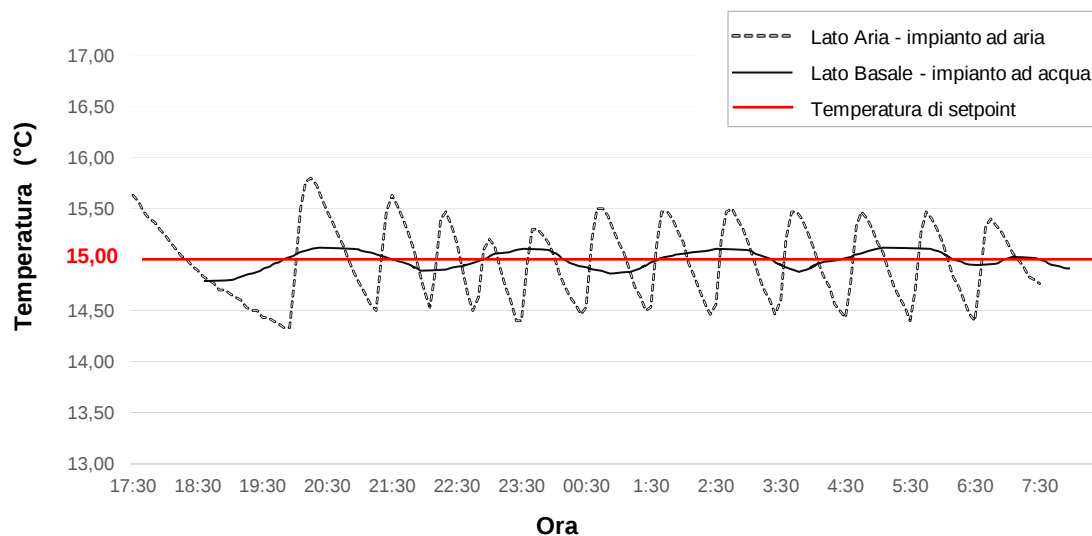


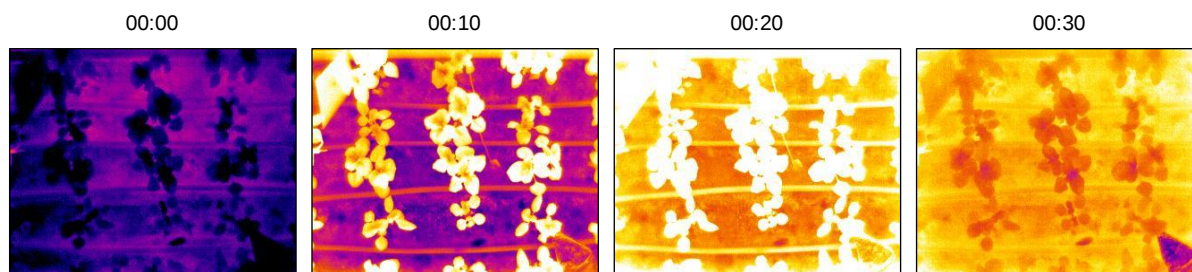
Figura 3.22 Andamento della temperatura dell'aria nella canopy per entrambe le zone sperimentali. Dati registrati nella notte tra il 19 e il 20 febbraio 2017.

⁵ L'inerzia termica è la capacità di un materiale di variare più o meno lentamente la propria temperatura come risposta a variazioni di temperatura esterne oppure di una sorgente di calore o raffreddamento interna.

Conseguentemente le piante di basilico coltivate nel “Lato Basale” sono cresciute in condizioni termiche più stazionarie rispetto a quelle coltivate nel “Lato Aria”.

E’ stato possibile osservare il fenomeno appena descritto anche mediante lo studio delle immagini termografiche acquisite durante la prova. Solitamente le immagini termografiche vengono utilizzate o per misurare le temperature degli elementi inquadrati nello scatto (analisi quantitativa) oppure, come è stato fatto per la prova BasiCal, per valutare le differenze di temperatura tra un elemento e un altro all’interno del solito scatto non in termini numerici ma in termini qualitativi (più caldo, meno caldo). Le immagini acquisite durante la prova quindi hanno consentito di valutare qualitativamente l’andamento delle temperature nelle due zone sperimentali e di confermare la diversa modalità di riscaldamento dei due impianti a confronto già osservata attraverso l’analisi dei dati acquisiti con i datalogger (Fig. 3.23).

LATO ARIA – impianto ad aria



LATO BASALE – impianto ad acqua

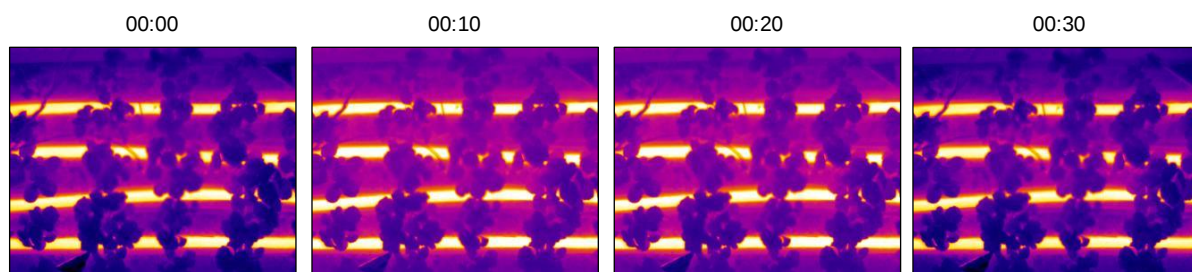


Figura 3.23 Valutazione qualitativa dell’andamento della temperatura dell’aria nella canopy per entrambe le zone sperimentali registrato dalle immagini termografiche.

Le immagini termografiche in Figura 3.23 rappresentano per ogni zona sperimentale, l’andamento qualitativo della temperatura durante la notte per un periodo di tempo di 30 minuti (le immagini sono state acquisite ogni 10 minuti). In termografia, variazioni di colore corrispondono a variazioni di temperatura. E’ evidente quindi che mentre nel “Lato Aria” in un periodo di soli 30 minuti, la temperatura subisce variazioni frequenti, nel “Lato Basale” nel medesimo periodo le variazioni di temperatura sono meno frequenti e di entità minore. Tutto

questo a conferma di ciò che era stato precedentemente osservato nell'analisi dei dati termici acquisiti con i datalogger.

3.2.2 Parametri agronomici

Analisi quantitativa



Il confronto tra le produzioni ottenute con le due tesi sperimentali (“Lato Aria” e “Lato Basale”) è stato effettuato analizzando e rielaborando i dati di peso fresco e peso secco ottenuti con i rilievi distruttivi della parte aerea effettuati in laboratorio, a seguito di ogni sfalcio. La produzione per ognuna delle due tesi è stata espressa in grammi di peso fresco e secco ottenuti per metro quadro di superficie coltivata. In figura 3.24 alcune immagini delle piante coltivate nelle due zone sperimentali prima del secondo e ultimo sfalcio.

LATO ARIA – impianto ad aria



LATO BASALE – impianto coassiale ad acqua



Figura 3.24 Piante di basilico prima del secondo e ultimo sfalcio del 23 marzo 2017.

Dall'analisi statistica condotta sulle produzioni ottenute con i due diversi sistemi di riscaldamento, che garantivano una stessa temperatura nella canopy delle piante, non si sono registrate differenze significative in termini di peso secco (Dw) e biomassa totale (B_T) tra le due zone sperimentali a confronto (Fig.3.25). Infatti i valori di peso secco nel “Lato Basale” e nel “Lato Aria” sono risultati rispettivamente pari a 71,40 g/m² e 76,28 g/m² nel I° sfalcio e 100,75 g/m² e 82,76 g/m² nel II° sfalcio; anche i valori di biomassa totale, valutati considerando l'intera produzione ottenuta nei due sfalci, sono risultati simili nei due sistemi e pari a 190,17 g/m² nel “Lato Basale” e 174,57 g/m² nel “Lato Aria”. Il peso fresco (Fw) nei due sistemi è risultato anch'esso simile nel I° sfalcio (691,13 g/m² nel “Lato Basale” contro 663,84 g/m² nel “Lato Aria”) ma significativamente superiore nel II° sfalcio nel “Lato Basale” con un valore pari a 1222,58 g/m² contro 877,23 g/m² ottenuto nel “Lato Aria”.

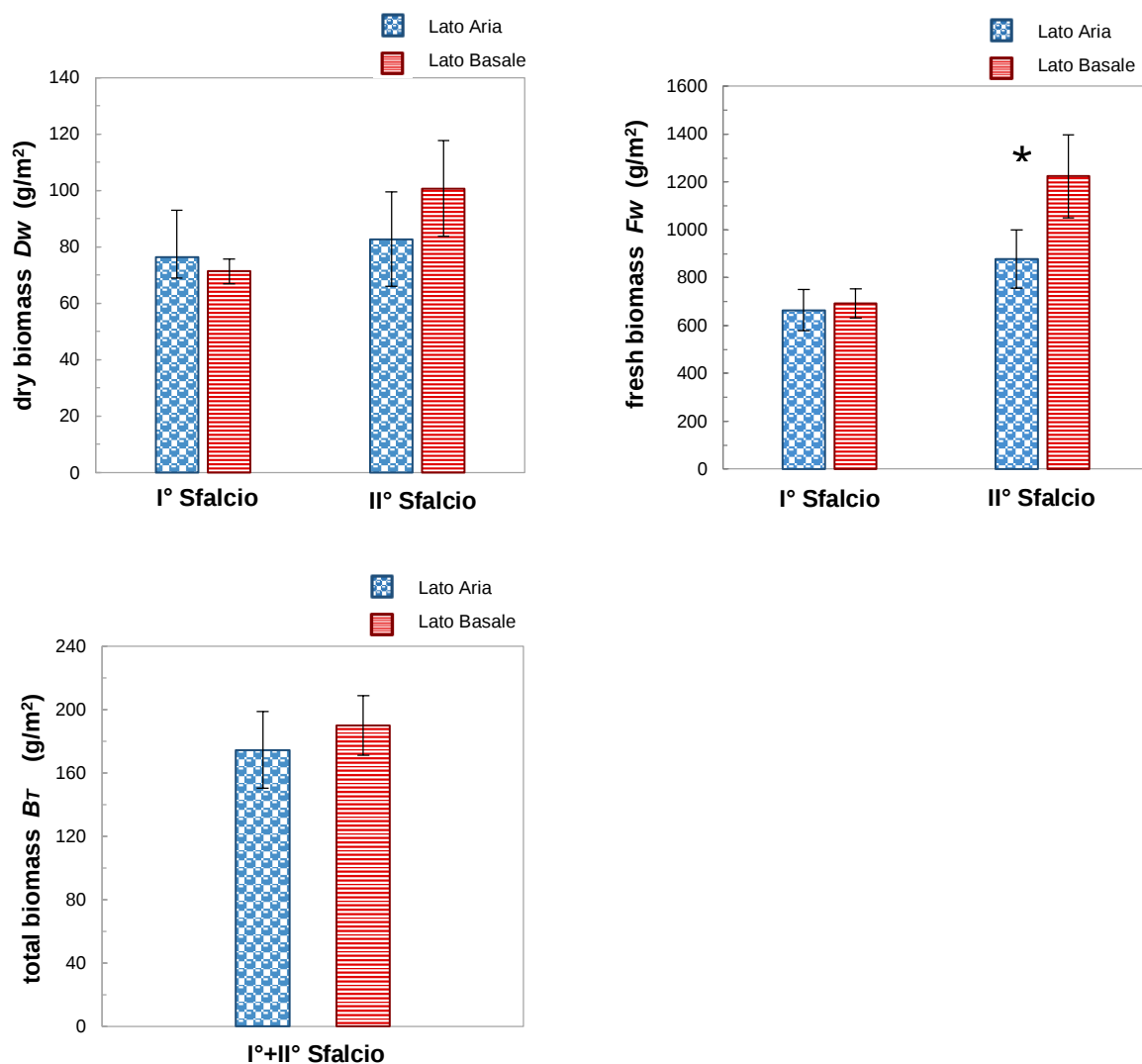


Figura 3.25 Analisi statistica dei rilievi distruttivi della parte aerea.
* $P \leq 0,05$.

Dai dati dell'analisi distruttiva effettuata sulle piante al I° e al II° sfalcio è risultata una percentuale di biomassa secca (%Dw) significativamente inferiore nelle piante riscaldate con impianto basale rispetto a quelle riscaldate con impianto ad aria. In particolare si sono registrati valori di percentuale di biomassa secca pari a 11,53% nel “Lato Aria” e 10,35% nel “Lato Basale” nel primo sfalcio e pari a 9,38% nel “Lato Aria” e 8,20% nel “Lato Basale” nel secondo sfalcio (Fig.3.26).

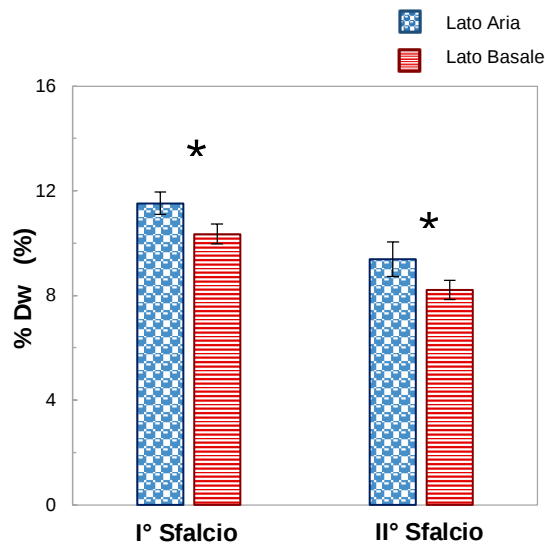


Figura 3.26 Analisi statistica della percentuale di peso secco.
* $P \leq 0,05$.

Analisi qualitativa



Il confronto in termini qualitativi tra le produzioni ottenute con le due tesi sperimentali (“Lato Aria” e “Lato Basale”) è stato invece condotto attraverso l’analisi dei risultati ottenuti dal monitoraggio dei parametri di crescita e di quelli fisiologici e dall’analisi dei tessuti al termine della prova. La crescita delle piante per entrambe le zone sperimentali durante l’intero periodo di prova (I° sfalcio: 1°-5° settimana; II° sfalcio: 6°-7° settimana) è stata la medesima come si evidenzia nel grafico sottostante (Fig. 3.27 a). Tale andamento è stato confermato dall’analisi statistica condotta sui valori delle altezze rilevati il giorno di ciascun sfalcio, dalla quale non sono emerse significative differenze relativamente all’altezza media delle piante per i due trattamenti. Infatti l’altezza media (H_m) è risultata pari a 34,74 cm per le piante coltivate nel “Lato Basale” e 37,77 cm per quelle nel “Lato Aria” per il I° sfalcio e di 26,69 cm nel “Lato Basale” e 26,23 cm nel “Lato Aria” per il II° sfalcio (Fig. 3.27 b).

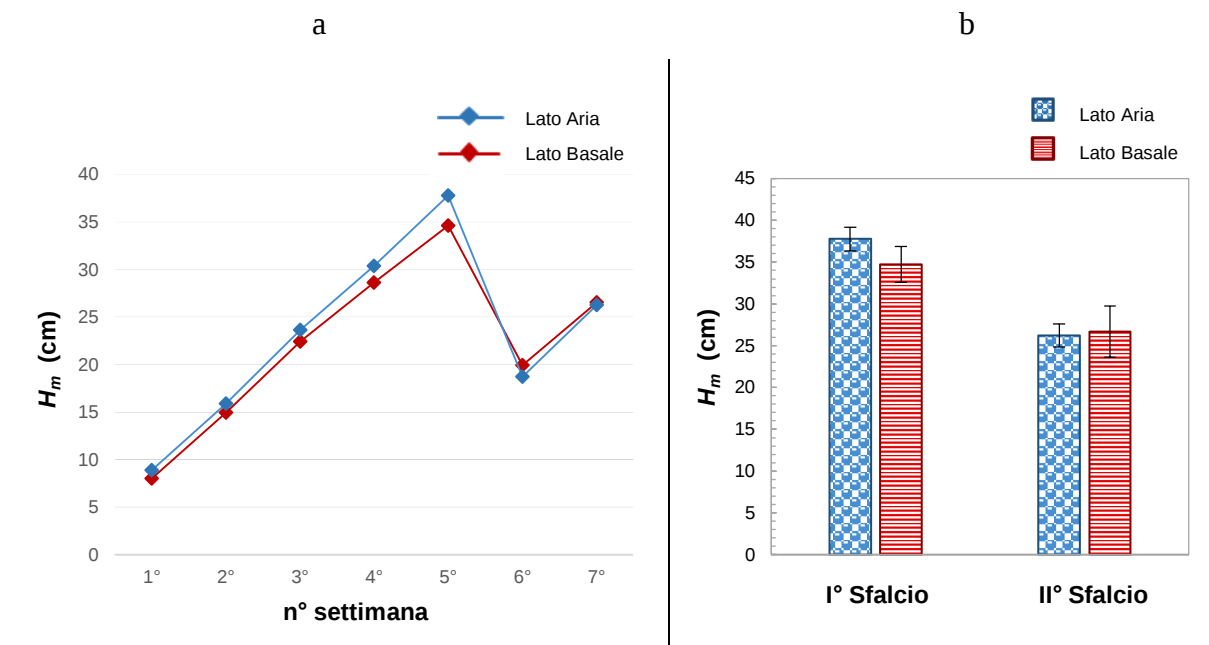


Figura 3.27 Risultati relativi al monitoraggio dell’altezza media delle piante per ogni zona sperimentale;
a) Crescita delle piante durante l’intero periodo di prova (misurazione settimanale);
b) Altezza media rilevata al momento dello sfalcio.



I risultati dell'indice SPAD, dell'attività fotosintetica e degli scambi gassosi sono riportati in figura 3.28. In particolare sono rappresentati per ciascuna zona sperimentale i valori dell'indice SPAD relativi al I° e al II°

sfalcio, la fotosintesi netta (P_n), la conduttanza stomatica (G_s) e la traspirazione fogliare (T_r) relativi al giorno precedente il secondo sfalcio (22 marzo 2017).

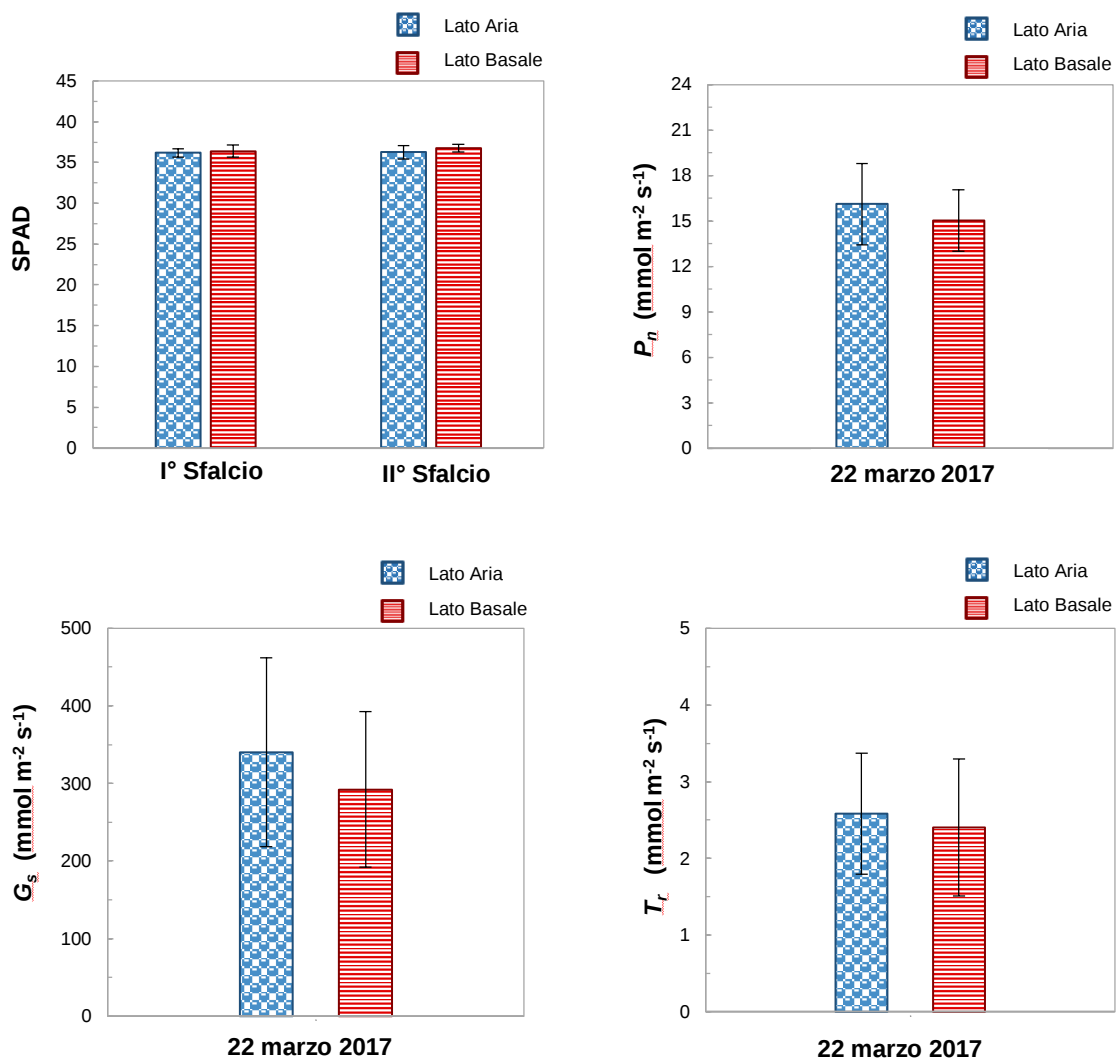


Figura 3.28 Analisi statistica dei principali parametri fisiologici rilevati.

Dall'analisi statistica dei parametri fisiologici non sono emerse significative differenze tra le piante coltivate nelle due zone sperimentali (Fig. 3.28). Infatti l'indice SPAD è risultato nel I°

e nel II° sfalcio rispettivamente pari a 36,39 e 36,76 nel “Lato Basale” e pari a 36,17 e 36,25 nel “Lato Aria”. Per quanto riguarda l’analisi dell’attività fotosintetica e degli scambi gassosi, nel “Lato Basale” e nel “Lato Aria” la fotosintesi netta è risultata rispettivamente pari a 15,02 $\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ e 16,10 $\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$; la conduttanza stomatica rispettivamente pari a 292,20 $\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ e 340,04 $\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$; la traspirazione fogliare rispettivamente pari a 2,40 $\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ e 2,58 $\text{mmol m}^{-2}\text{s}^{-1}$.

Anche dalle analisi del contenuto in clorofilla a (*chl a*) e b (*chl b*) e dei carotenoidi (*car*) effettuate sui campioni di sostanza fresca, non sono emerse significative differenze tra le due tesi sperimentali (Fig. 3.29). Nel I° sfalcio i contenuti in clorofilla a e b e i carotenoidi sono risultati rispettivamente pari a 758,62 mg/g, 301,02 mg/g e 201,19 mg/g nel “Lato Basale” e pari a 660,11 mg/g, 259,92 mg/g e 179,86 mg/g nel “Lato Aria”.

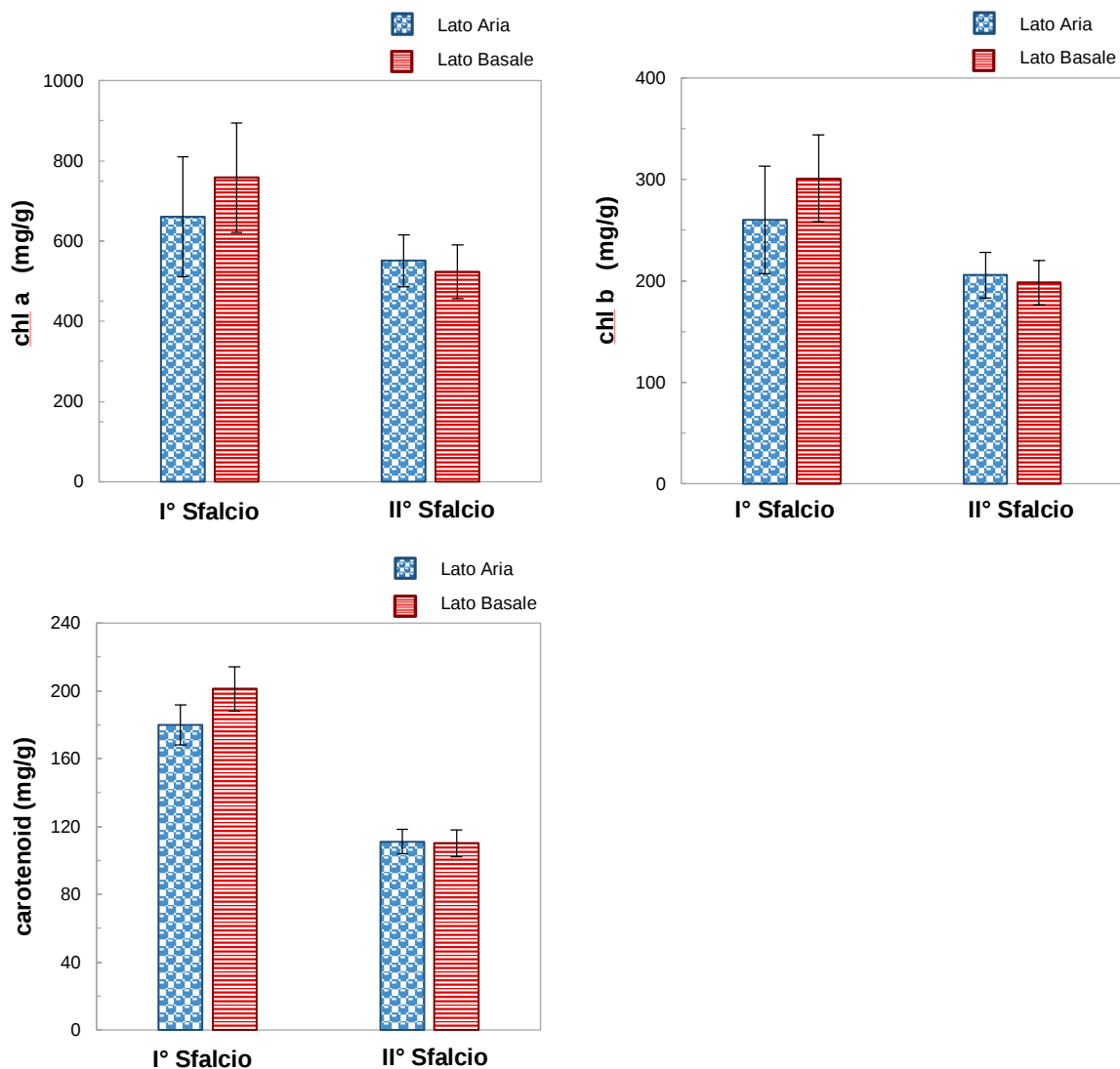


Figura 3.29 Analisi statistica dei contenuti di clorofilla e carotenoidi.

Nel II° sfalcio i contenuti in clorofilla a e b e i carotenoidi sono risultati rispettivamente pari a 523,50 mg/g, 198,31 mg/g e 110,09 mg/g nel “Lato Basale” e pari a 550,71 mg/g, 205,59 mg/g e 111,02 mg/g nel “Lato Aria”.

L’unica differenza significativa registrata è stata quella relativa all’assorbimento di alcuni dei principali macroelementi: i contenuti di Azoto Totale (N_{tot}), Potassio (K) e Fosforo (P) in g/kg di s.s. nelle foglie, sono risultati significativamente maggiori nelle piante riscaldate con impianto basale rispetto a quelle riscaldate con impianto ad aria. (Fig.3.30).

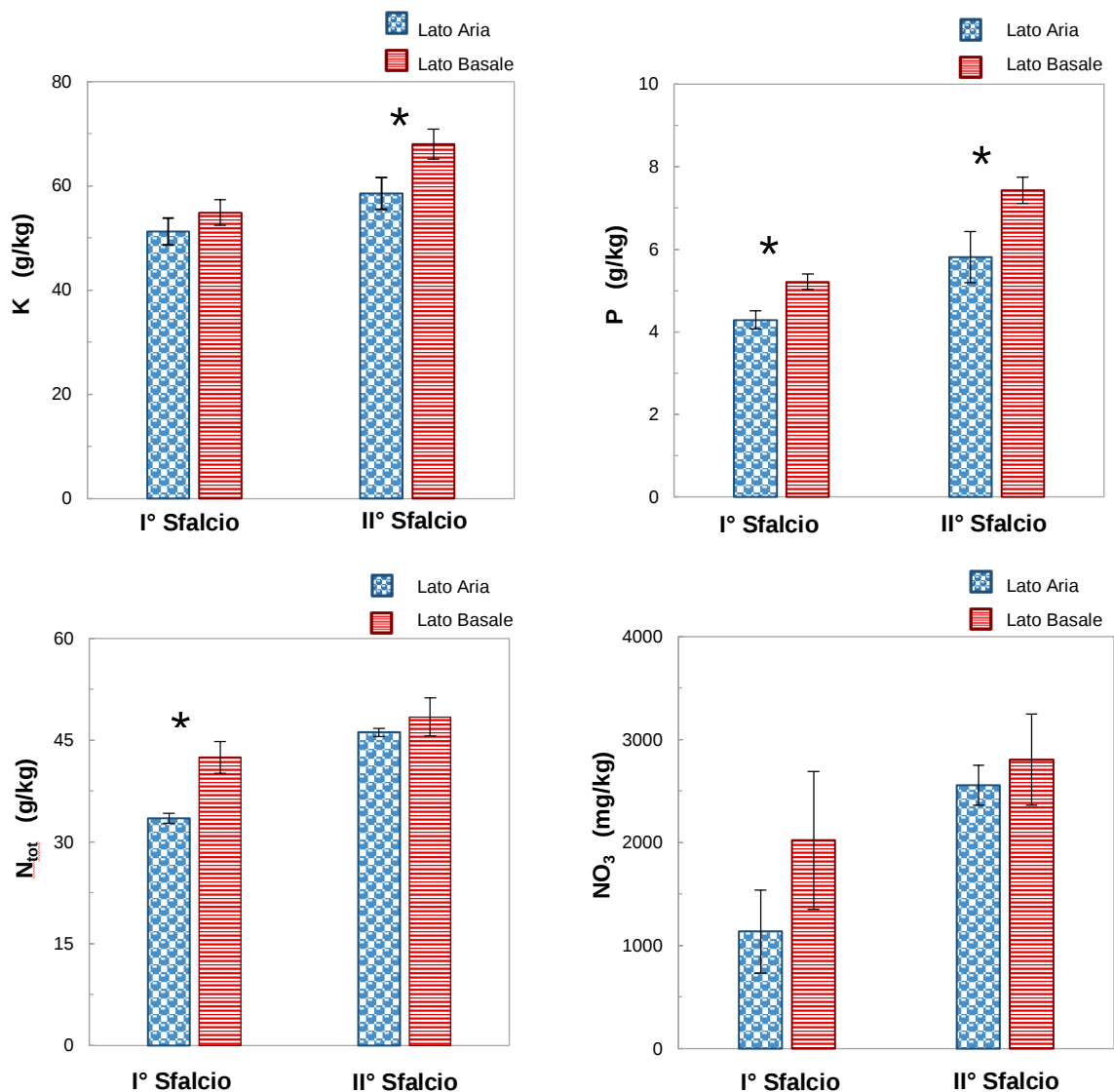


Figura 3.30 Analisi statistica dei contenuti di Potassio, Fosforo, Azoto organico e nitrico.
* $P \leq 0,05$.

In particolare, il contenuto di N_{tot} è risultato significativamente superiore nel "Lato Basale" al I° sfalcio (42,47 g/kg nel “Lato Basale” contro 33,47 g/kg nel “Lato Aria”), quello di K è

risultato significativamente superiore nel "Lato Basale" al II° sfalcio (67,95 g/kg nel "Lato Basale" contro 58,50 g/kg nel "Lato Aria") mentre quello di P è risultato significativamente superiore nel "Lato Basale" sia al I° sfalcio (5,21 g/kg nel "Lato Basale" contro 4,28 g/kg nel "Lato Basale") che al II° sfalcio (7,43 g/kg nel "Lato Basale" contro 5,81 g/kg nel "Lato Aria").

I risultati sopra esposti confermano alcuni dati riportati in letteratura ma, al contempo, evidenziano anche alcuni aspetti innovativi interessanti. I due sistemi di riscaldamento valutati sono stati impostati, nella sperimentazione, in modo tale da mantenere la stessa temperatura attorno alla canopy della pianta. Il basilico è una specie che risente molto degli effetti della temperatura nell'ambiente di coltivazione [50]. La temperatura, come principali effetti biologici, presenta una certa influenza nelle reazioni enzimatiche, nel trasporto e nella diffusione dei metaboliti: a basse temperature, infatti, questi processi sono più lenti rispetto alle alte temperature [51]. Nel nostro caso, lo scopo era mettere a confronto l'efficienza di due diversi sistemi energetici creando le medesime condizioni termiche attorno alla canopy delle piante e, una volta riusciti ad ottenere tali condizioni, valutarne le rese qualitative e quantitative. I dati sopra esposti hanno evidenziato che la produzione e la qualità (nei due sfalci effettuati) sono risultate non statisticamente differenti nei due sistemi, così come tutti i parametri fisiologici e di crescita analizzati, quindi il confronto sull'efficienza dei due sistemi può essere basato esclusivamente sull'analisi dei consumi energetici per ottenere una stessa produzione (paragrafo 3.2.3). Tuttavia, nelle piante cresciute nei due diversi ambienti si sono riscontrate anche differenze significative a carico della produzione di sostanza fresca, nell'assorbimento idrico e nell'assorbimento di Azoto Totale, Fosforo e Potassio, risultati più elevati nella zona sperimentale con riscaldamento basale. Quest'ultimo sistema, rispetto a quello tradizionale di riscaldamento dell'aria, presentando i tubi a contatto col terreno, oltre a portare la temperatura dell'aria attorno alla canopy delle piante ai livelli desiderati, determina anche un certo riscaldamento del terreno. Gli effetti del riscaldamento del terreno in prossimità delle radici, riscontrati nella prova condotta, erano già stati studiati in diversi lavori su pomodoro [52], lattuga [53], cetriolo [54] e su altre specie orticole [55]. La temperatura più calda ottenuta in prossimità dell'apparato radicale delle piante con riscaldamento basale, quindi, potrebbe aver determinato il maggior contenuto idrico (maggior produzione di sostanza fresca e minor percentuale di peso secco) e il maggior contenuto di macro-elementi registrato, dato che l'efficienza fotosintetica e gli altri parametri fisiologici, relativi principalmente agli organi epigei (che, come detto, si trovavano nelle medesime condizioni termiche), sono risultati

invariati nei due sistemi. Inoltre, durante lo svolgimento della sperimentazione in serra, non sono state rilevate fitopatie di alcun tipo a carico delle piante. Il riscaldamento basale quindi potrebbe aver determinato, per le più alte temperature riscontrabili nel terreno in prossimità delle radici, una notevole riduzione di attacchi parassitari, principalmente fungini [56] (muffa bianca BWM, *Sclerotinia sclerotiorum* e muffa grigia BGM, *Botrytis cinerea*).

3.2.3 Parametri energetici

La valutazione dell'efficienza energetica dei due impianti di riscaldamento utilizzati durante la prova Basicall 1.0 è stata effettuata partendo dai consumi di combustibile registrati dai contatori installati nelle due zone sperimentali. In particolare, nel “Lato Basale” sono stati consumati 289 l di GPL durante il I° sfalcio e 98 l durante il II° sfalcio, per un totale di 387 l di combustibile. Nel “Lato Aria” invece sono stati utilizzati 749 l di gasolio durante il I° sfalcio e 304 l di gasolio durante il II° sfalcio, per un totale di 1053 l di combustibile.

E' stata poi calcolata l'Energia consumata (E_{imp}), definita come in formula 3.1, che è risultata per il “Lato Basale” nel I° e nel II° sfalcio rispettivamente pari a 1.571.467,32 kcal e a 539.475,64 kcal per un totale di 2.110.942,96 kcal; nel “Lato Aria” invece E_{imp} è risultata pari 6.493.830,00 kcal nel I° sfalcio e pari a 2.635.582,02 kcal nel II° sfalcio, per un totale di 9.129.412,02 kcal.

Considerando un costo unitario del GPL pari a 0,85 €/l e del Gasolio agricolo pari a 0,75 €/l, il costo sostenuto per il combustibile è stato per il “Lato Basale” pari a circa 330 €, mentre per il “Lato Aria”, pari a circa 790 €.

I costi unitari di combustibile di GPL e gasolio agricolo sono stati assunti pari ai valori medi italiani relativi all'anno 2017 pubblicati nel database dell'ufficio statico dell'Unione Europea (Eurostat – statistics explained).

Sulla base dell'energia consumata dai due impianti sono state inoltre determinate le emissioni di CO₂ equivalente in atmosfera dovute ai consumi dei due sistemi di riscaldamento (formula 3.4). Nel “Lato Basale” le emissioni di CO₂ equivalente sono risultate complessivamente pari a 579,4 kg, mentre nel “Lato Aria” sono risultate pari a 2812,1 kg. Tali risultati sono direttamente conseguenti alla diversa dimensione del volume d'aria da riscaldare delle due zone sperimentali a confronto.

Di maggior rilevanza sono invece i risultati legati all'efficienza energetica dei due sistemi impiantistici utilizzati. Occorre tenere presente che l'efficienza energetica è la capacità di un determinato “sistema fisico” di ottenere un “dato risultato” utilizzando meno energia rispetto

ad un altro sistema a minor efficienza. Identificando con “sistema fisico” i due impianti di riscaldamento e come “dato risultato” la produzione di basilico, è stato creato, con i dati elaborati durante l’analisi dei distruttivi e rilevati durante l’attività di monitoraggio dei consumi, un indice di efficienza energetica (*EUE: Energy Use Efficiency*) già definito nel paragrafo 3.1.6. Tale indice ha consentito di mettere in relazione la produzione ottenuta con l’energia fornita dai due sistemi di riscaldamento, ovvero i grammi di biomassa totale fresca/secca prodotta, con le calorie fornite dai due impianti. Inoltre, per un migliore confronto, sia la produzione ottenuta che le calorie fornite sono state normalizzate rispetto ai m² di superficie coltivata. L’EUE è risultato essere significativamente maggiore nel “Lato Basale”, come mostrato in Figura 3.31. Questo significa che a parità di energia fornita da parte dei due impianti, nel “Lato Basale” la produzione di basilico è stata maggiore, o in altre parole a parità di produzione di basilico, nel “Lato Basale” il consumo di energia è stato inferiore. Infatti l’EUE relativo alla biomassa fresca e secca prodotta ($EUE_{F,totalbiomass}$, $EUE_{D,totalbiomass}$) è risultato rispettivamente pari a 30,84 g/cal e 2,85 g/cal nel “Lato Basale” e rispettivamente pari a 18,17 g/cal e 1,91 g/cal nel “Lato Aria”. Tutti i risultati ottenuti dall’analisi dei parametri energetici sono riportati in Tabella 3.5.

	LATO ARIA	LATO BASALE
<i>Fonte di energia</i>	Gasolio	GPL
<i>Consumi di combustibile</i>		
I° sfalcio	749 l	289 l
II° sfalcio	304 l	98 l
Totale	1053 l	387 l
<i>Energia consumata (E_{imp})</i>		
I° sfalcio	6.493.830,00 kcal	1.571.467,32 kcal
II° sfalcio	2.635.582,02 kcal	539.475,64 kcal
Totale	9.129.412,02 kcal (10.611,7 kWh)	2.110.942,96 kcal (2455,03 kWh)
<i>Costi sostenuti</i>		
Costo unitario	0,75 €/l	0,85 €/l
Totale	790 €	330 €
<i>CO2 equivalente emessa</i>		
Fattore di produzione	0,265 kgCO ₂ /kWh	0,236 kgCO ₂ /kWh
Totale	2812,1 kgCO₂	579,4 kgCO₂
<i>Energy Use Efficiency (EUE)</i>		
Biomassa fresca	18,17 g/cal	30,84 g/cal
Biomassa secca	1,91 g/cal	2,85 g/cal

Tabella 3.5 Sintesi dei risultati dei parametri energetici ottenuti.

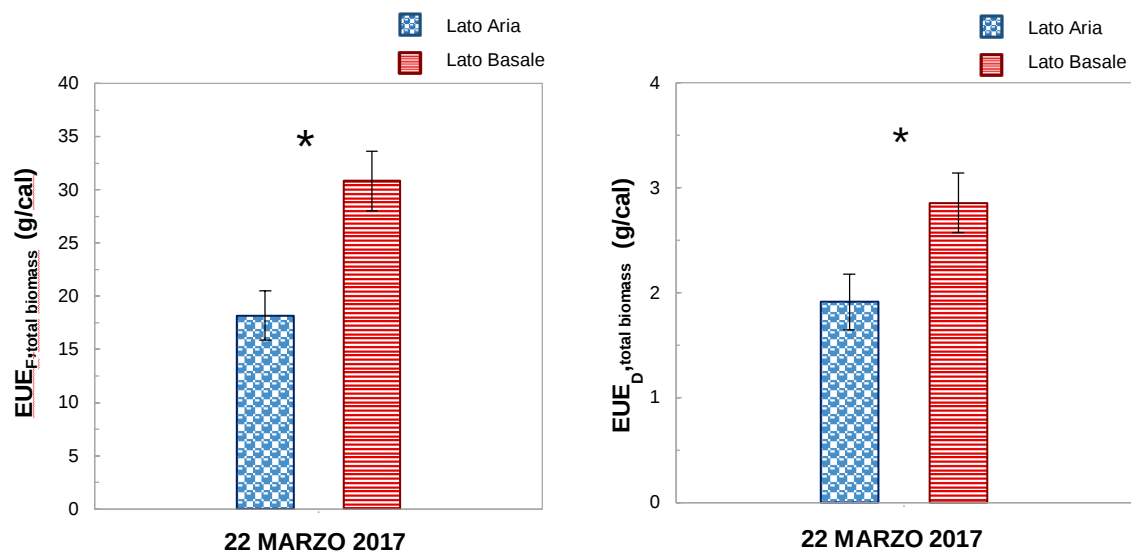


Figura 3.31 Analisi statistica dell'indice di efficienza energetica per la biomassa fresca e secca prodotta ($EUE_{F,total\ biomass}$, $EUE_{D,total\ biomass}$).
* $P \leq 0,05$.

Capitolo 4.

Secondo anno di sperimentazione: BasiCal 2.0

La prova BasiCal 2.0 è stata condotta nel trimestre Gennaio-Marzo dell'anno 2018, esattamente un anno dopo BasiCal 1.0. I risultati ottenuti con BasiCal 1.0 hanno evidenziato come non vi siano state significative differenze nella quantità e qualità della produzione di basilico ottenuta con i due impianti di riscaldamento a confronto (tesi "Lato Aria" e tesi "Lato Basale") e come sia stata invece significativamente maggiore l'efficienza energetica dell'impianto basale coassiale rispetto all'impianto ad aria. Questa seconda prova è stata strutturata con un triplice obiettivo: replicare la prova condotta l'anno precedente al fine di confermare o meno i risultati ottenuti; introdurre nel protocollo di sperimentazione una terza tesi sperimentale; monitorare l'andamento della temperatura della canopy a diverse distanze dalle tubazioni calde. Accanto quindi alle due tesi sperimentali della prova precedente, impianto ad aria e impianto basale coassiale alimentato da caldaia a condensazione, è stata introdotta una nuova linea di coltivazione riscaldata da impianto basale coassiale alimentato da pompa di calore (Figura 4.1).

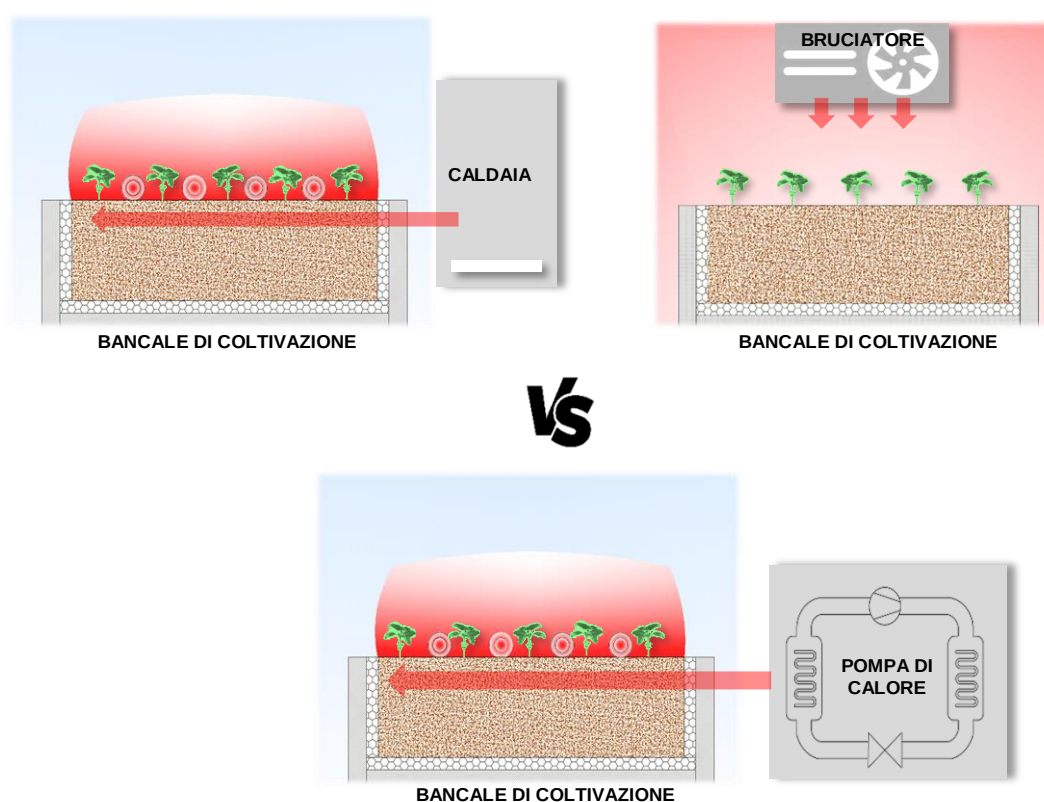


Figura 4.1 I tre impianti a confronto nel secondo anno di sperimentazione.

Le tre tesi sperimentali sono state denominate “Lato Aria”, impianto con bruciatore; “Lato Basale C”, impianto coassiale con caldaia; “Lato Basale P”, impianto coassiale con pompa di calore.

Il monitoraggio della temperatura della canopy a diverse distanze dalle tubazioni calde è stato invece effettuato allo scopo di determinare la “distanza di influenza del riscaldamento”, ovvero la distanza alla quale la temperatura dell’aria della canopy non risente del calore proveniente dalle tubazioni calde, con impianto impostato secondo quanto previsto dal protocollo di sperimentazione.

Benchè in altri settori, come quello delle costruzioni civili, l’impiego delle pompe di calore per la climatizzazione degli edifici sia con impianti ad aria che ad acqua (radiatori e pavimento radiante) sia ormai una tecnologia ampiamente diffusa della quale si conoscono le prestazioni e i limiti di funzionamento, non sono altrettanto note le prestazioni delle pompe di calore per la climatizzazione delle serre in particolare per il riscaldamento dell’acqua circolante nelle tubazioni di un impianto basale. La pompa di calore, a differenza di una qualsiasi caldaia, non produce calore bruciando un combustibile, ma “semplicemente” trasferendo il calore che sottrae all’aria esterna all’acqua dell’impianto (il principio di funzionamento della pompa di calore è illustrato dettagliatamente nel successivo paragrafo 4.1). La quantità di calore che la pompa di calore riesce a trasferire all’acqua dell’impianto e conseguentemente la sua efficienza sono quindi strettamente dipendenti dalla temperatura dell’aria esterna. Quanto più la temperatura dell’aria esterna è bassa, quanto meno calore la pompa riesce a sottrarre all’aria.

Grazie al suo particolare funzionamento, la pompa di calore raggiunge dei rendimenti superiori a quelli di una caldaia a condensazione. Questo però solo se si trova ad operare in determinate condizioni di temperatura esterna e solo se a servizio di un impianto che richiede una temperatura dell’acqua relativamente bassa. Allontanandosi dalle condizioni operative ottimali, la sua efficienza si riduce notevolmente. Per mantenere la temperatura media di 15 °C nella canopy prevista nel protocollo di sperimentazione in BasiCal 1.0, la temperatura dell’acqua nelle tubazioni è stata mantenuta piuttosto elevata rispetto a quella ottimale per il funzionamento di una pompa di calore. Per questi motivi, ottenere una maggior efficienza con la pompa di calore rispetto che con la caldaia e riuscire a mantenere nella canopy la temperatura di 15 °C utilizzando tubazioni alimentate con pompa di calore rappresentano due obiettivi dall’esito positivo non affatto scontato.

L’introduzione della terza tesi all’interno della prova BasiCal 2.0 ha consentito di sperimentare quanto appena esposto.

4.1 Utilizzo di una tecnologia rinnovabile: la pompa di calore

Le energie rinnovabili sono quelle specifiche fonti di energia il cui utilizzo rispetta le risorse offerte dalla natura e in generale la salute umana e del pianeta.

Si tratta di risorse classificate come inesauribili, ossia il loro uso non compromette la possibilità di riutilizzarle in futuro per via della capacità di autorigenerazione della fonte di energia che non si esaurisce ad ogni ciclo di utilizzo. La Direttiva Europea 2009/28 definisce l'energia da fonti rinnovabili come *l'energia proveniente da fonti rinnovabili non fossili, vale a dire energia eolica, solare, aerotermica, geotermica, idrotermica e oceanica, idraulica, biomassa, gas di discarica, gas residuati dai processi di depurazione e biogas*.

La pompa di calore è una macchina che produce energia termica utilizzando fonti di energia rinnovabile. Essa sottrae energia dalla terra, dall'aria o dall'acqua e la trasferisce sotto forma di calore all'utenza che può essere rappresentata, facendo riferimento al settore delle costruzioni civili ed industriali dove questa tecnologia è ampiamente diffusa, dall'acqua e dall'aria per l'alimentazione degli impianti di riscaldamento e di quelli sanitari (Figura 4.2).

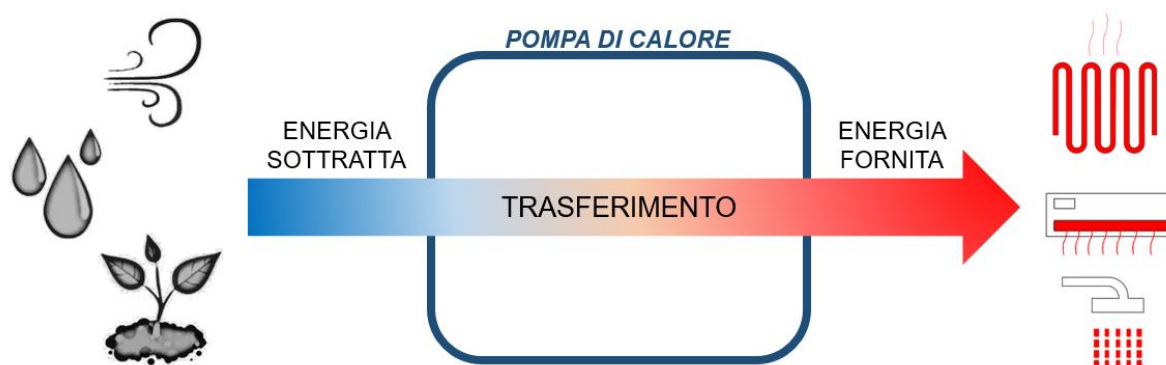


Figura 4.2 Pompa di Calore: schema del trasferimento di energia.

Questa macchina è alimentata con energia elettrica ma tale energia viene utilizzata esclusivamente per il funzionamento di alcune sue componenti interne. La sua resa, in termini di C.O.P. (Coefficiente di Prestazione), intesa come rapporto tra energia resa (calore fornito all'utenza) ed energia consumata (in questo caso energia elettrica) è solitamente compresa tra 3 e 6. Un C.O.P. pari a 3 significa che per ogni kWh di energia elettrica consumata, la pompa di calore rende all'utenza 3 kWh di energia termica.

Questo è possibile perché il principio di funzionamento della pompa di calore è quello del ciclo frigorifero nel quale il calore sottratto da un ambiente a bassa temperatura, definito *pozzo*

freddo, viene trasferito ad un secondo ambiente che si trova a temperatura più alta, definito *pozzo caldo*.

Nello specifico della prova BasiCal, la pompa di calore installata, era del tipo aria-acqua; questo significa che il pozzo freddo, ovvero l'ambiente di prelievo dell'energia, era rappresentato dall'aria (quella esterna alla serra), mentre il pozzo caldo, ovvero l'ambiente a cui cedere energia, dall'acqua nelle tubazioni utilizzate per il riscaldamento basale (Figura 4.3).

Per comprendere come sia fisicamente possibile sottrarre del calore da una sorgente fredda e restituirlo ad una sorgente calda senza violare alcun principio della termodinamica, è necessario descrivere nel dettaglio le principali fasi di funzionamento del ciclo frigorifero (Figura 4.3).

La pompa di calore è costituita da un circuito chiuso costituito da un compressore, un condensatore, una valvola di laminazione e un evaporatore, percorso da un fluido frigorifero che, a seconda delle condizioni di temperatura e di pressione in cui si trova, assume lo stato di liquido o vapore. I cambiamenti di fase del fluido frigorifero rendono possibile il trasferimento dell'energia termica.

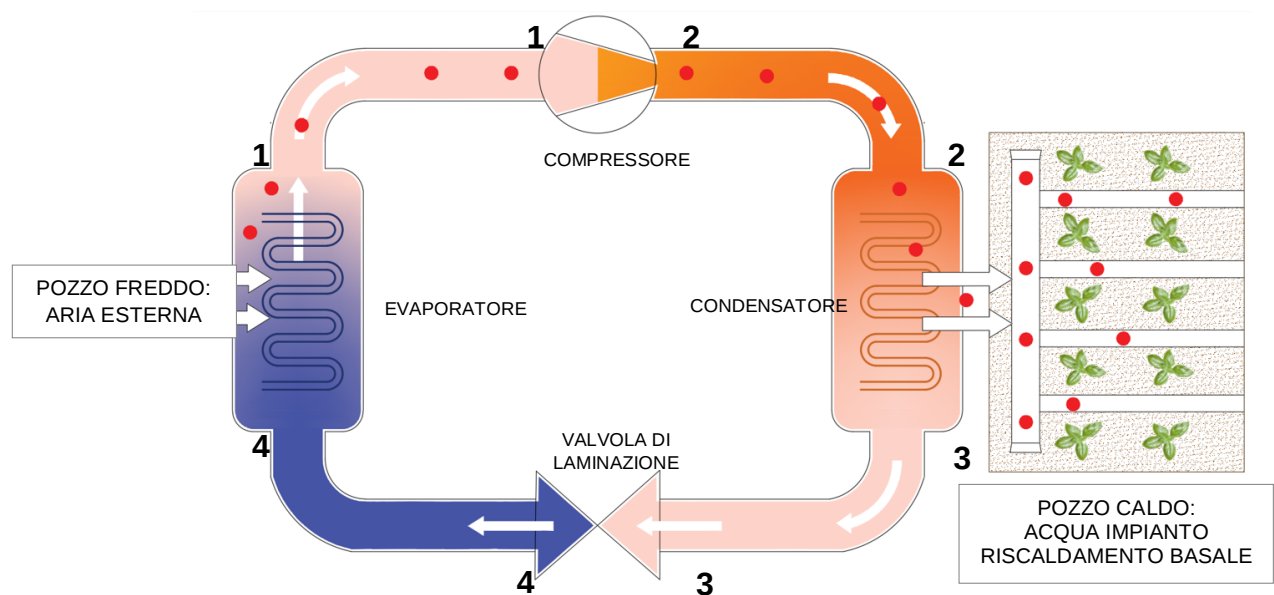


Figura 4.3 Funzionamento del ciclo frigorifero.

Il fluido frigorifero entra nel compressore allo stato gassoso e a bassa pressione e temperatura. Il compressore comprimendo il fluido allo stato gassoso ne innalza la pressione e la temperatura (Fase 1-2).

Il fluido frigorifero allo stato gassoso, dopo essere stato compresso nel compressore che ne ha innalzato la temperatura e la pressione, entra nel condensatore. Il condensatore è essenzialmente

uno scambiatore di calore a contatto con il pozzo caldo. Il fluido frigorigeno allo stato gassoso, dopo avere subito nel compressore un'innalzamento della sua temperatura, risulta avere una temperatura maggiore di quella del pozzo caldo per cui cede calore al pozzo caldo raffreddandosi e passando dalla fase gassosa a quella liquida (Fase 2-3).

Il fluido frigorigeno dopo aver subito nel condensatore un cambiamento di fase che lo ha trasformato da gassoso ad alta temperatura a liquido a bassa temperatura, entra, nella sua fase liquida all'interno della valvola di laminazione. All'interno della valvola di laminazione il fluido allo stato liquido si espande riducendo ulteriormente la sua temperatura e trasformandosi in una miscela liquido-vapore a bassa pressione e temperatura (Fase 3-4).

Il fluido frigorigeno trasformato in una miscela liquido-vapore dalla valvola di laminazione, entra a bassa pressione e temperatura nell'evaporatore. L'evaporatore, come il condensatore, è essenzialmente uno scambiatore di calore, ma a differenza del condensatore si trova a contatto con il pozzo freddo. La miscela liquido-vapore risulta avere una temperatura inferiore a quella del pozzo freddo per cui assorbe calore da questo ed evapora completamente. Il fluido frigorigeno esce dall'evaporatore allo stato di vapore a bassa temperatura e pressione ed è pronto per rientrare nel compressore e ripetere il ciclo (Fase 4-1).

L'energia termica fornita all'utenza non viene quindi prodotta, come nel caso degli impianti tradizionali, mediante la combustione di combustibili fossili, ma attraverso il trasferimento di energia che avviene con i cambi di stato del fluido refrigerante. In questa logica di funzionamento, l'unico consumo che si ha è quello elettrico dovuto alle uniche due componenti dell'impianto che assorbono energia elettrica, il compressore e le pompe di circolazione.

L'utilizzo di un impianto a pompa di calore permette quindi di produrre energia termica rinnovabile e pulita e di ridurre ulteriormente il consumo elettrico con possibilità di azzerarlo, integrando la pompa di calore con un impianto solare fotovoltaico, trasformando l'energia termica fornita all'utenza in energia termica gratuita.

4.2 Materiali e Metodi

4.2.1 Descrizione della serra utilizzata per la prova sperimentale

La sperimentazione è avvenuta presso la sede di Pescia del Crea all'interno della stessa serra utilizzata l'anno precedente, mantenuta suddivisa nelle due zone sperimentali ormai note, "Lato Aria" e "Lato Basale", di uguali dimensioni planimetriche e volumetriche. Nel "Lato Basale", accanto alla linea di coltivazione già esistente, è stata realizzata una seconda linea di coltivazione dotata anch'essa di impianto di riscaldamento basale coassiale ma alimentata dalla pompa di calore. La zona sperimentale "Lato Basale" è stata quindi suddivisa in due sottozone sperimentali denominate "Lato Basale C" quella costituita dalla linea di coltivazione riscaldata con caldaia e "Lato Basale P" quella costituita dalla linea di coltivazione riscaldata con pompa di calore. Dovendo riscaldare due volumi d'aria di diverse dimensioni, le zone sperimentali "Lato Aria" e "Lato Basale", già durante l'allestimento di BasiCal 1.0, sono state separate fisicamente tramite un telo in polietilene dello spessore di 2 mm.

Le due linee di sperimentazione nel "Lato Basale" sono state allestite utilizzando dei bancali in cemento già presenti all'interno della serra e non rimovibili. E' stato quindi necessario capire se la loro posizione fosse idonea ad evitare qualsiasi influenza reciproca (Figura 4.5). In caso contrario sarebbe stato necessario separare anche le due linee con un telo in polietilene.

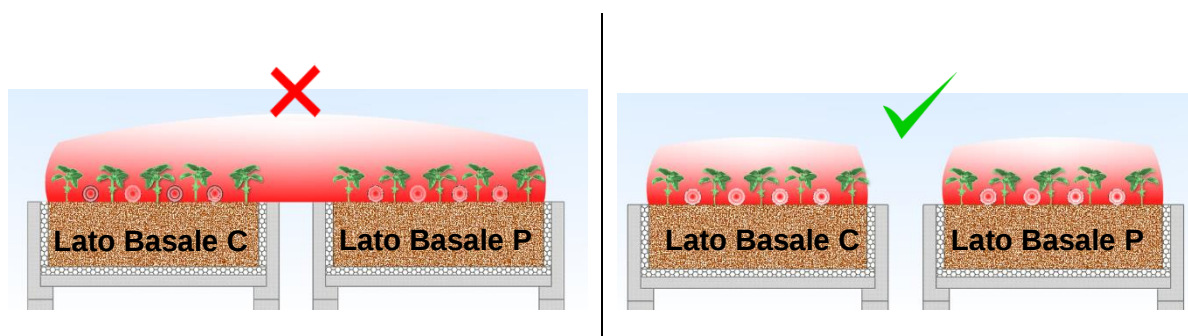


Figura 4.5 Corretto posizionamento delle linee di sperimentazione al fine di evitare influenze reciproche.

Preliminarmente all'esecuzione della sperimentazione è stata quindi misurata la temperatura dell'aria nella canopy a diverse distanze rispetto alle tubazioni coassiali. Il monitoraggio delle temperature è avvenuto per tre giorni con entrambi gli impianti accesi e impostati con gli stessi parametri usati in seguito durante la sperimentazione. Con i risultati ottenuti è stata determinata una sorta di "distanza di influenza" del riscaldamento basale (ovvero la distanza alla quale la temperatura dell'aria della canopy non risente del calore proveniente dalle tubazioni calde) che ha permesso di escludere la possibilità di eventuali influenze tra le linee di sperimentazione così come posizionate e la loro separazione mediante telo (Figura 4.6).

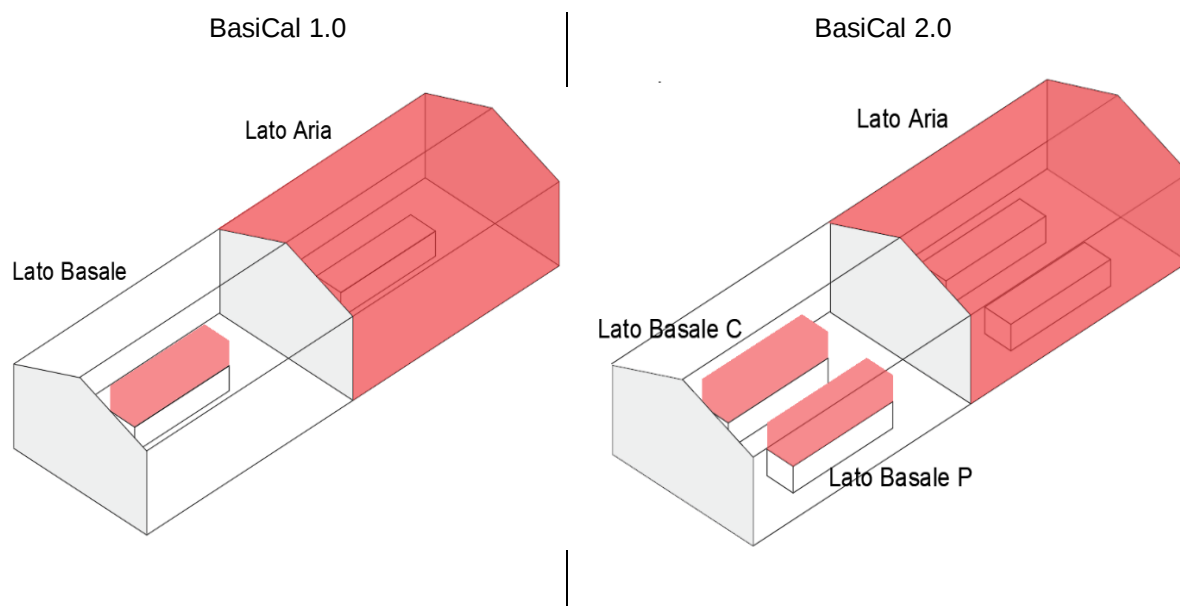


Figura 4.6 Rappresentazione dei volumi di aria riscaldati nelle tre tesi sperimentali. Confronto tra primo e secondo anno di sperimentazione.

4.2.2 Strumenti di misura dei parametri termoigrometrici dell'aria e del substrato

Contrariamente a quanto fatto durante lo svolgimento di BasiCal 1.0 per mancanza di un numero sufficiente di strumenti, in BasiCal 2.0 è stata monitorata la temperatura all'interno delle canopy delle due linee sperimentali per l'intera durata della prova con l'obiettivo di studiare la distribuzione della temperatura e il suo raggio di influenza nelle condizioni di funzionamento della caldaia e della pompa di calore previste dal protocollo BasiCal 2.0.

Nel periodo compreso tra il primo e il secondo anno di sperimentazione infatti, utilizzando i fondi disponibili sul progetto AgroEner, sono stati acquistati n° 22 datalogger del tipo **Testo** per la misura di temperatura e di umidità da integrare ai n°6 datalogger dello stesso tipo già utilizzati nella prova BasiCal 1.0.

In ciascuna linea sperimentale riscaldata con impianto basale sono stati posizionati n° 5 datalogger del tipo *Testo 175 T1* dedicati al rilievo della temperatura dell'aria nella canopy a diverse distanze dalle tubazioni calde (Fig.4.7). In particolare i datalogger sono stati posizionati ad una distanza di 5, 10, 20, 30, 40 cm rispetto alle tubazioni. L'operazione è stata effettuata mediante l'utilizzo di canne di legno alle quali i datalogger sono stati fissati.

Le distanze sono state misurate a partire dalla superficie esterna del tubo (estremo superiore) fino alla mezzeria di ogni strumento (Fig.4.8).



Figura 4.7 Datalogger all'interno delle linee sperimentali riscaldate con impianto basale.

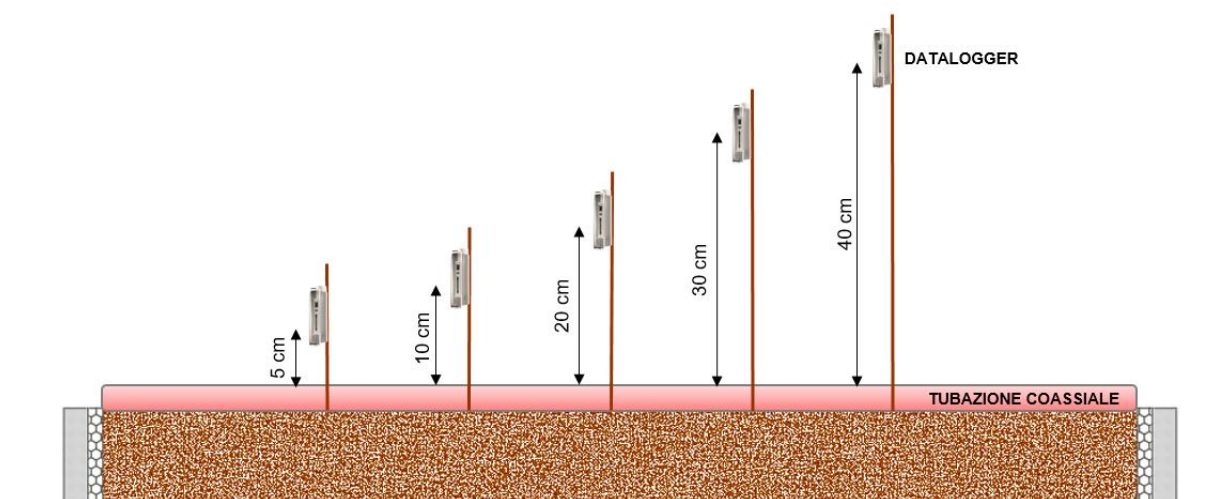


Figura 4.8 Sezione longitudinale bancale con riscaldamento basale: schema disposizione datalogger.

La disponibilità di un numero di datalogger superiore ha permesso quindi di condurre oltre alla prova sopra esposta, anche il monitoraggio di nuove grandezze come la temperatura dell'acqua circolante nelle tubazioni coassiali e quella di irrigazione. Gli strumenti utilizzati e le relative misure effettuate nelle zone sperimentali nel corso della prova BasiCal 2.0 sono sintetizzati nelle tabelle 4.1 e 4.2.

TIPO DI MISURA	STRUMENTO	N° STRUMENTI
Temperatura dell'aria ad una distanza di 20 cm dalla superficie del substrato di coltivazione	 175-T2	4
Temperatura del substrato di coltivazione ad una profondità di 5 cm		

Temperatura dell'aria ad una distanza di 100 cm dal piano di calpestio		175-H1	1
Umidità relativa dell'aria ad una distanza di 100 cm dal piano di calpestio			
Temperatura dell'aria ad una distanza di 200 cm dal piano di calpestio		VP-3 Humidity Temperature	1
Umidità relativa dell'aria ad una distanza di 200 cm dal piano di calpestio			
Contenuto volumetrico d'acqua nel substrato di coltivazione		Decagon ECH2O EC-5	1
Irraggiamento medio solare		QSO-S PAR Photon Flux	1

Tabella 4.1 BasiCal 2.0: strumenti di misura utilizzati nella tesi “Lato Aria”.

TIPO DI MISURA	STRUMENTO	N° STRUMENTI UTILIZZATI
Temperatura dell'aria ad una distanza di 20 cm dalla superficie del substrato di coltivazione		3
Temperatura del substrato di coltivazione ad una profondità di 5 cm		
Temperatura dell'aria ad una distanza di 5, 10, 20, 30 e 40 cm dalla superficie del substrato di coltivazione		5
Temperatura dell'aria ad una distanza di 100 cm dal piano di calpestio		1
Umidità relativa dell'aria ad una distanza di 100 cm dal piano di calpestio		
Temperatura dell'aria ad una distanza di 200 cm dal piano di calpestio		1
Umidità relativa dell'aria ad una distanza di 200 cm dal piano di calpestio		
Contenuto volumetrico d'acqua nel substrato di coltivazione		1
Irraggiamento medio solare		1
Temperatura dell'acqua di mandata circolante nelle tubazioni coassiali misurata all'uscita dall'impianto di generazione di calore		1
Temperatura dell'acqua di ritorno circolante nelle tubazioni coassiali misurata all'ingresso dell'impianto di generazione di calore		

Tabella 4.2 BasiCal 2.0: strumenti di misura utilizzati in ciascuna sottozona sperimentale del “Lato Basale”

La serra è stata inoltre dotata di un ulteriore datalogger del tipo *Testo 175-T2* per il rilievo della temperatura dell'acqua di irrigazione, installato all'uscita dell'acqua dalla cisterna utilizzata per effettuare la fertirrigazione. Contrariamente a quanto effettuato l'anno precedente, i dati relativi alla temperatura e all'umidità dell'aria all'esterno della serra oggetto della sperimentazione, sono stati misurati direttamente con un datalogger del tipo *Testo 175-H1* posizionato in prossimità dell'ingresso principale della serra sul lato Nord e schermato dalla radiazione solare diretta. Per tutta la durata della prova, le misure dei parametri termoisolometrici sono state acquisite con intervallo di cinque minuti e raccolti in un database Excel appositamente creato.

4.2.3 Impianto di irrigazione

Per quanto riguarda il sistema di irrigazione, la dotazione impiantistica e le modalità di gestione irrigua sono le medesime della prova Basical 1.0 (vedi paragrafo 3.1.3).

4.2.4 Impianto di riscaldamento

Come descritto in precedenza, nella seconda prova sperimentale (Basical 2.0) sono stati utilizzati tre differenti impianti di riscaldamento, due dei quali già utilizzati durante Basical 1.0 ovvero il bruciatore termoventilato mobile a pavimento del tipo Gentili Junior 85 SP e la caldaia a condensazione del tipo Ferroli Econcept 15A, entrambi dotati dei rispettivi contatori. Il terzo, a servizio della nuova linea di coltivazione introdotta nel lato basale ("Lato basale P"), costituito da una pompa di calore aria-acqua del tipo Aermec HSI080E di potenza termica terminale massima pari a 8kW, coefficiente di prestazione (C.O.P.) pari a 4,4, con alimentazione elettrica trifase e costituita da due unità. L'unità dedicata al prelievo dell'energia dall'aria esterna è stata posizionata all'esterno della serra, mentre l'unità destinata alla fornitura del calore all'acqua delle tubazioni dell'impianto basale è stata posizionata all'interno della serra (Figura 4.4).

Il monitoraggio e la registrazione dei consumi elettrici della pompa di calore è stato effettuato mediante un contatore elettrico trifase modello *ORNO*.

Come in Basical 1.0, la regolazione degli impianti e il settaggio dei termostati sono stati effettuati in modo tale da mantenere nella canopy la temperatura di 15°C desiderata.



Figura 4.4 Pompa di Calore Ferroli;
a) unità interna;
b) unità esterna.

4.2.5 Materiale vegetale e condizioni di crescita

Il protocollo di sperimentazione comprensivo delle analisi condotte in serra durante la crescita delle piante e successivamente in laboratorio a seguito di ogni sfalcio è stato il medesimo utilizzato per la prova BasiCal 1.0.

Le piante di basilico sono state seminate all'interno di plateau in data 08.01.2018 e trasferite in apposita camera di crescita (Figura 4.10). In data 13.02.2018 sono state trasferite in serra (Figura 4.11) e messe a dimora in blocchi completamente randomizzati per un totale di 780 piante nei sei bancali precedentemente preparati, due per la tesi "Lato Aria", due per quella "Lato Basale C" e due per quella "Lato Basale P".



Figura 4.10 Sviluppo delle plantule nella camera di crescita

In ogni bancale sono state trapiantate 130 piantine suddivise in 2 repliche da 65 piantine ciascuna. Anche in questa prova sono stati condotti due sfalci, uno a metà ciclo in data 21.03.17 e l'altro a fine sperimentazione in data 03.04.2018.

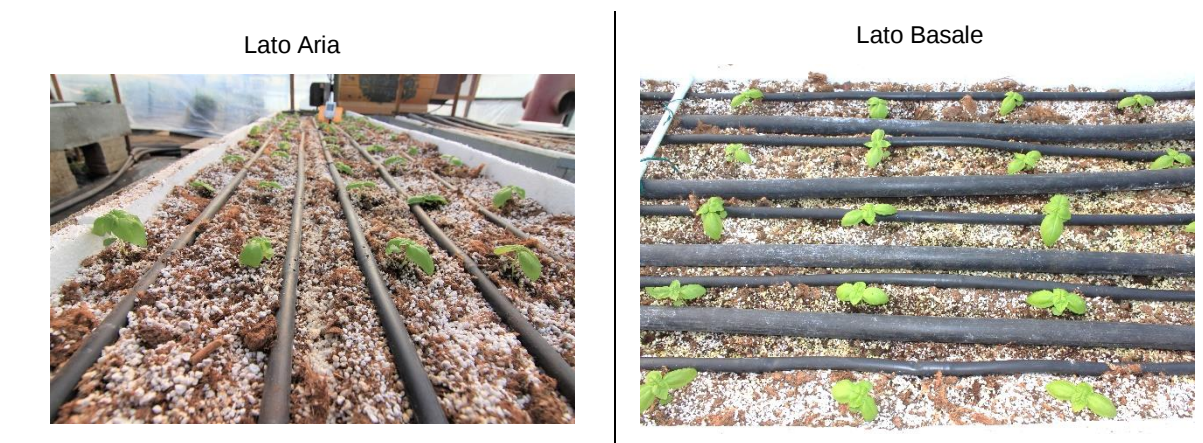


Figura 4.11 Messa a dimora delle piantine nei bancali nel Lato Aria e nel Lato Basale.

4.2.6 Elaborazione dei dati acquisiti

Analogamente all'elaborazione dei dati acquisiti nella prova Basical 1.0, i dati sono stati raccolti su un apposito database Excel in cui le misure registrate dai datalogger durante l'intero periodo di sperimentazione, sono state suddivise in periodo diurno (7:30 - 17:30) e periodo notturno (17:30 - 7:30). Per ogni datalogger sono state effettuate le medie aritmetiche dei dati registrati nei due periodi diurno e notturno.

L'analisi dei consumi degli impianti di riscaldamento ha riguardato il calcolo dell'energia consumata (E_{imp}) dai tre impianti e della relativa emissione di CO₂ equivalente in atmosfera (CO_{2e}), oltre che la determinazione dell'efficienza energetica mediante il calcolo dell'indice di indice di efficienza energetica (*EUE: Energy Use Efficiency*). I tre parametri, energia consumata (E_{imp}), CO₂ equivalente emessa in atmosfera (CO_{2e}) e indice di efficienza energetica (*EUE: Energy Use Efficiency*) sono stati introdotti e definiti al paragrafo 3.1.6.

I parametri relativi ai consumi e agli aspetti agronomici sono stati trattati utilizzando le stesse analisi statistiche utilizzate per la prova Basical 1.0 e descritte al paragrafo 3.1.6.

4.3 Esposizione e discussione dei risultati

Nei paragrafi a seguire verranno esposti tutti i risultati ottenuti con la prova sperimentale BasiCal 2.0. Tuttavia, poiché la sperimentazione risulta essere una replica della prova condotta l'anno precedente, non saranno discussi nel dettaglio tutti i risultati in quanto le considerazioni che ne derivano sono le medesime già esposte per la prova BasiCal 1.0. Saranno invece approfonditi i risultati ottenuti a seguito dell'introduzione della terza tesi sperimentale e quelli relativi alla prova per la determinazione dell'andamento della temperatura dell'aria nella canopy riscaldata da impianto basale.

4.3.1 Parametri termoigrometrici interni ed esterni alla serra

La temperatura media dell'aria esterna ($T_{m,air,out}$) è risultata pari a 8,93 °C, con un valore massimo di 23 °C e minimo di -6 °C registrati rispettivamente i giorni 2 aprile alle 14:50 e 28 febbraio alle 6:00 (Fig.4.12). La temperatura media è risultata inferiore di circa due gradi a quella registrata l'anno precedente nel medesimo periodo; in particolare in questo secondo anno di sperimentazione la temperatura dell'aria esterna durante la notte è risultata particolarmente rigida facendo registrare, soprattutto durante la terza settimana di prova, temperature al di sotto dello zero.

L'umidità relativa esterna ($H_{m,air,out}$) è risultata mediamente pari al 72,43%.

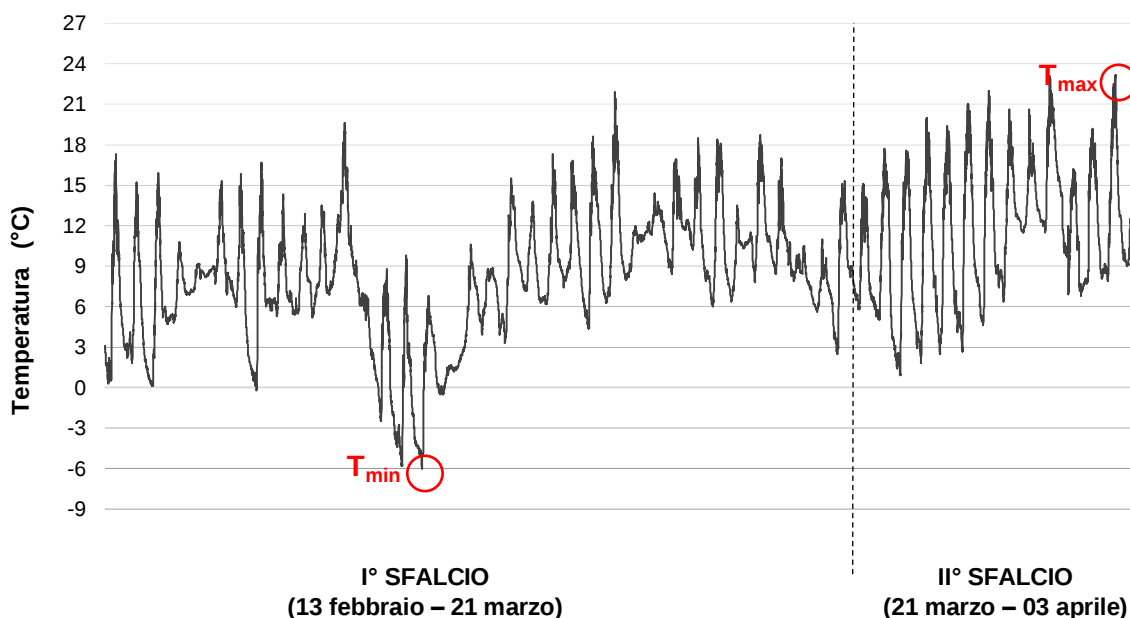


Figura 4.12 Andamento della temperatura dell'aria all'esterno della serra durante l'intero periodo di prova.

I risultati relativi ai parametri termoigrometrici interni alla serra saranno mostrati anche per BasiCal 2.0 separati in due periodi, diurno e notturno in relazione all'orario di acquisizione.

Periodo diurno

Durante l'intero periodo di prova, la temperatura media dell'aria registrata a 1 metro ($T_{m,air,1m,d}$) dalla superficie del suolo è risultata pari a 22,10 °C nel "Lato Aria" e 21,70 °C nel "Lato Basale"; la temperatura misurata a 5 cm dalla superficie del substrato di coltivazione ($T_{m,air,canopy,d}$) è stata mediamente pari a 21,85 °C nel "Lato Aria" , 21,94 °C nel "Lato Basale C" e 21,93 °C nel "Lato Basale P".

Ad una distanza di 1 metro e 2 metri dalla superficie del suolo sono state monitorate rispettivamente l'umidità relativa dell'aria interna ($H_{m,air,1m,d}$) e l'irraggiamento solare ($I_{m,2m}$). L'umidità relativa è risultata mediamente pari a 40,93% nel "Lato Aria" e 43,55% nel "Lato Basale"; l'irraggiamento solare è risultato pari 387,81 W/m² nel "Lato Aria" e 389,31 W/m² nel "Lato Basale". Per completezza in Tabella 4.3 si riportano tutti i valori medi dei parametri termoigrometrici dell'aria interna e dell'irraggiamento solare suddivisi per sfalcio e zona sperimentale.

Dall'analisi dei risultati dei parametri termoigrometrici ottenuti nel periodo diurno si può dedurre che, dal punto di vista tecnico, non sono state riscontrate differenze rilevanti tra le due zone sperimentali "Lato Aria" e "Lato Basale".

		I° SFALCIO (13 FEBBRAIO – 03 APRILE)			II° SFALCIO (21 MARZO – 03 APRILE)		
		LATO ARIA	LATO BASALE C	LATO BASALE P	LATO ARIA	LATO BASALE C	LATO BASALE P
$T_{m,air,1m,d}$	°C	19,63	18,58		24,65	24,90	
$H_{m,air,1m,d}$	%	50,97	54,81		30,89	32,30	
$I_{m,2m}$	W/m ²	249,49	250,62		526,14	528,10	
$T_{m,air,canopy,d}$	°C	19,10	19,50	19,56	24,30	24,15	24,20

Tabella 4.3 Periodo diurno: valori medi dei parametri termoigrometrici dell'aria interna e dell'irraggiamento solare suddivisi per sfalcio e zona sperimentale.

La temperatura del substrato di coltivazione ($T_{m,sub,d}$) è risultata più alta nella zona riscaldata con impianto basale rispetto a quella riscaldata con impianto ad aria a causa della diversa tipologia di riscaldamento. Per quanto riguarda i valori di temperatura del substrato delle due

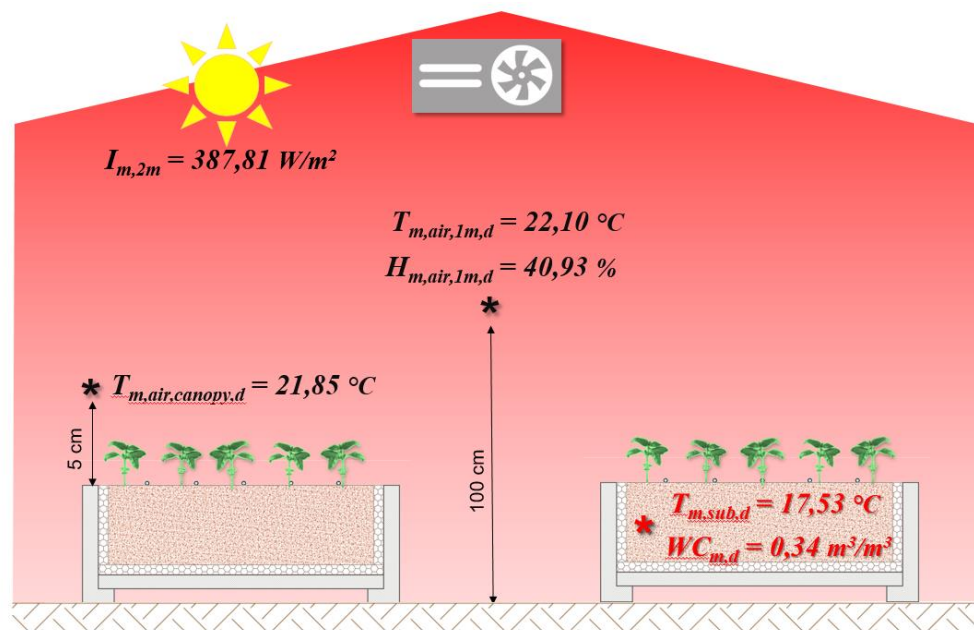
zottozone sperimentali riscaldate con impianto basale “Lato Basale C” e “Lato Basale P” non sono state riscontrate differenze tecnicamente rilevanti.

Come in BasiCal 1.0 era stato fondamentale ottenere nelle due zone sperimentali le stesse condizioni al contorno al fine di evitare che queste, se differenti, potessero falsare i risultati relativi alla quantità e qualità della produzione ottenuta, anche in BasiCal 2.0 è stato fondamentale mantenere le stesse condizioni termoigrometriche non solo tra “Lato Aria” e “Lato Basale” ma anche tra “Lato Basale C” e “Lato Basale P”. In particolare la temperatura media del substrato nell'intero periodo di prova registrata ad una profondità di 5 cm, è risultata pari a 17,53 °C nel "Lato Aria", 21,70 °C nel "Lato Basale C" e 22,20 °C nel “Lato Basale P”. Il contenuto volumetrico d'acqua ($WC_{m,d}$), registrato anch'esso ad una profondità di 5 cm è risultato mediamente pari al 0,34 m³/m³ nel “Lato Aria”, 0,27 m³/m³ nel “Lato Basale C” e nel “Lato Basale P”.

In Figura 4.13 viene rappresentata una sintesi dei valori medi diurni dei parametri termoigrometrici sopra esposti registrati durante tutto il periodo di prova nelle tre zone sperimentali.

LATO ARIA

13.02.18 – 03.04.18 - DIURNO



LATO BASALE e sottozone LATO BASALE C e LATO BASALE P

13.02.18 – 03.04.18 - DIURNO

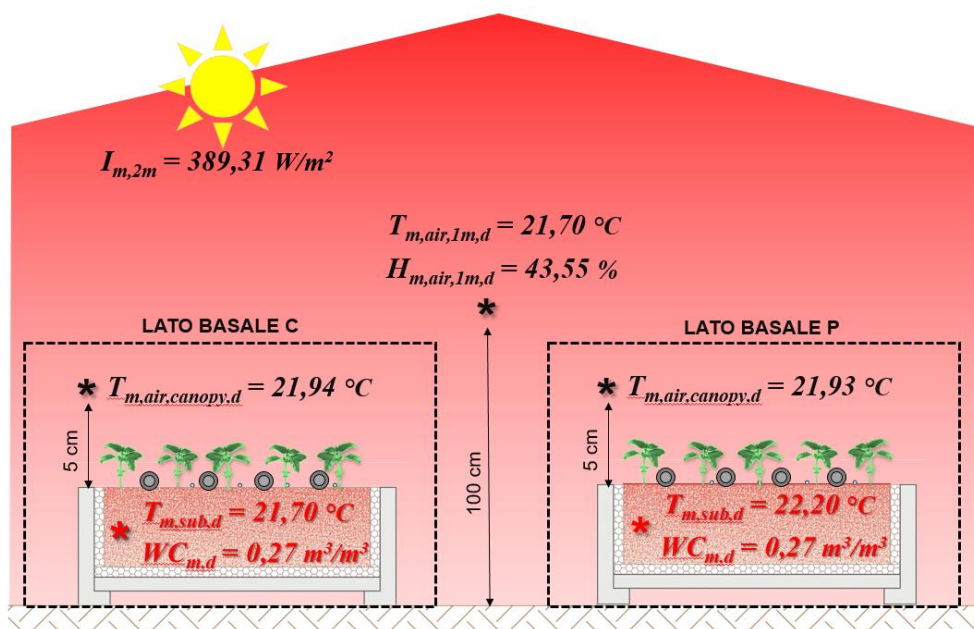


Figura 4.13 Sintesi dei valori medi diurni dei parametri termoigrometrici registrati durante i 50 giorni di prova per ciascuna zona sperimentale. In rosso sono indicati i due parametri la cui differenza nelle due tesi sperimentali “Lato Aria” e “Lato Basale” è risultata tecnicamente rilevante.

Periodo notturno

E' necessario ricordare nuovamente che la presenza dell'irraggiamento solare, come unica fonte di riscaldamento dell'aria interna alla serra, determina una sostanziale uguaglianza in termini di condizioni termoigrometriche delle zone sperimentali. Di notte invece l'unica fonte di riscaldamento è rappresentata dagli impianti che, essendo diversi per tipologia e modalità di diffusione del vettore termico, fanno registrare condizioni termoigrometriche diverse tra "Lato Aria" e "Lato Basale", eccetto che nella zona della canopy dove la temperatura, secondo il protocollo di sperimentazione, viene mantenuta a 15 °C (con le limitazioni del caso già trattate nel paragrafo 3.1.4). La temperatura misurata a 5 cm dalla superficie del substrato di coltivazione ($T_{m,air,canopy,n}$) è stata infatti mediamente pari a 15,13 °C nel "Lato Aria", 15,25 °C nel "Lato Basale C" e 15,18 °C nel "Lato Basale P". La temperatura media ($T_{m,air,1m,n}$) e l'umidità relativa dell'aria interna ($H_{m,air,1m,n}$) misurate ad 1 metro dalla superficie del suolo sono risultate tecnicamente diverse e pari rispettivamente a 15,18 °C e 60,18% nel "Lato Aria" e 12,33 °C e 74,11% nel "Lato Basale". Per completezza in Tabella 4.4 si riportano tutti i valori medi dei parametri termoigrometrici dell'aria interna suddivisi per sfalcio e zona sperimentale.

		I° SFALCIO (13 FEBBRAIO – 03 APRILE)			II° SFALCIO (21 MARZO – 03 APRILE)		
		LATO ARIA	LATO BASALE C	LATO BASALE P	LATO ARIA	LATO BASALE C	LATO BASALE P
$T_{m,air,1m,n}$	°C	15,06	12,16		15,30	12,50	
$H_{m,air,1m,n}$	%	60,18	74,11		56,49	69,29	
$T_{m,air,canopy,n}$	°C	14,88	14,90	14,87	15,39	15,60	15,35

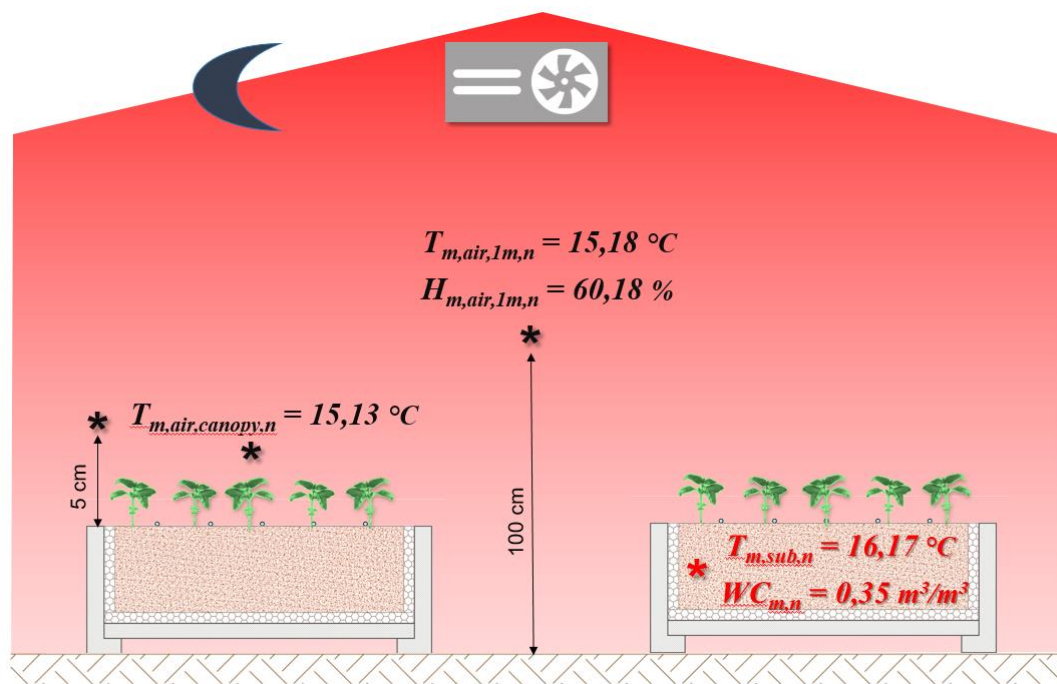
Tabella 4.4 Periodo notturno: valori medi dei parametri termoigrometrici dell'aria interna suddivisi per sfalcio e zona sperimentale.

La temperatura del substrato di coltivazione ($T_{m,sub,n}$) è risultata maggiore nelle due linee riscaldate con impianto basale rispetto a quella riscaldata con impianto ad aria. Ovviamente i valori registrati nelle due sottozone "Lato Basale C" e "Lato Basale P" non sono risultati differenti per le ragioni già esposte per il periodo diurno. In particolare la temperatura del substrato, registrata a 5 cm di profondità, è risultata pari a 16,17 °C nel "Lato Aria", 21 °C e 21,5 °C rispettivamente nel "Lato Basale C" e "Lato Basale P". Il contenuto volumetrico d'acqua ($WC_{m,n}$), registrato anch'esso ad una profondità di 5 cm è risultato mediamente pari a 0,35 m³/m³ nel "Lato Aria", 0,28 m³/m³ nel "Lato Basale C" e nel "Lato Basale P".

In Figura 4.14 viene rappresentata una sintesi dei valori medi notturni dei parametri termoigrometrici sopra esposti registrati durante tutto il periodo di prova nelle tre zone sperimentali.

LATO ARIA

13.02.18 – 03.04.18 - NOTTURNO



LATO BASALE e sottozone LATO BASALE C e LATO BASALE P

13.02.18 – 03.04.18 - NOTTURNO

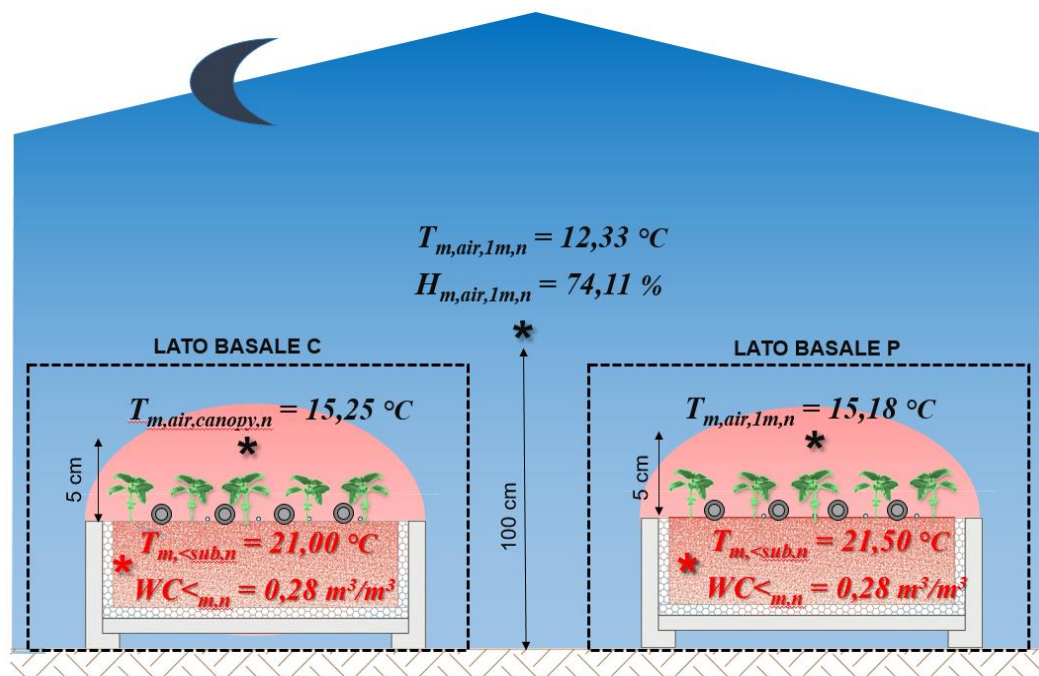


Figura 4.14 Sintesi dei valori medi notturni dei parametri termoigrometrici registrati durante la prova per ciascuna zona sperimentale. In rosso sono indicati i due parametri la cui differenza nelle due tesi sperimentali “Lato Aria” e “Lato Basale” è risultata tecnicamente rilevante.

4.3.2 Monitoraggio della temperatura nella canopy nel “Lato Basale”.

Nelle sette settimane di sperimentazione è stata monitorata la temperatura all'interno della canopy nelle due sottozone sperimentali “Lato Basale C” e “Lato Basale P” allo scopo di determinare la “distanza di influenza del riscaldamento”, ovvero la distanza alla quale la temperatura dell'aria della canopy non risente del calore proveniente dalle tubazioni calde.

Nel periodo diurno (ore 7:30-17:30) con impianto di riscaldamento spento, in presenza quindi del solo irraggiamento solare, la temperatura della canopy registrata in ognuno dei cinque punti di rilievo per entrambe le sottozone sperimentali è risultata in linea con la temperatura media dell'aria in serra ($T_{m,air,1m,d}$) pari a 21,70 °C (Fig.4.15).

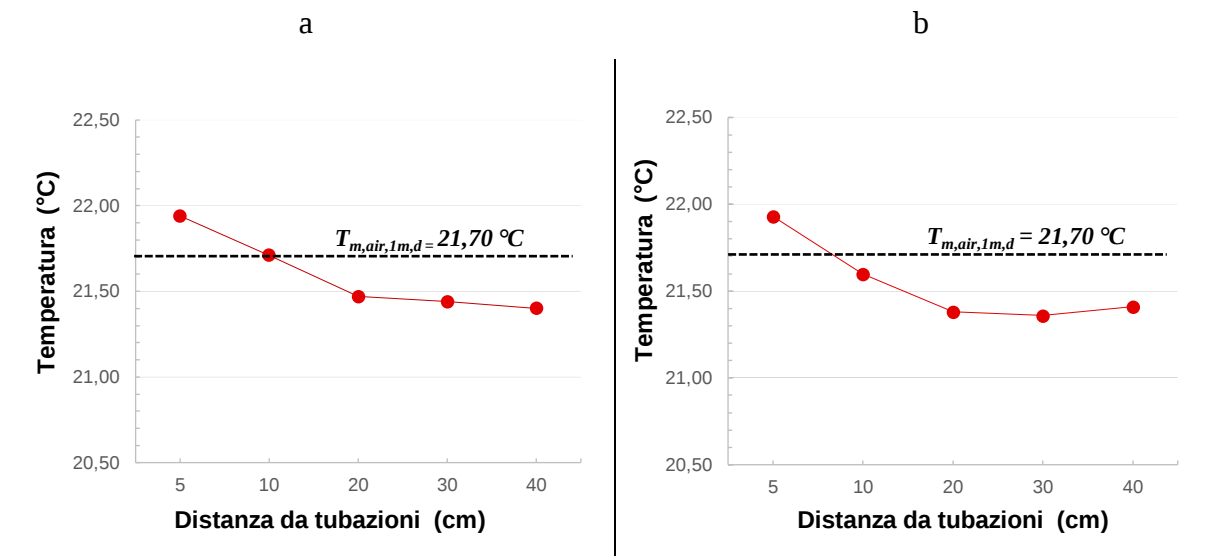


Figura 4.15 Periodo diurno: andamento della temperatura nella canopy nei cinque punti di rilievo;
a) Sottozona “Lato Basale C” alimentata da caldaia;
b) Sottozona “Lato Basale P” alimentata da pompa di calore.

Il gradiente di temperatura di circa 0,5 °C che si registra tra i 5 e i 40 cm è dovuto al rilascio nelle ore diurne, del calore immagazzinato dal substrato di coltivazione durante le ore notturne per effetto dell'accensione del riscaldamento basale.

Nel periodo notturno invece (ore 17.30-7:30) a seguito dell'accensione dell'impianto di riscaldamento, si registrano nella canopy temperature maggiori rispetto alla temperatura dell'aria in serra ($T_{m,air,1m,n}$) risultata mediamente pari a 12,33 °C (Fig.4.16).

Non sono emerse particolari differenze nell'andamento della temperatura all'interno della canopy tra le sottozone sperimentali a confronto; la temperatura media della canopy registrata a 5, 10, 20, 30 e 40 cm rispetto alle tubazioni è risultata infatti rispettivamente pari a 15,6, 14,42, 13,54, 13,28, 12,97 °C per il “Lato Basale C” e 15,03, 14,06, 13,25, 12,98, 12,97 °C per il “Lato Basale P”.

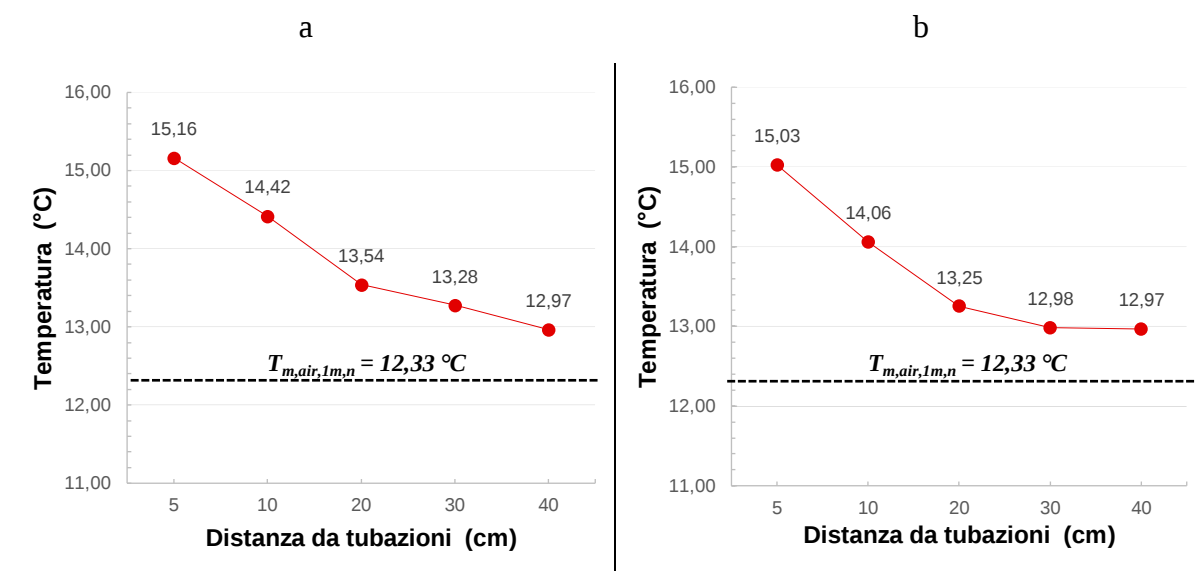


Figura 4.16 Periodo notturno: andamento della temperatura nella canopy nei cinque punti di rilievo;
 a) Sottozona “Lato Basale C” alimentata da caldaia;
 b) Sottozona “Lato Basale P” alimentata da pompa di calore.

Dalla figura 4.16 emerge come, allontanandosi dalla sorgente di calore rappresentata dalle tubazioni coassiali, la temperatura dell’aria all’interno della canopy diminuisca progressivamente tendendo ad allinearsi con la temperatura dell’aria in serra. Questo significa che, nelle condizioni sperimentali di protocollo, la temperatura dell’aria nella canopy risente dell’influenza delle tubazioni calde fino ad una distanza (distanza di influenza del riscaldamento) di circa 40-50 cm dalle tubazioni stesse in accordo con le dimensioni massime di sviluppo delle piante di basilico.

Nelle **ore diurne** per tutta la durata della sperimentazione, lo sviluppo delle piante di basilico (dal trapianto in serra al secondo sfalcio) coltivate nelle tre tesi sperimentali, è avvenuto all’interno di una canopy caratterizzata dalla medesima temperatura compresa tra i 21,50 e i 22 °C.

Nelle **ore notturne** invece, per l’ormai noto diverso comportamento dei due impianti, le piante coltivate con riscaldamento ad aria si sono sviluppate per tutta la durata della sperimentazione all’interno di una canopy con temperatura mediamente costante in ogni punto e pari a 15,13 °C, mentre quelle coltivate con impianto basale (sia alimentato da caldaia che da pompa di calore) all’interno di una canopy con temperatura variabile compresa tra 15 °C in prossimità delle tubazioni e 13 °C ad una distanza dalle tubazioni di circa 40 cm (Fig. 4.17- 4.19).

LATO ARIA

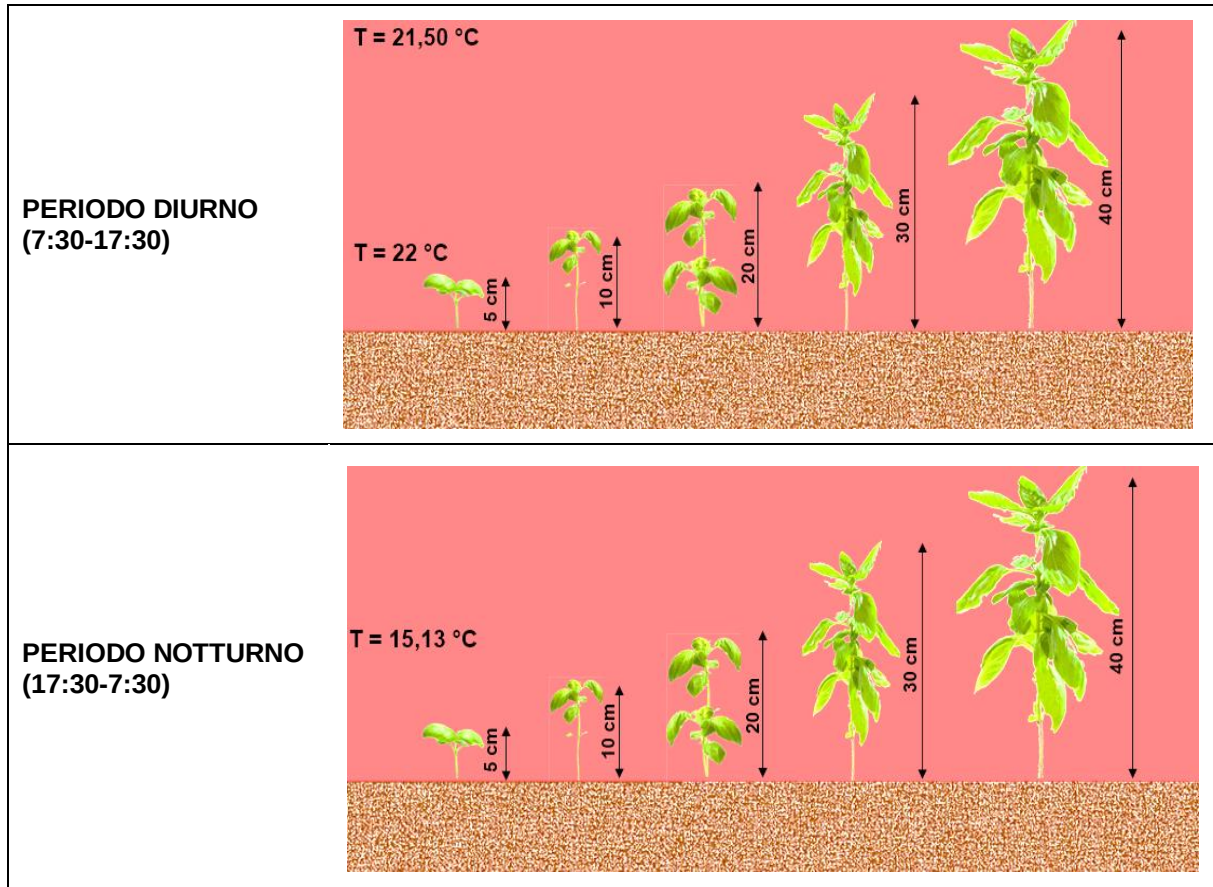
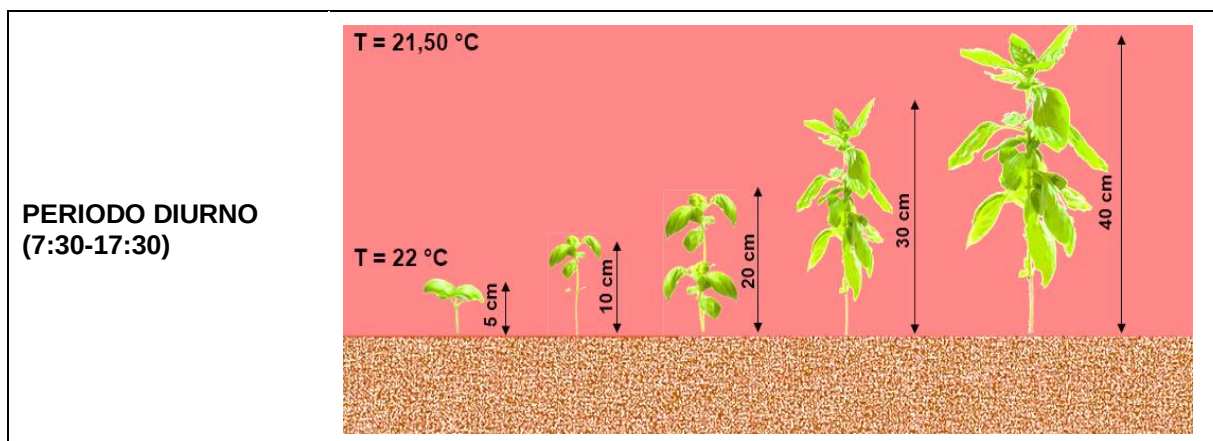


Figura 4.17 Lato Aria: condizioni di crescita delle piante nelle ore diurne e notturne in termini di temperatura nella canopy.

LATO BASALE C



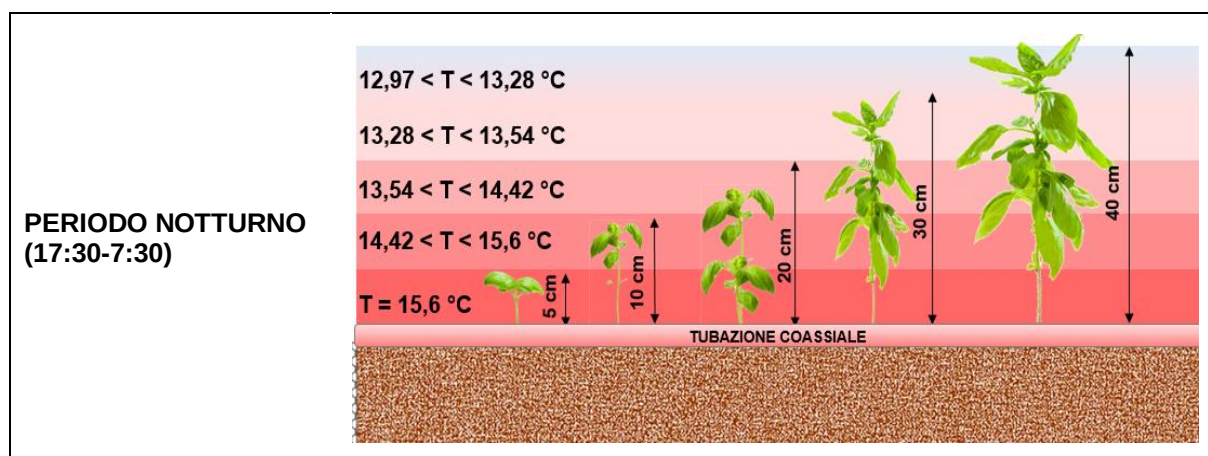


Figura 4.18 Lato Basale C: condizioni di crescita delle piante nelle ore diurne e notturne in termini di temperatura nella canopy.

LATO BASALE P

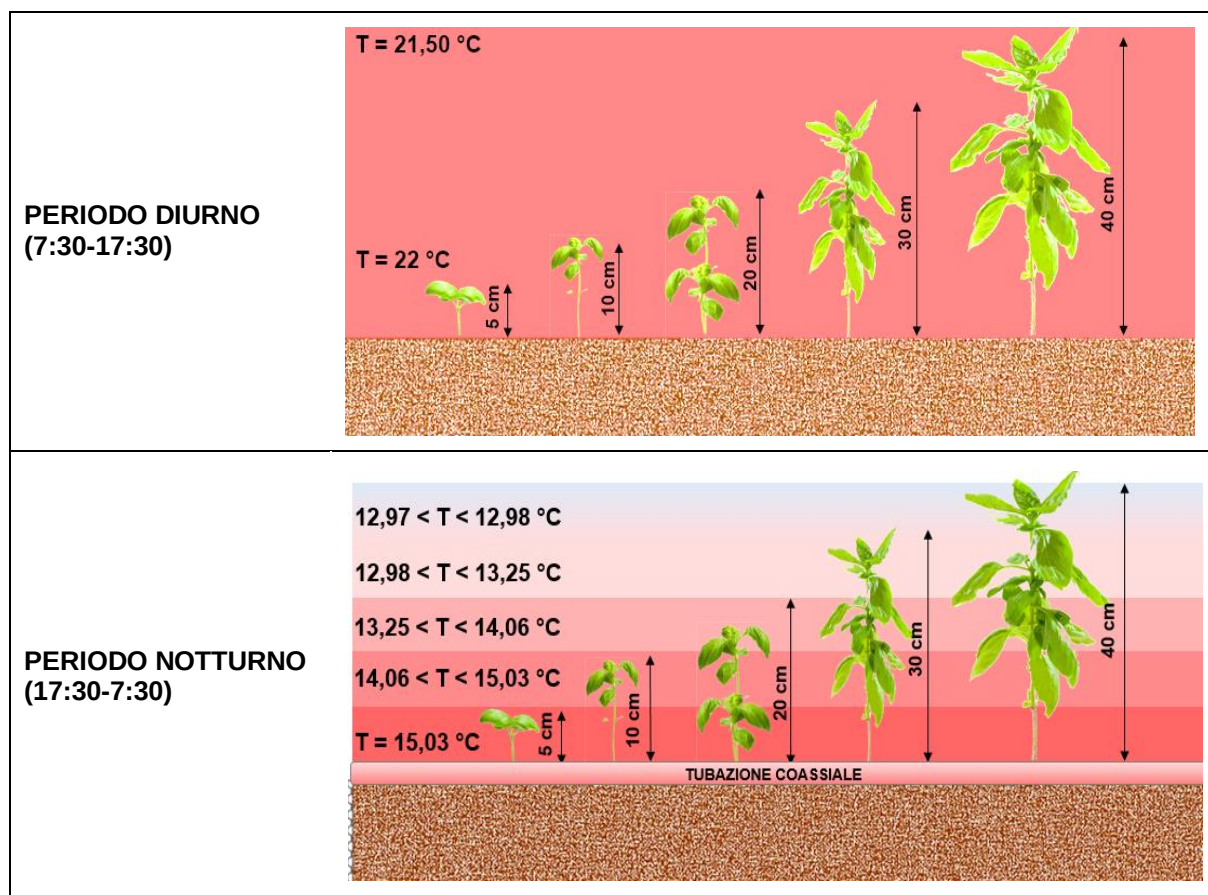


Figura 4.19 Lato Basale P: condizioni di crescita delle piante nelle ore diurne e notturne in termini di temperatura nella canopy.

Emerge quindi che le piante di basilico delle tre tesi sperimentali si sono sviluppate nelle medesime condizioni di temperatura della canopy durante le ore diurne per tutto il periodo della sperimentazione, e nelle ore notturne soltanto nei primi quindici giorni dopo il trapianto fino al

raggiungimento di uno sviluppo in altezza pari a circa 10-15 cm. Superata questa soglia, le piante “Lato Aria” hanno proseguito il loro sviluppo fino al primo sfalcio e per il successivo periodo fino al secondo sfalcio, all’interno di una canopy con temperatura media intorno ai 15 °C, mentre le piante “Lato Basale C” e “Lato Basale P” in una canopy con temperatura inferiore di circa 1-2 °C.

4.3.3 Parametri agronomici: analisi quantitativa e qualitativa

Scopo di BasiCal 2.0 è quello di replicare la prova condotta l’anno precedente al fine di confermare o meno i risultati ottenuti. Come primo step, è stato quindi verificato che la produzione in termini quantitativi e qualitativi ottenuta riscaldando soltanto il volume della canopy fosse paragonabile a quella ottenuta riscaldando l’intero volume di serra e inoltre, relativamente alla terza tesi sperimentale, che la produzione ottenuta sulla linea di coltivazione riscaldata con basale alimentato da pompa di calore fosse paragonabile a quella ottenuta sulla linea riscaldata con basale alimentato da caldaia.

Dall’analisi dei risultati ottenuti con le analisi dei rilievi distruttivi della parte aerea, emerge che la produzione di basilico ottenuta riscaldando soltanto il volume della canopy (impianto basale) è risultata significativamente maggiore di quella ottenuta riscaldando l’intero volume di serra (impianto ad aria) in termini di peso secco (Dw), fresco (Fw) e biomassa totale (B_T), confermando in questa seconda prova anche statisticamente una tendenza già evidente nei risultati ottenuti con BasiCal 1.0.

Non si sono invece registrate differenze significative in termini di produzione per le due sottozone sperimentali “Lato Basale C” e “Lato Basale P”. Nel “Lato Basale C” infatti si sono registrati valori di peso secco e fresco rispettivamente pari a 31,56 g/m² e 357,74 g/m² nel I° sfalcio e 129,67 g/m² e 1508,26 g/m² nel II° sfalcio mentre nel “Lato Basale P” pari a 38,45 g/m² e 413,31 g/m² nel I° sfalcio e 123,18 g/m² e 1491,25 g/m² nel II° sfalcio. Tutti i valori sopra esposti sono invece risultati significativamente maggiori rispetto a quelli registrati nel “Lato Aria” dove il peso secco e il peso fresco sono risultati a pari a 19,18 g/m² e 188,02 nel I° sfalcio e 88,52 g/m² e 1000,18 g/m² nel II° sfalcio.

Anche la biomassa totale, valutata considerando l’intera produzione ottenuta nei due sfalci, è risultata significativamente superiore nelle linee riscaldate con impianto basale con valori di 177,06 g/m² nel “Lato Basale C” e 178,02 g/m² nel “Lato Basale P” rispetto ai 118,39 g/m² ottenuti nel “Lato Aria” (Fig. 4.20).

L’ordine di grandezza dei risultati sopra esposti è in linea con quello relativo ai risultati ottenuti in BasiCal 1.0.

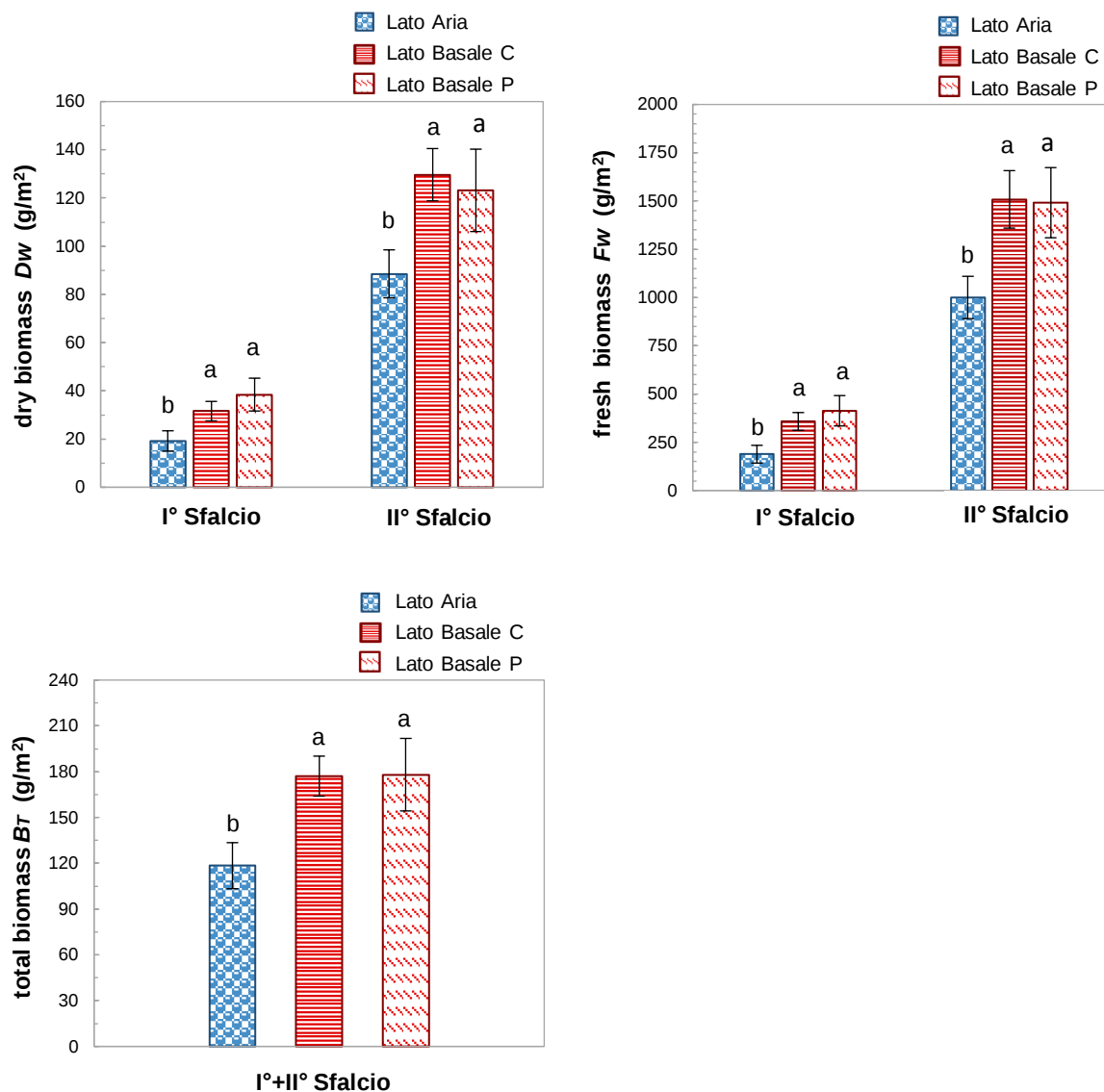


Figura 4.20 Analisi statistica dei rilievi distruttivi della parte aerea.
 $P \leq 0,05$

Le analisi finalizzate alla valutazione qualitativa della produzione di basilico ottenuta hanno confermato quanto già emerso con la prova BasiCal 1.0. In particolare, non sono emerse significative differenze tra “Lato Basale” e “Lato Aria” e anche tra le due sottozone sperimentali “Lato Basale C” e “Lato Basale P” in termini di indice SPAD, fotosintesi netta, conduttanza stomatica, traspirazione fogliare e contenuti di clorofilla e carotenoidi. Nuovamente l’assorbimento di alcuni dei principali macroelementi come fosforo e potassio è risultato significativamente maggiore nelle piante riscaldate con impianto basale rispetto a quelle riscaldate con impianto ad aria.

Non si sono registrate invece significative differenze in termini di assorbimento nelle piante delle due sottozone sperimentali “Lato Basale C” e “Lato Basale P”. In figura 4.21 alcune immagini delle piante coltivate nelle tre zone sperimentali prima del secondo e ultimo sfalcio.

LATO ARIA – impianto ad aria



LATO BASALE C e LATO BASALE P – impianto coassiale



Figura 4.21 Piante di basilico prima del secondo e ultimo sfalcio del 3 aprile 2018.

4.3.4 Parametri energetici

La determinazione dell'indice di efficienza energetica (*EUE: Energy Use Efficiency*) per i tre impianti a confronto sperimentati è stata effettuata anche per la prova Basical 2.0 partendo dall'analisi dei consumi di combustibile registrati dai contatori a servizio di ogni impianto. In particolare sono stati analizzati i consumi in termini di litri di gasolio e di GPL rispettivamente per il “Lato Aria” e il “Lato Basale C” servito dalla caldaia a condensazione e di kWh di energia elettrica per il “Lato Basale P” servito dalla pompa di calore che, come già illustrato nel paragrafo 4.1, non è alimentata da alcun combustibile fossile.

Per quanto riguarda il consumo di combustibili fossili, nel “Lato Aria” sono stati consumati 1389 l di gasolio durante il I° sfalcio e 356 l durante il II° sfalcio, per un totale di 1745 l di combustibile; nel “Lato Basale C” sono stati invece utilizzati 384 l di GPL durante il I° sfalcio e 96 l di GPL durante il II° sfalcio, per un totale di 480 l di combustibile. Dai consumi di combustibile è stata calcolata, secondo la formula 3.1, l'Energia consumata (E_{imp}) risultata pari a 12.038.988,60 kcal e 3.089.294,40 kcal rispettivamente nei I° e nel II° sfalcio per un totale di 15.128.283 kcal nel “Lato Aria” e pari a 2.105.937,45 kcal e 527.883,93 kcal rispettivamente nei I° e nel II° sfalcio per un totale di 2.633.821,38 kcal nel “Lato Basale C”.

Per quanto riguarda il “Lato Basale P”, i consumi registrati per la pompa di calore sono già valori di energia consumata, per cui, al contrario dei due combustibili utilizzati (GPL e gasolio agricolo), non è necessario effettuare alcuna trasformazione. In particolare sono stati consumati complessivamente 1527,65 kWh (corrispondenti a 1.313.542,58 kcal) di cui: 1233,36 kWh durante il I° sfalcio (corrispondenti a 1.060.498,73 kcal) e 294,29 kWh durante il II° sfalcio (corrispondenti a 253.043,86 kcal).

Considerando un costo unitario del Gasolio agricolo pari a 0,75 €/l, del GPL pari a 0,85 €/l e dell'energia elettrica pari a 0,082 €/kWh, il costo sostenuto per il combustibile è stato per il “Lato Aria” pari a circa 1308 €, per il “Lato Basale C” pari a circa 407 € mentre per il “Lato Basale P” pari a circa 125 €.

Si osservi che i costi unitari di combustibile ed energia elettrica per uso non domestico sono stati assunti pari ai valori medi italiani relativi all'anno 2017 pubblicati nel database dell'ufficio statico dell'Unione Europea (EUROSTAT).

Le emissioni di CO₂ equivalente in atmosfera dovute ai consumi dei tre sistemi di riscaldamento (formula 3.4) sono risultate complessivamente pari a 4662,5 kgCO₂ nel “Lato Aria” e 722,9 kgCO₂ nel “Lato Basale C” mentre nel “Lato Basale P” sono risultate pari a 542,3 kgCO₂.

Il fattore di produzione della CO₂ equivalente è stato assunto pari 0.265 kgCO₂eq/kWh per il gasolio [48], 0.236 kgCO₂eq/kWh per il gpl [49] e 0.355 kgCO₂eq/kWh per l'energia elettrica [49].

Analogamente alla prova Basical 1.0 l'Energy Use Efficiency è stato determinato in relazione alla biomassa fresca e secca ($EUE_{F,totalbiomass}$, $EUE_{D,totalbiomass}$) prodotta nelle tre zone sperimentali. Anche in questo caso, per il calcolo dell'EUE, sia la produzione ottenuta che le calorie fornite sono state normalizzate rispetto ai m² di superficie coltivata.

In particolare l'EUE relativo alla biomassa fresca ($EUE_{F,totalbiomass}$) è risultato pari a: 13,50 g/cal nel "Lato Aria", 23,92 g/cal nel "Lato Basale C" e 46,16 g/cal nel "Lato Basale P". L'EUE relativo alla biomassa secca, invece è risultato pari a 0,78 g/cal nel "Lato Aria", 2,13 g/cal nel "Lato Basale C" e 4,04 g/cal nel "Lato Basale P".

Per consentire una migliore lettura dei risultati ottenuti dall'analisi dei parametri energetici, questi sono stati riportati in Tabella 4.5.

	LATO ARIA	LATO BASALE C	LATO BASALE P
<i>Fonte di energia</i>	Gasolio	GPL	Energia elettrica
<i>Consumi di combustibile</i>			
I° sfalcio	1389 l	384 l	-
II° sfalcio	356 l	96 l	-
Totale	1745 l	480 l	-
<i>Energia consumata (E_{imp})</i>			
I° sfalcio	12.038.988,6 kcal	2.105.937,5 kcal	1233,4 kWh
II° sfalcio	3.089.294,4 kcal	527.883,9	294,3 kWh
Totale	15.125.283,0 kcal (4662,5 kWh)	2.633.821,4 kcal (3063,1 kWh)	1527,7 kWh
<i>Costi sostenuti</i>			
Costo unitario	0,75 €/l	0,85 €/l	0,085 €/kWh
Totale	1308 €	407 €	125 €
<i>CO₂ equivalente emessa</i>			
Fattore di produzione	0,265 kgCO ₂ /kWh	0,236 kgCO ₂ /kWh	0,355 kgCO ₂ /kWh
Totale	4662,5 kgCO ₂	722,9 kgCO ₂	542,3 kgCO ₂
<i>Energy Use Efficiency (EUE)</i>			
Biomassa fresca	13,50 g/cal	23,92 g/cal	46,16 g/cal
Biomassa secca	0,78 g/cal	2,13 g/cal	4,04 g/cal

Tabella 4.5 Sintesi dei risultati dei parametri energetici ottenuti.

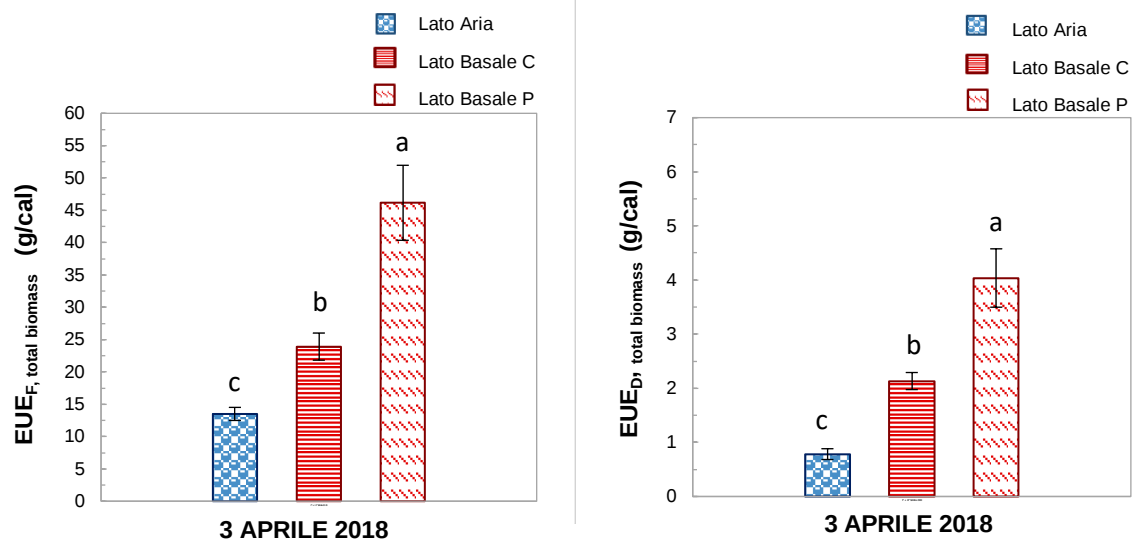


Figura 4.22 Analisi statistica dell'indice di efficienza energetica per peso fresco e secco
 * $P \leq 0,05$.

Capitolo 5.

Sperimentazione complementare: studio della diffusione del calore all'interno del substrato di coltivazione al variare della posizione dell'impianto coassiale.

Le prove BasiCal 1.0 e 2.0 sono state condotte utilizzando un'impianto a tubazioni coassiali precedentemente realizzato e dimensionato per lo svolgimento della sperimentazione Florener condotta nel biennio 2008-2009. L'obiettivo di BasiCal infatti non era quello di ideare un sistema innovativo di riscaldamento basale ma quello di sperimentarne un utilizzo alternativo a quello comunemente diffuso utilizzando l'impianto a disposizione.

Successivamente, al termine delle due prove già ampiamente discusse nei capitoli precedenti, grazie all'incremento del numero di strumenti di misura avvenuta soltanto a partire dal secondo anno di sperimentazione, è nata l'idea di approfondire il funzionamento dell'impianto utilizzato con lo scopo di fornire ad un eventuale agricoltore che volesse investire su un impianto di questo tipo, indicazioni precise circa le diverse possibilità di utilizzo dell'impianto, le diverse modalità di riscaldamento che ne derivano (substrato o canopy) e il numero approssimativo di tubazioni da installare per ciascuna applicazione. Per questo è stata analizzata sia la modalità di diffusione del calore sia la quantità di calore diffuso da una sola tubazione all'interno del substrato di coltivazione al variare della posizione della stessa rispetto al substrato. L'analisi delle differenze di temperatura registrate in più punti in due substrati a confronto, uno riscaldato e uno no, ha permesso di determinare graficamente mediante mappe di temperatura, la *zona di influenza dell'impianto*, ovvero quella zona nella quale la temperatura del substrato risente del calore ceduto dalla tubazione. Le mappature di temperatura del substrato, determinate per ognuna delle posizioni della tubazione sperimentate, possono essere considerate punto di partenza per il dimensionamento di un impianto basale coassiale da realizzarsi in zone climaticamente simili a quella in cui sono state condotte le sperimentazioni.

5.1 Materiali e metodi

La prova è stata condotta all'interno della solita serra utilizzata per le sperimentazioni BasiCal utilizzando due bancali in cemento, uno servito da impianto di riscaldamento basale, l'altro privo di riscaldamento (tesi di controllo). Entrambi i bancali sono stati rivestiti internamente con pannelli isolanti di polistirolo dello spessore di 30 mm e riempiti con una miscela di torba e perlite 50:50 V/V. Il pannello posizionato sul fondo del banchale è stato forato per consentire il corretto drenaggio dell'acqua di irrigazione. I bancali sono stati dotati di un impianto di microirrigazione a tubi gocciolanti in polietilene di diametro esterno 10 mm, portata 2 l/h e passo 30 cm. Sulla superficie del substrato di ciascun banchale sono stati disposti cinque tubi gocciolanti ad una distanza di circa 12 cm l'uno dall'altro in modo da garantire un'irrigazione uniforme del substrato (Fig.5.1). Gli interventi irrigui sono stati gestiti in frequenza e volume, mediante elettrovalvola collegata ad un timer, per mantenere un VWC (volumetric water content) nel substrato pari a 0,30-0,35 m³/m³. Tale valore deriva da prove sperimentali effettuate precedentemente in laboratorio volte a determinare la capacità di campo del substrato tramite curva di ritenzione idrica.

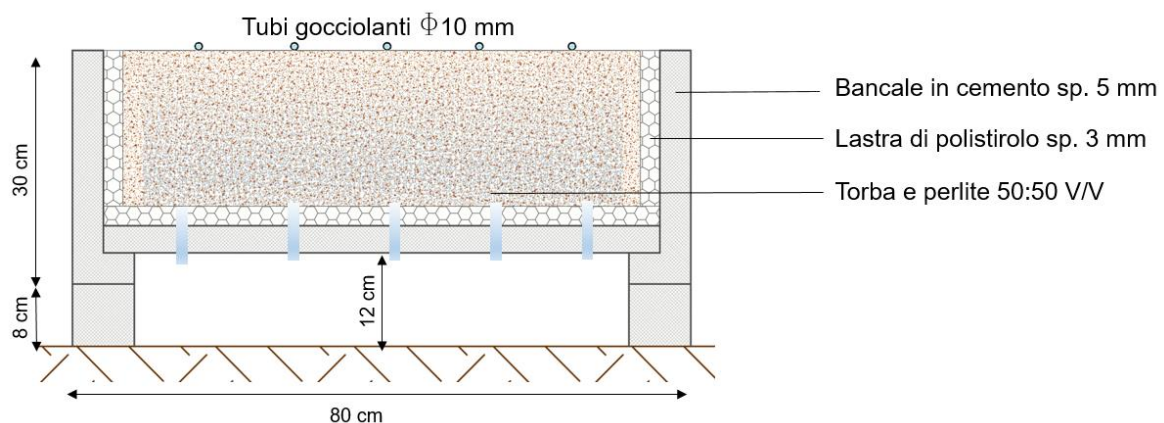


Figura 5.1 Sezione del banchale tipo utilizzato per la sperimentazione.

Il monitoraggio della temperatura all'interno della “sezione tipo” del substrato è avvenuto per ciascuna tesi (banchale riscaldato e banchale non riscaldato), mediante l'utilizzo di n° 21 datalogger del tipo *Testo 175 T2* con sonda esterna fissa con manicotto in alluminio NTC. Le sonde sono state posizionate all'interno della sezione di substrato in modo tale da formare una griglia di punti di rilievo di dimensione tale da coprire tutta l'area da monitorare (Fig. 5.2). La realizzazione della griglia è avvenuta mediante l'utilizzo di canne in legno affondate nel substrato di coltivazione alle quali sono state agganciate le sonde adeguatamente distanziate (Fig. 5.3).

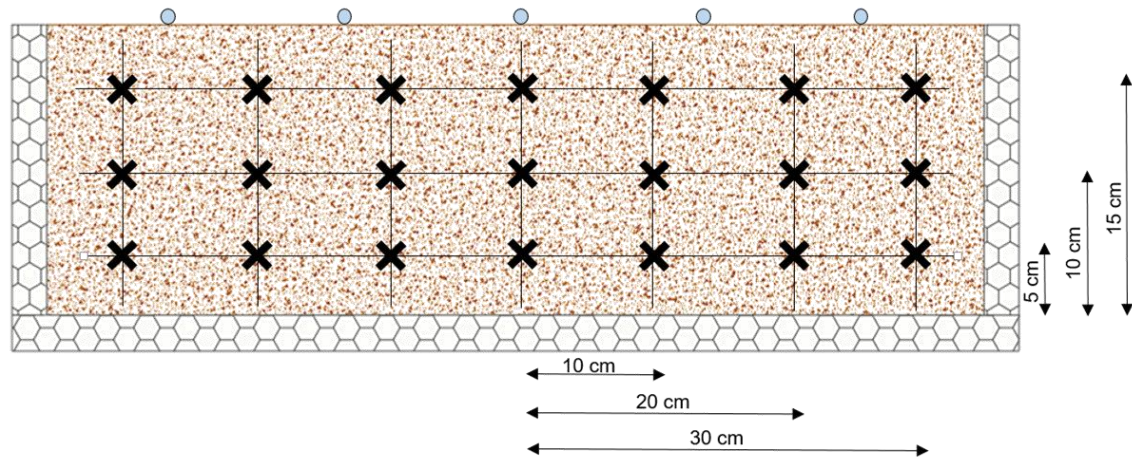


Figura 5.2 Schema posizionamento sonde all'interno della sezione di substrato da monitorare.



Figura 5.3 Realizzazione della griglia di sonde all'interno del bancale.

Il monitoraggio della temperatura dell'aria in serra e dell'irraggiamento solare è stato effettuato utilizzando datalogger rispettivamente del tipo **Testo 175 H1** e **Decagon EM 50 con sonda QSO-S PAR Photon Flux**. I datalogger per il rilievo della temperatura dell'aria e dell'irraggiamento sono stati installati al centro della serra rispettivamente ad una distanza di 1,5m e 2 m dal piano di calpestio. Tutti i datalogger sono stati impostati per acquisire dati con un intervallo di registrazione di 5 minuti.

Il riscaldamento del bancale è stato realizzato tramite n° 1 tubazione coassiale in PE (polietilene) di diametro pari a 16 cm il tubo interno e 23 cm il tubo e caldaia a condensazione del tipo Ferroli Econcept 15A di potenza pari a 15 kW e rendimento del 98% alimentata a gpl.

Il termostato per la regolazione delle accensioni e degli spegnimenti dell'impianto è stato posizionato ad una profondità di circa 8 cm (metà altezza sezione substrato) e settato alla temperatura desiderata pari a 15 °C.

La fase di sperimentazione ha avuto inizio il giorno 8 dicembre alle ore 8:00 e si è conclusa dopo 9 giorni il 19 dicembre alle ore 8.00. Nei primi tre giorni di sperimentazione è stata monitorata la temperatura della sezione di substrato con tubazione coassiale posizionata sul fondo del bancale "TUBO BASSO" (Tesi Sperimentale 1), i successivi tre giorni con tubazione posizionata al centro del bancale "TUBO CENTRO" (Tesi Sperimentale 2) e gli ultimi tre giorni con tubazione appoggiata sulla superficie del substrato "TUBO ALTO" (Tesi Sperimentale 3) (Tab.5.1). Tra una tesi e l'altra è stato effettuato lo spostamento della tubazione. Per poter stimare l'influenza della tubazione calda sul riscaldamento del substrato è stato necessario parallelamente monitorare l'andamento della temperatura nella sezione di substrato nel bancale non riscaldato per poter poi, in fase di rielaborazione dati, effettuare un confronto quantitativo dei valori ottenuti.

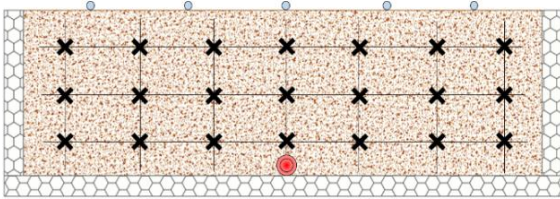
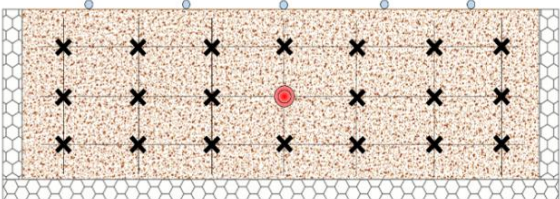
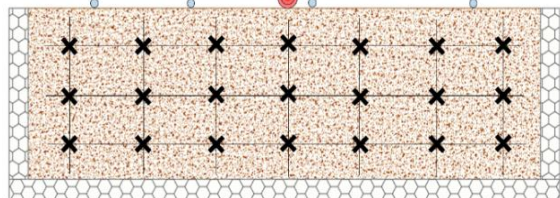
TESI SPERIMENTALE	DATA	ATTIVITA'
1 "TUBO BASSO" vs CONTROLLO 	monitoraggio temperature bancale riscaldato e non riscaldato	da 8/12/17 ore 8:00 a 11/12/17 ore 8:00
2 "TUBO CENTRO" vs CONTROLLO 	monitoraggio temperature bancale riscaldato e non riscaldato	da 12/12/17 ore 8:00 a 15/12/17 ore 8:00
3 "TUBO ALTO" vs CONTROLLO 	monitoraggio temperature bancale riscaldato e non riscaldato 19/12/17	da 16/12/17 ore 8:00 a 19/12/17 ore 8:00

Tabella 5.1 Calendario relativo allo svolgimento della prova

Nella fase successiva alla sperimentazione in serra, sono stati raccolti tutti i dati registrati dai datalogger e rielaborati mediante l'utilizzo di un foglio di calcolo Excel.

Per studiare la modalità di diffusione del calore per ognuna delle tre tesi sperimentali sono stati realizzati dei grafici rappresentanti l'andamento delle temperature all'interno del substrato ad una distanza di 5, 10 e 15 cm rispetto al fondo del bancale sia per il bancale riscaldato che per quello non riscaldato oltre che l'andamento della temperatura dell'aria e dell'irraggiamento solare in serra.

Relativamente alla temperatura del substrato, i valori riportati sui grafici relativi alle tre distanze dal fondo del bancale, sono stati determinati effettuando la media delle temperature rilevate ogni cinque minuti dai 7 datalogger posizionati a quella determinata distanza dal fondo.

Gli andamenti della temperatura dell'aria in serra e dell'irraggiamento solare sono stati realizzati riportando direttamente i valori registrati con un intervallo di cinque minuti.

Le mappe di temperatura sono state realizzate utilizzando il software statistico *Minitab 18* sviluppato dalla *Pennsylvania State University*. L'utilizzo di *Minitab 18* ha permesso di rappresentare graficamente la mappatura delle temperature all'interno della sezione di substrato analizzata, mediante la realizzazione di grafici contour plot. Il contour plot è infatti una rappresentazione grafica che consente di mostrare una superficie tridimensionale, caratterizzata da due variabili indipendenti X e Y e una variabile dipendente Z, su un piano bidimensionale. Le variabili indipendenti, nel caso di studio, sono rappresentate dalla posizione all'interno della sezione di substrato delle sonde per la misura della temperatura (in ascissa le distanze dei datalogger dall'asse della tubazione calda e in ordinata le distanza dei datalogger dal fondo del bancale) e la variabile dipendente dal valore di temperatura rilevato da ciascuna sonda. In particolare sono state costruite, per ognuna delle tre tesi sperimentali, le mappe di temperatura rappresentative i valori di temperatura del substrato ($T_{substrato}$) registrati dai 21 datalogger utilizzati nelle condizioni termiche più sfavorevoli. Per condizioni termiche sfavorevoli si intendono quelle condizioni in cui è stato registrato il valore minimo della temperatura dell'aria in serra ($T_{air,min}$) e non è presente irraggiamento solare. In tali condizioni si può osservare con maggiore chiarezza l'effetto del calore emesso dalla tubazione sulla temperatura del substrato in quanto non sono contemporaneamente presenti gli effetti dovuti all'irraggiamento solare.

5.2 Esposizione e discussione dei risultati

5.2.1 Modalità di diffusione del calore: bancale non riscaldato

Nei giorni con cielo prevalentemente nuvoloso (bassissimo irraggiamento solare) si verifica che nelle ore diurne (8:00-16:00), la temperatura negli strati più profondi del substrato (5, 10 cm dal fondo) risulta prevalentemente omogenea sia come andamento nel tempo sia come valori registrati, mentre nello strato più superficiale (15 cm dal fondo) la temperatura del substrato, risentendo della temperatura dell'aria, risulta maggiore di quella registrata negli strati più profondi e con un andamento nel tempo concorde a quello dell'aria. Nelle ore notturne (16:00-8:00) la temperatura degli strati più profondi continua a rimanere omogenea mentre lo strato superficiale, sempre a causa dell'influenza dell'aria esterna, si raffredda molto più velocemente rispetto agli strati più profondi, registrando temperature inferiori.

In assenza quindi di irraggiamento solare e di riscaldamento artificiale, è la temperatura dell'aria che lambisce la superficie del substrato, che determina variazioni di temperatura nel substrato ma solo nella zona superficiale. Nelle giornate caratterizzate dalla presenza di irraggiamento si registra invece una stratificazione della temperatura dalla zona superficiale alle zone profonde più accentuata rispetto a quella che si verifica in assenza di irraggiamento. L'andamento delle temperature all'interno del substrato risulta comunque il medesimo illustrato in assenza di irraggiamento.

Quanto appena esposto risulta di più chiara comprensione osservando i grafici relativi ai primi due giorni di sperimentazione della tesi TUBO BASSO riportati in figura 5.4.

5.2.2 Modalità di diffusione del calore: bancale riscaldato

In presenza di riscaldamento artificiale è necessario descrivere l'andamento delle temperature nel substrato analizzando nello specifico ogni singola tesi sperimentale.

TUBO BASSO: con la tubazione posizionata sul fondo del bancale si evidenzia un gradiente di temperatura ben definito tra la zona superficiale a temperatura minore e le zone profonde a temperatura maggiore che rimane invariato sia nelle ore diurne in assenza di irraggiamento solare che in quello notturne. Tuttavia in presenza di irraggiamento solare, è lo strato superficiale che presenta nelle ore diurne una temperatura superiore a quella registrata negli strati profondi (Fig. 5.4).

TUBO CENTRO: con la tubazione posizionata al centro del bancale non si registra il medesimo gradiente di temperatura verificatosi con tubazione posizionata sul fondo del bancale. Mentre infatti nelle zone centrali e superiori (10 e 15 cm dal fondo) si evidenziano

condizioni di temperatura omogenee dal punto di vista dell'andamento e dei valori, nella zona profonda (5 cm dal fondo) si registra una temperatura costantemente superiore alle altre nelle ore diurne in assenza di irraggiamento e nelle ore notturne. Anche in questo caso però in presenza di irraggiamento solare è la zona superficiale che fa registrare la temperatura maggiore (Fig. 5.5).

TUBO ALTO: con la tubazione posizionata sulla superficie del substrato l'andamento delle temperature all'interno della sezione è il medesimo di quello che si registra, nello stesso periodo di tempo, nel bancale non riscaldato; i valori di temperatura sono ovviamente superiori per la presenza della tubazione calda (Fig. 5.6).

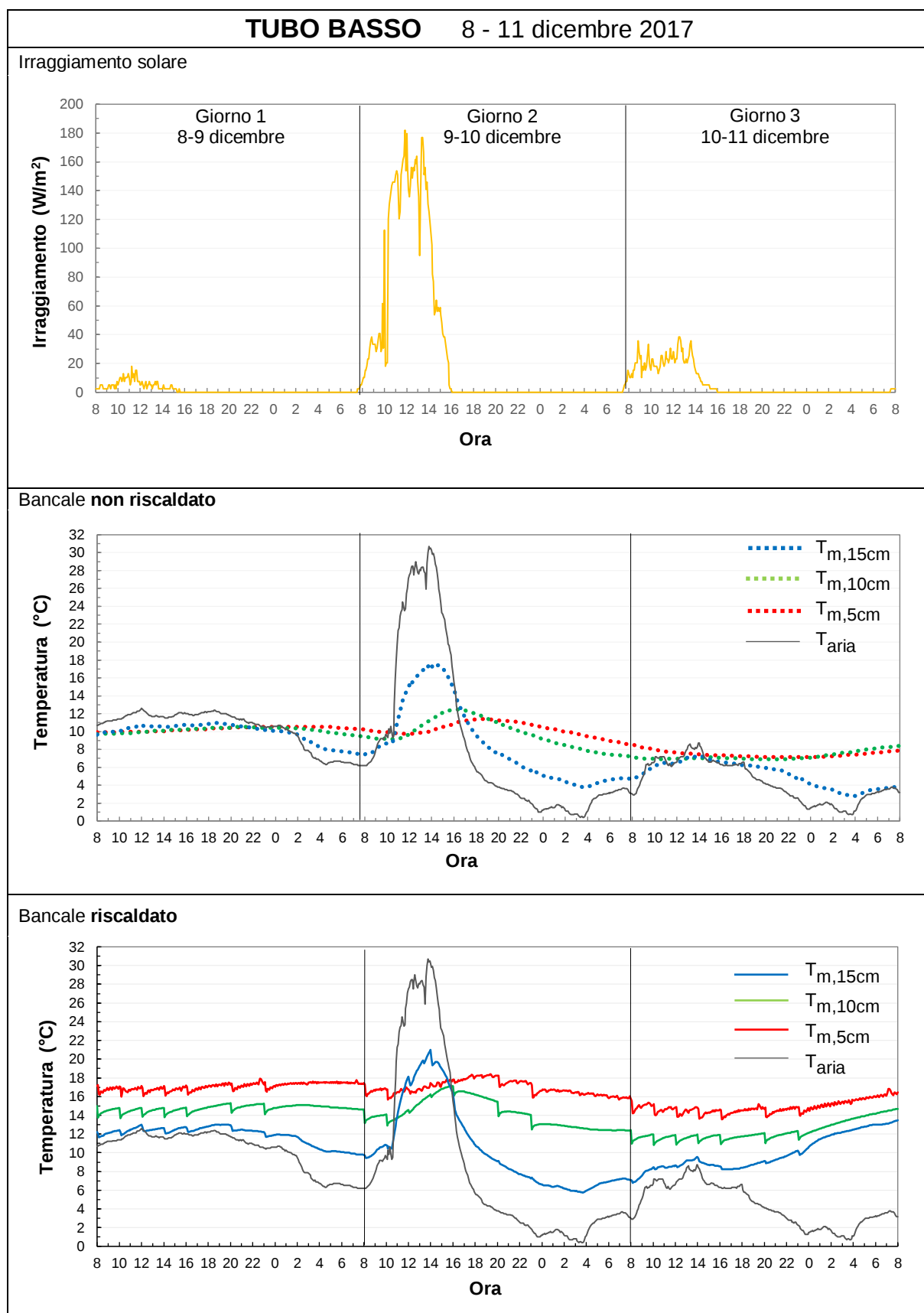


Figura 5.4 Tesi TUBO BASSO: andamento della temperatura nel substrato del bancale riscaldato e non riscaldato.

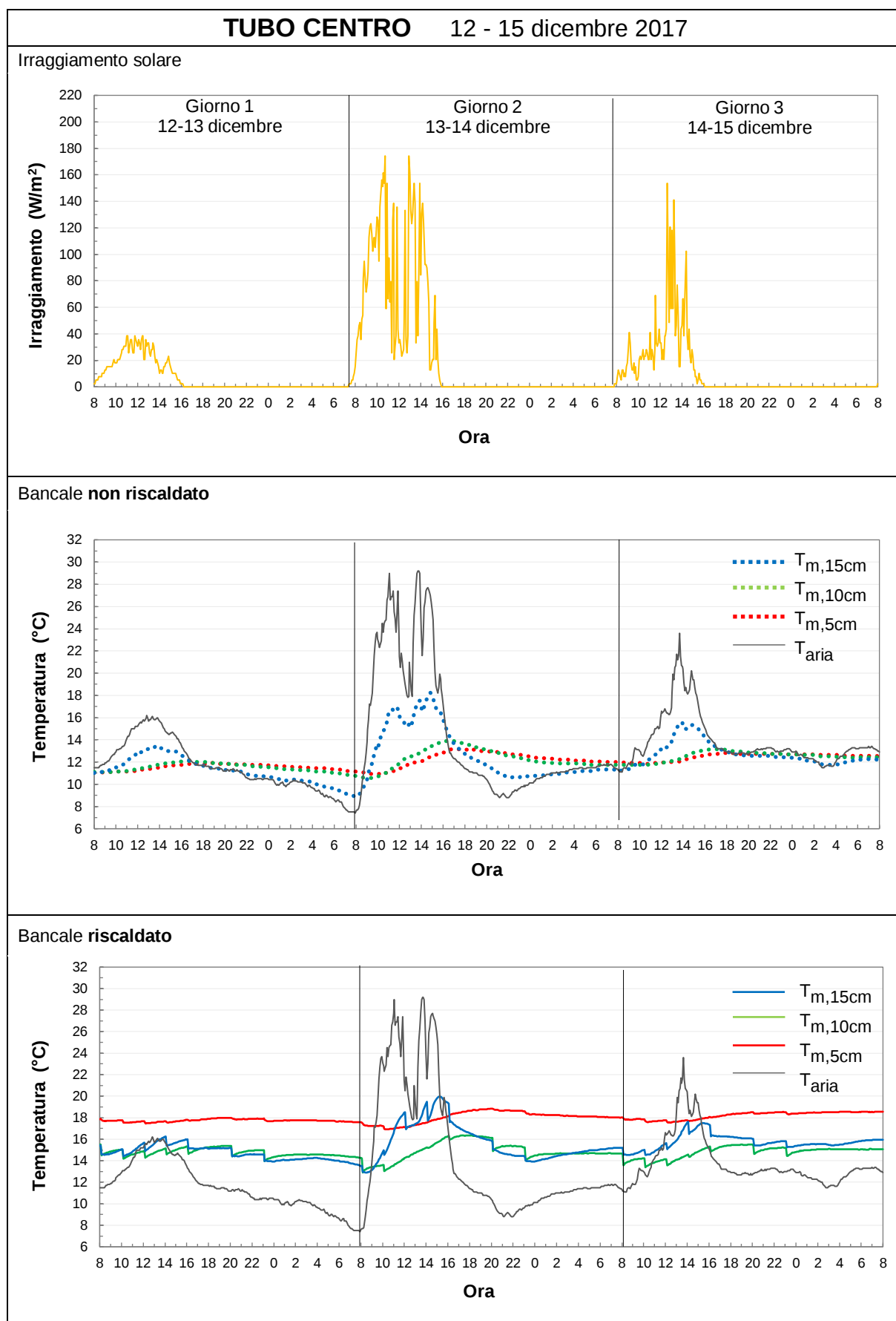


Figura 5.5 Tesi TUBO CENTRO: andamento della temperatura nel substrato del bancale riscaldato e non riscaldato.

TUBO ALTO 16 - 19 dicembre 2017

Irraggiamento solare

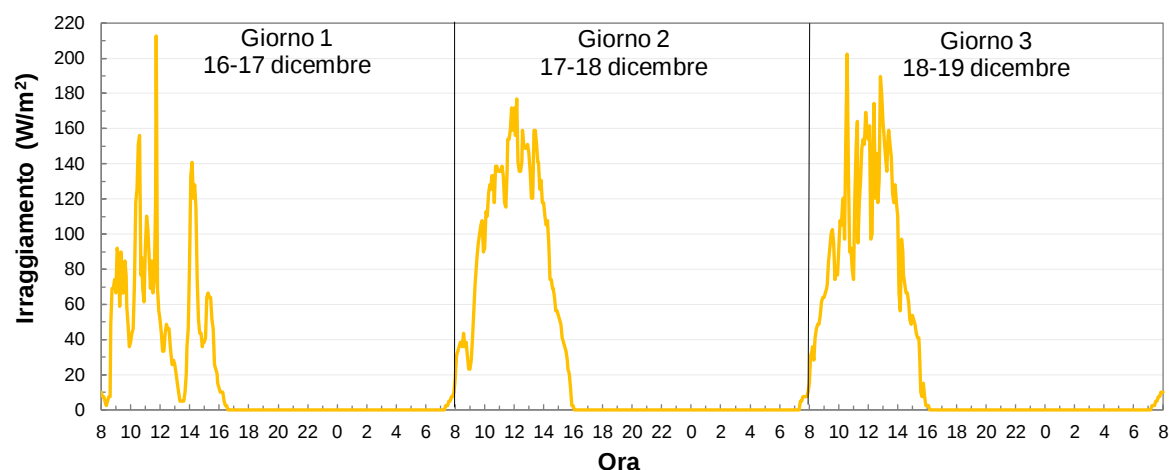
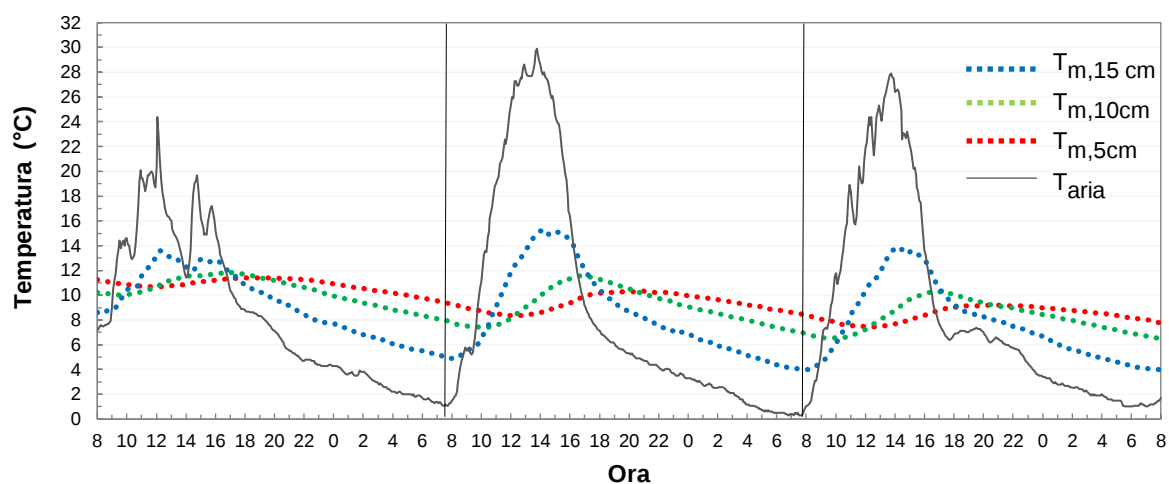
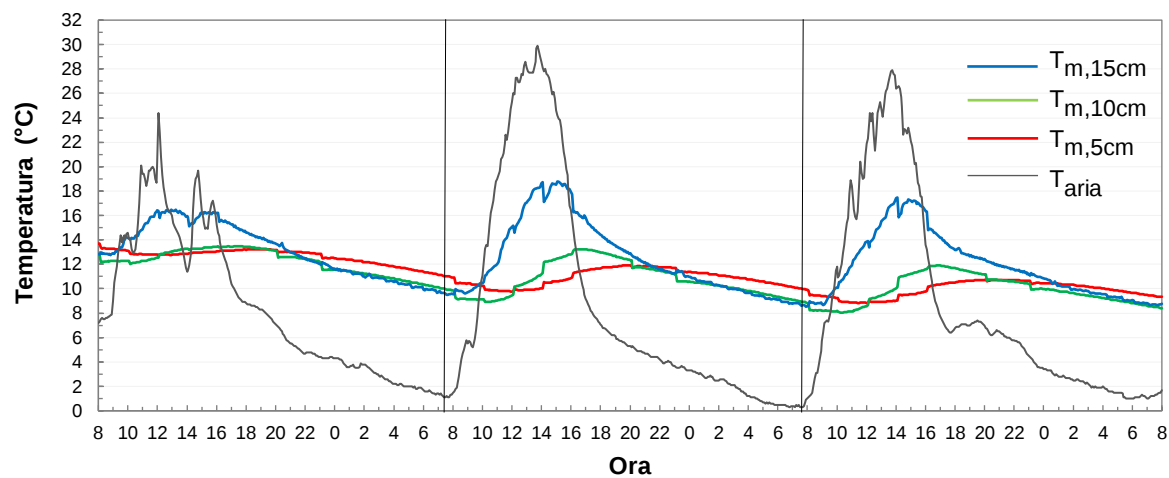
Bancale **non** riscaldatoBanale **riscaldato**

Figura 5.6 Tesi TUBO ALTO: andamento della temperatura nel substrato del bancale riscaldato e non riscaldato.

5.2.3 Mappe di temperatura: contour plot

Nelle condizioni termiche più sfavorevoli ovvero in assenza di irraggiamento solare e con una temperatura dell'aria interna alla serra pari a 0°C, in assenza di riscaldamento basale, si registrano nella sezione monitorata, temperature del substrato inferiori a 10 °C per tutto il periodo di svolgimento della prova (vd. Figure 5.7-5.9).

Nelle stesse condizioni, volendo valutare la capacità della tubazione calda di influenzare la temperatura del substrato, appare subito evidente come la tesi che vede la tubazione coassiale posizionata sulla superficie del substrato “TUBO ALTO”, sia quella meno efficiente (Fig. 5.9). In questa posizione infatti soltanto una parte del calore prodotto dalla tubazione viene ceduta al substrato, l'altra all'aria circostante. L'innalzamento della temperatura del substrato per effetto della tubazione calda si registra in una fascia di substrato (zona di influenza) di larghezza pari a circa 10 cm a cavallo della tubazione stessa fino al fondo del bancale. In questa fascia si registrano temperature superiori ai 15 °C desiderati soltanto in un'area di raggio pari a circa 5 cm intorno all'asse della tubazione e temperature comprese tra 15 °C e 10 °C nella restante zona di influenza. Nelle restanti zone la temperatura registrata è inferiore a 10 °C come nel bancale non riscaldato.

L'influenza della tubazione calda sull'intera sezione monitorata si ha con la tesi che vede la tubazione posizionata al centro del bancale “TUBO CENTRO” (Fig. 5.8). In questa condizione, dove la tubazione cede interamente il suo calore al terreno, si registrano infatti temperature del substrato per tutta la sezione superiori alla temperatura di 10 °C registrata nello stesso periodo nel bancale non riscaldato. In particolare si registrano temperature superiori a 15 °C in una zona di influenza di raggio mediamente pari a circa 10 cm con centro nell'asse della tubazione. Si noti come, a partire da metà profondità scendendo verso il fondo del bancale, il raggio di influenza aumenti fino a circa 15 cm. Questo fenomeno, verificatosi anche con tubo in posizione sul fondo e, in maniera molto meno accentuata anche nella tesi con tubo posizionato in superficie, è probabilmente dovuto alla presenza della lastra isolante in polistirolo posizionata sul fondo del bancale che limita la dispersione del calore verso l'esterno (zona sottostante il bancale).

Come nel caso di tubazione posta al centro del bancale, anche nella tesi con tubazione posta sul fondo “TUBO BASSO” (Fig. 5.7) si registrano, in una zona di influenza di raggio mediamente pari a circa 10 cm con centro nell'asse della tubazione, temperature superiori a 15 °C. In questo caso però la zona di influenza non risulta ovviamente simmetrica rispetto al centro dell'asse della tubazione ma si sviluppa da questo verso la superficie del substrato.

Nelle restanti zone si registrano temperature comprese tra 15 °C e 10 °C eccetto che nella zona superficiale dove gli effetti della tubazione calda non fanno registrare temperature maggiori rispetto a quelle registrate nello stesso periodo e nella stessa zona nel bancale non riscaldato. La zona superficiale è infatti a contatto con una massa fredda rappresentata dall'aria che lambisce il substrato per cui si raffredda molto più velocemente rispetto agli strati più profondi per cui il calore proveniente dalla tubazione, che in questo specifico caso risulta anche essere posizionata alla distanza maggiore dalla superficie rispetto alle altre tesi, non riesce ad influenzare la temperatura del substrato.

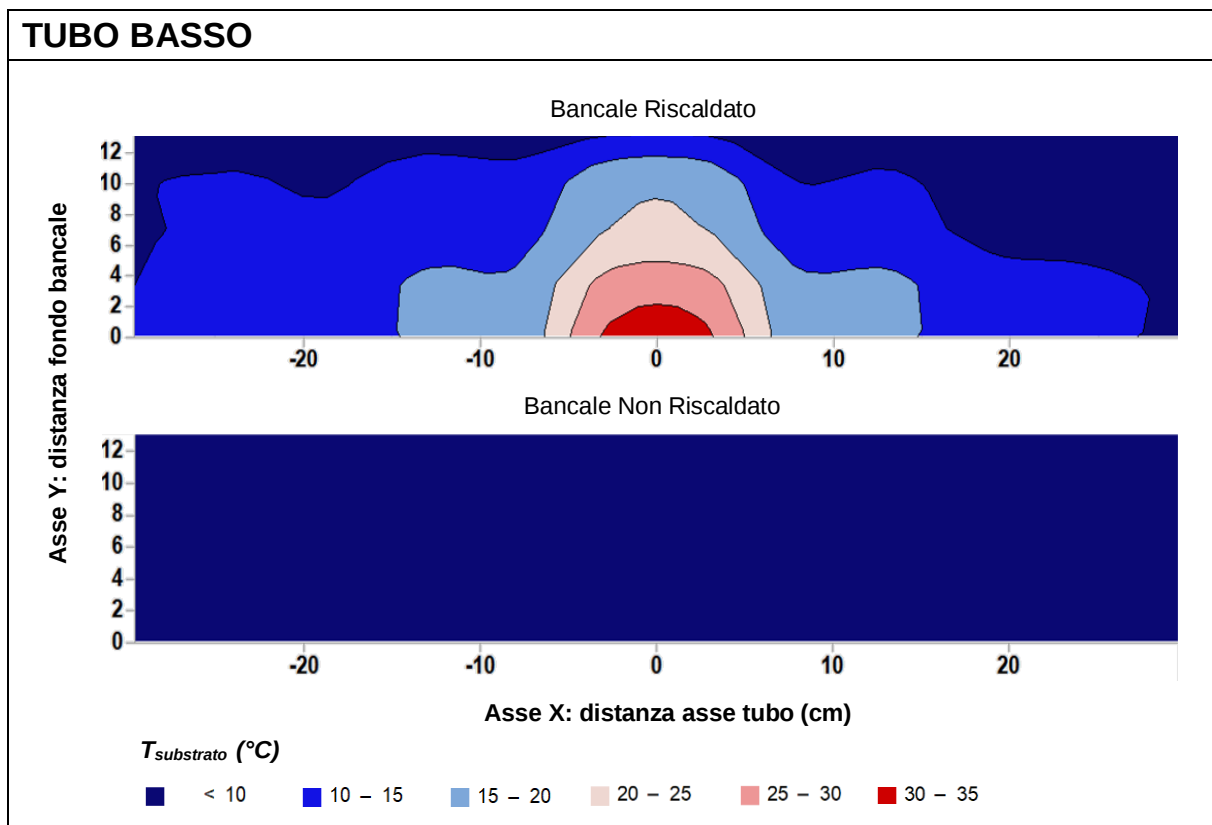


Figura 5.7 Tesi TUBO BASSO: contour plot delle temperature del substrato registrate nel bancale riscaldato e non riscaldato.

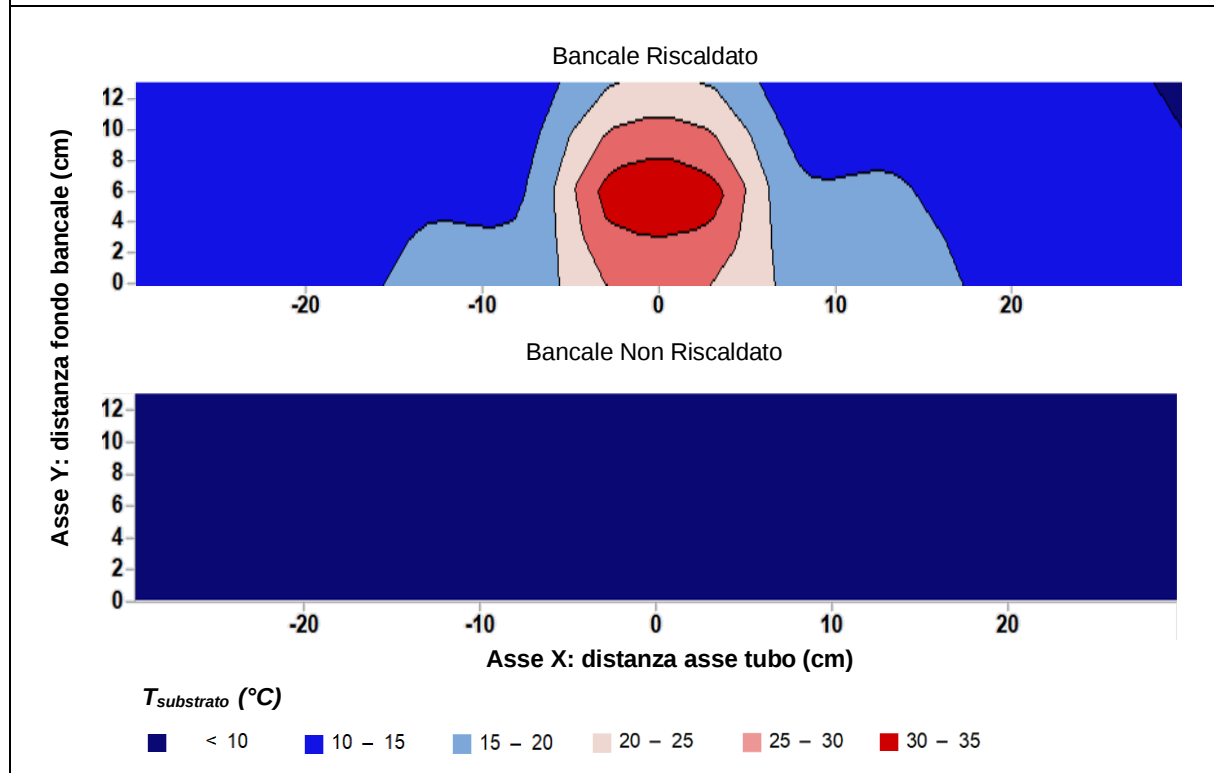
TUBO CENTRO

Figura 5.8 Tesi TUBO CENTRO: contour plot delle temperature del substrato registrate nel bancale riscaldato e non riscaldato.

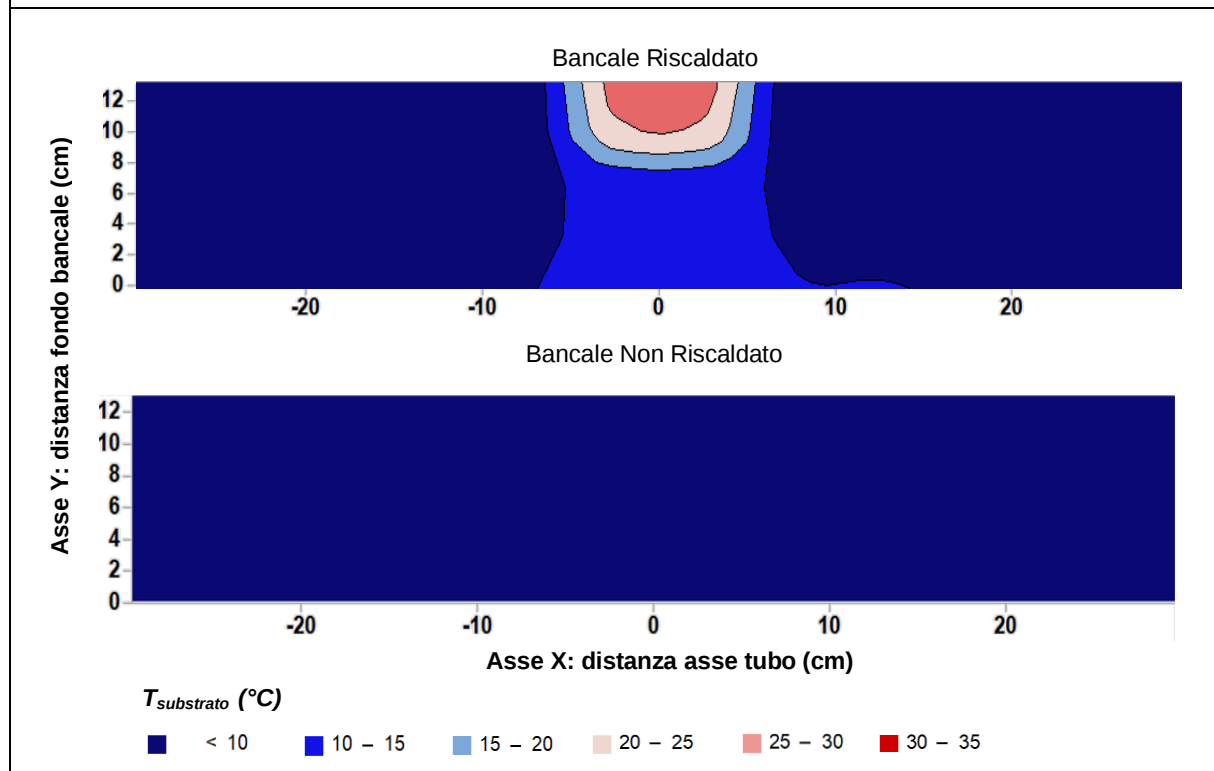
TUBO ALTO

Figura 5.9 Tesi TUBO ALTO: contour plot delle temperature del substrato registrate nel bancale riscaldato e non riscaldato.

In tutte e tre le tesi si osservi l'effetto dell'irrigazione proveniente dall'impianto installato sulla superficie del substrato che va a verticalizzare le curve di temperatura rappresentate nei contour plot (Fig.5.10).

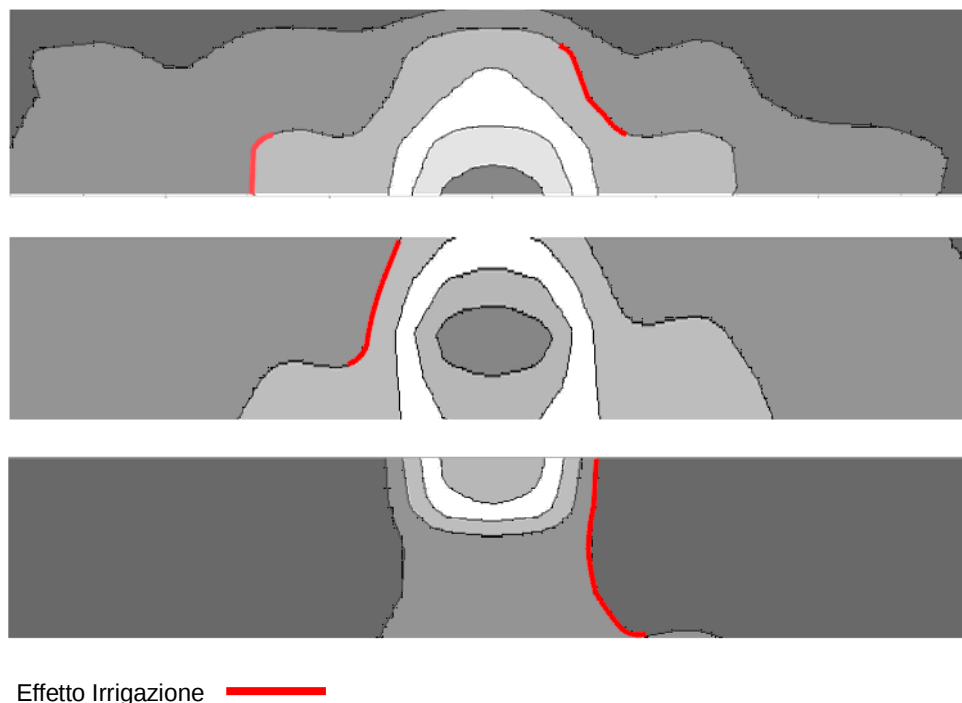


Figura 5.10 Indicazione di alcune zone dove è maggiormente evidente l'effetto verticalizzante dell'irrigazione sull'andamento delle curve di temperatura.

Conclusioni

L'attività di ricerca svolta nel triennio 2017-2019 è stata condotta all'interno del progetto AgroEner con la finalità di valutare la sostenibilità economica ed ambientale di un impianto di generazione di calore, applicato al settore della serricoltura, alimentato da fonti di energia rinnovabili, ovvero la pompa di calore. In particolare l'attività ha previsto due attività sperimentali denominate Basical 1.0 e Basical 2.0.

Nella prima (Basical 1.0) sono stati confrontati due tipologie di impianti differenti: l'impianto basale a tubazioni coassiali alimentato da caldaia a condensazione ("Lato Basale") e l'impianto tradizionale con bruciatore ad aria calda ("Lato Aria"). L'attività è stata condotta all'interno di una serra suddivisa in due zone ugualmente dimensionate e attrezzate con l'obiettivo di valutare la possibilità di coltivare il basilico riscaldando soltanto il volume d'aria della canopy invece che l'intero volume della serra, di confrontare le produzioni sia in termini quantitativi che qualitativi e di analizzare i relativi consumi energetici.

L'analisi dei risultati ottenuti in BasiCal 1.0 ha evidenziato come non vi siano state significative differenze nella quantità e qualità della produzione di basilico ottenuta con i due impianti di riscaldamento a confronto.

E' quindi possibile affermare il sistema di riscaldamento basale, nelle condizioni testate, ha consentito una produzione di basilico confrontabile in termini sia qualitativi che quantitativi con il sistema di riscaldamento ad aria.

Dal punto di vista delle prestazioni energetiche è emerso che il sistema basale con caldaia a condensazione ("Lato Basale"), rispetto al sistema ad aria ("Lato Aria") ha comportato migliori risultati in termini di: energia consumata, costi sostenuti, emissioni di CO₂ equivalente in atmosfera ed indice di efficienza energetica (EUE). In particolare il "Lato Basale", rispetto al "Lato Aria" ha comportato una riduzione del 77% dei consumi energetici, del 58% dei costi per l'acquisto del combustibile e del 79% della CO₂ emessa in atmosfera. Il "Lato Basale" ha infine comportato un EUE relativo alla biomassa fresca e a quella secca prodotta per caloria fornita, maggiore rispettivamente del 70% e del 49% rispetto al "Lato Aria".

Il sistema di riscaldamento basale alimentato da caldaia a condensazione è risultato quindi energeticamente più efficiente rispetto al sistema di riscaldamento ad aria alimentato da bruciatore a gasolio.

La prova sperimentale Basical 2.0 è stata strutturata con un triplice obiettivo: replicare la prova condotta l'anno precedente al fine di confermare o meno i risultati ottenuti; confrontare i due

sistemi di riscaldamento già testati con un terzo sistema composto da un impianto di riscaldamento basale alimentato da una pompa di calore; monitorare l'andamento della temperatura della canopy a diverse distanze dalle tubazioni calde.

In questa seconda prova le tre tesi sperimentali sono state denominate “Lato Aria”, impianto con bruciatore; “Lato Basale C”, impianto coassiale con caldaia; “Lato Basale P”, impianto coassiale con pompa di calore.

Le analisi finalizzate alla valutazione qualitativa della produzione di basilico ottenuta hanno confermato quanto ottenuto con la prova BasiCal 1.0. In particolare, non sono emerse significative differenze tra “Lato Basale” e “Lato Aria” e anche tra le due sottozone sperimentali “Lato Basale C” e “Lato Basale P” in termini di indice SPAD, fotosintesi netta, conduttanza stomatica, traspirazione fogliare e contenuti di clorofilla e carotenoidi, oltre che dei principali macroelementi come fosforo e potassio. Inoltre dai risultati ottenuti con le analisi dei rilievi distruttivi della parte aerea è emerso che la produzione di basilico ottenuta riscaldando soltanto il volume della canopy (impianto basale) è risultata significativamente maggiore di quella ottenuta riscaldando l'intero volume di serra (impianto ad aria) in termini di peso secco (Dw), fresco (Fw) e biomassa totale (B_T).

Dall'analisi dei risultati ottenuti dalle analisi energetiche è emerso che il sistema basale con pompa di calore (“Lato Basale P”), rispetto al sistema basale alimentato da caldaia a condensazione (“Lato Basale C”) e al sistema ad aria (“Lato Aria”), è quello che ha mostrato le migliori prestazioni in termini di energia consumata, costi sostenuti, emissioni di CO₂ equivalente in atmosfera ed indice di efficienza energetica (EUE). In particolare per quanto riguarda l'energia consumata il “Lato Basale P” ha consentito una riduzione del 50% rispetto al “Lato Basale C” e di circa il 67% rispetto al “Lato Aria”. In termini di costi sostenuti il “Lato Basale P” ha comportato un risparmio di circa il 70% rispetto al “Lato Basale C” e di circa il 90% rispetto al “Lato Aria”. In termini di CO₂ emessa in atmosfera, il “Lato Basale P” ha comportato una riduzione del 25% rispetto al “Lato Basale C” e dell'88% rispetto al “Lato Aria”. Infine per quanto riguarda l'EUE “Lato Basale P” ha comportato un incremento del 50% rispetto al “Lato Basale C” sia in termini di biomassa fresca che secca, mentre rispetto al Lato Aria ha comportato un incremento del 242% in termini di biomassa fresca e del 418% in termini di biomassa secca.

Il sistema di riscaldamento basale con pompa di calore è risultato quindi più proficuo rispetto al sistema basale con caldaia a condensazione, ma soprattutto rispetto al sistema di riscaldamento ad aria con bruciatore a gasolio il quale rappresenta il sistema di riscaldamento tradizionale più comunemente utilizzato (50% delle serre “calde” del territorio Toscana, v. Capitolo 1).

Il monitoraggio della temperatura della canopy a diverse distanze dalle tubazioni calde ha consentito di determinare la “distanza di influenza del riscaldamento”, ovvero la distanza alla quale la temperatura dell’aria della canopy non risente del calore proveniente dalle tubazioni calde, con impianto impostato secondo quanto previsto dal protocollo di sperimentazione. E’ stato quindi dimostrato che allontanandosi dalla sorgente di calore rappresentata dalle tubazioni coassiali, la temperatura dell’aria all’interno della canopy diminuisce progressivamente tendendo ad allinearsi con la temperatura dell’aria in serra, tuttavia la temperatura dell’aria nella canopy risente dell’influenza delle tubazioni calde fino ad una distanza (distanza di influenza del riscaldamento) di circa 40-50 cm dalle tubazioni stesse in accordo con le dimensioni massime di sviluppo delle piante di basilico.

Al termine delle due prove *Basical 1.0* e *Basical 2.0*, grazie all’incremento del numero di strumenti di misura acquisiti durante il secondo anno di sperimentazione, è stato possibile realizzare una nuova attività sperimentale finalizzata ad approfondire il funzionamento dell’impianto basale utilizzato. Tale analisi può risultare particolarmente utile a coloro che volessero investire su un impianto di riscaldamento coassiale, in quanto fornisce indicazioni precise sulle possibilità di utilizzo dell’impianto, sulle modalità di riscaldamento che ne derivano (substrato o canopy) e sul numero approssimativo di tubazioni da installare per ciascuna applicazione. Per questo motivo sono state analizzate sia la modalità di diffusione del calore sia la quantità di calore diffuso da una sola tubazione all’interno del substrato di coltivazione al variare della posizione della stessa rispetto al substrato. L’analisi delle differenze di temperatura registrate in più punti in due substrati a confronto, uno riscaldato e uno no, ha permesso di determinare graficamente mediante mappe di temperatura, la *zona di influenza dell’impianto*, ovvero quella zona nella quale la temperatura del substrato risente del calore ceduto dalla tubazione. Le mappature di temperatura del substrato, determinate per ognuna delle posizioni della tubazione sperimentate, possono essere considerate punto di partenza per il dimensionamento di un impianto basale coassiale da realizzarsi in zone climaticamente simili a quella in cui sono state condotte le sperimentazioni.

L’attività di ricerca condotta ha quindi dimostrato la potenzialità dell’utilizzo di un sistema innovativo di riscaldamento basale alimentato da una pompa di calore. Sistemi innovativi come quello testato, se adeguatamente progettati, possono garantire gli stessi livelli di produzione produttivi forniti dai sistemi tradizionali con un minore utilizzo di energia ed un minore impatto ambientale in termini di CO₂ emessa in atmosfera. E’ quindi essenziale che la ricerca scientifica continui a studiare e sviluppare sistemi innovativi per il riscaldamento delle colture all’interno

delle strutture agricole e che contemporaneamente si cerchi di sensibilizzare i responsabili delle azioni di settore sulle opportunità che possono conseguire dall'utilizzo di questi nuovi sistemi.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Ministero delle politiche agricole alimentari e forestali (Mipaaf). Piano del settore florovivaistico 2014/2016.
- [2] Canacki M., Emekli N.Y., Bilgin S., Caglayan N. Heating requirements and its costs in greenhouse structures: A case study for Mediterranean region of Turkey. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 2013, Vol. 24, pp. 483-490.
- [3] Yuksel A.N. Greenhouse construction technique. Hasad Publication, Istanbul, Turkey, 2004.
- [4] Istituto di Servizi per il Mercato Agricolo Alimentare (ISMEA). Piante da esterno e vivaismo. Rapporto economico finanziario. Roma, 2008.
- [5] Istituto Nazionale di Statistica (ISTAT). Rapporto Annuale - La situazione del Paese nel 2000. Sistema Statistico Nazionale, Roma, 2000.
- [6] Istituto Nazionale di Statistica (ISTAT). 5° Censimento Generale dell'Agricoltura. Statistico Nazionale, Roma, 2000 (website: <http://censagr.istat.it/dati.htm>).
- [7] Ahamed M.S., Guo H., Tanin K. Energy saving techniques for reducing the heating cost of conventional greenhouses. *Biosystems Engineering* 2019, Vol. 178, pp. 9-33.
- [8] Runkle E., Both A. Greenhouse energy conservation strategies. *Michigan State University-Extension Bulletin* 2012, p. 1
- [9] Bibbiani C., Fantozzi F., Gargari C., Campiotti C.A., Schettini E., Vox G. Wood biomass as Sustainable Energy for greenhouses heating in Italy. *Agriculture and Agriculture Science Procedia* 2016, Vol. 8, pp. 637-645.
- [10] EUROSTAT. Agri-environmental indicator - energy use. Eurostat Statistic explained. Kirchberg. Lussemburgo, 2018.
- [11] Holdren J.P., Smith K.R. Energy, the Environment, and Health. *In Energy and the challenge of sustainability*. World Energy Assessment, New York, 2000.
- [12] Dalgaard T., Halberg N., Porter J.R. A model for fossil energy use in Danish agriculture used to compare organic and conventional farming. *Agriculture Ecosystems and Environment* 2001, Vol. 87, pp. 51-65.
- [13] Cleveland C.C. The direct and indirect use of fossil fuels and electricity in USA agriculture, 1910–1990. *Agriculture Ecosystems and Environment* 1995, Vol. 55(2), pp. 111-121.

-
- [14] West T.O., Marland G. A synthesis of carbon sequestration, carbon emissions, and net carbon flux in agriculture: comparing tillage practices in the United States. *Agriculture Ecosystems and Environment* 2002, Vol. 91, pp. 217-232.
- [15] Esen M., Yuksel T. Experimental evaluation of using various renewable energy sources for heating a greenhouse. *Energy and Buildings* 2013, Vol. 65, pp. 340-351.
- [16] B.J. Bailey. Limiting the relative humidity in insulated greenhouses at night. *Acta Horticult. Energy Protect. Cultivation* 1983, Vol. 148, pp. 1-11.
- [17] Garcia J.L., De la Plaza S., Navas L.M., Benavente R.M., Luna L. Evaluation of the feasibility of alternative energy sources for greenhouse heating. *Journal of Agricultural Engineering Research* 1998, Vol. 69, pp. 107-114.
- [18] Aye L., Fuller R.J., Canal A. Evaluation of a heat pump system for greenhouse heating. *International Journal of Thermal Sciences* 2010, Vol. 49, pp. 202-208.
- [19] Kozai, T., Ohshima, K., Tong, Y., Tongbai, P., & Nishioka, N. Integrative environmental control using heat pumps for reductions in energy consumption and CO₂ gas emission, humidity control and air circulation. Greenhouse System (Abstract). *Acta Horticult. Energy Protect. Cultivation* 2009, nr. 101.
- [20] Tong Y., Kozai T., Nishioka N., Ohshima K. Greenhouse heating using heat pumps with a high coefficient of performance (COP). *Biosystems Engineering* 2010, Vol. 106, pp. 405-411.
- [21] AGROENER - Energia dall'agricoltura: innovazioni sostenibili per la bioeconomia. Progetto Finanziamento MiPAAF Decreto Dirigenziale n. 26329 del 1 Aprile 2016 (website: <http://agroener.crea.gov.it/wp.html>).
- [22] European Commission. Horizon 2020 – Il programma quadro dell'UE per la ricerca e l'innovazione. Ufficio delle pubblicazioni dell'Unione Europea 2014, Lussemburgo. (website: <https://ec.europa.eu/programmes/horizon2020/>)
- [23] Tong Y., Kozai T., Nishioka N., Ohshima K. Greenhouse heating using heat pumps with a high coefficient of performance (COP). *Biosystems Engineering* 2010, Vol. 106, pp. 405-411.
- [24] Fabrizio E. Energy reduction measures in agricultural greenhouses heating: Envelope, systems and solar energy collection. *Energy and Buildings* 2012, Vol. 53, pp. 57-63.

-
- [25] Università degli studi di Firenze. Scuola di Agraria, 2016. Indagine sul settore vivaistico ornamentale in Toscana (website: <https://www.scienzevivaistiche.unifi.it/vp-139-indagine-sul-settore-vivaistico-ornamentale-in-toscana-2016.html>).
- [26] Ente Nazionale Meccanizzazione Agricola, 2017 (website: www.enama.it)
- [27] Campiotti C.A., Balducchi R., Bernardini A., Dondi F., Di Carlo F., Genovese A., Scoccianti M., Bibbiani C. Energia rinnovabile in agricoltura. Report Tecnico ENEA, 2009 (RT/2009/24/BIOTEC).
- [28] Terrosi C. Riscaldamento colture protette: stato dell'arte e prospettive. *Il floricultore* 2018, Vol. 55(7-8), pp. 44-47.
- [29] Fedrizzi M., Bozzoli M. Un sistema innovativo di riscaldamento basale per colture sotto serra. *Colture protette* 2006, 35(3), pp. 63-69.
- [30] FLORENER - Messa a punto di metodi per la riduzione dei consumi energetici e dei costi di produzione nelle produzioni florovivaistiche. Progetto nazionale finanziato dal MiPAAF, 2005-2008.
- [31] Carnavos T.C. Coaxial finned tube heat exchanger, Noranda Metal Industries, Inc. (Newton, CT) United States Patent n°4554969, 1985.
- [32] Horton L.R., Jackson C.A., Holcomb W.P., Horton C. Coaxial Tube Coupler Assembly, United States Patent n° 3860269, 1975.
- [33] Edwards R.C. Coaxial tube in tube heat exchanger with inner tube support, Edwards Engineering Corporation (Pompton Plains, NJ) United States Patent n° 4286653, 1981.
- [34] Spiegelman J.J. Coupling for interconnection of coaxial tubing, Tylan General, Inc. (San Diego, CA) United States Patent n°5088774, 1992.
- [35] Wolf F.J., Reichert U. Fluid containing coaxial tube for control systems, WOCO Franz-Josef Wolf & Co. (Bad Soden Salmunster, DE) United States Patent n° 5433252, 1995.
- [36] Wolf L.W. Vented bending sleeves for coaxial tubing systems, United States Patent n° 5497809, 1996.
- [37] Ziemek G., Schatz, F. Spacing in coaxial pipes system, Kabel-und Metallwerke Gutehoffnungshutte Aktiengesellschaft (Hannover, DT) United States Patent n° 3670772, 1972.

-
- [38] Rosati B. Nuovo tubo e valvola di flusso per una migliore gestione dell'acqua calda. Italy patent n° 0001351132, 2004.
- [39] Fedrizzi M., Cacini S., Burchi G. Prototipo per la gestione dei flussi idraulici nel riscaldamento basale. *Culture protette* 2010, Vol. 39(9), pp. 78-86.
- [40] Fedrizzi M., Cacini S., Burchi G. Root zone heating optimization in ornamental plant production. *Acta Horticulturae* 2011; Vol. 893, pp. 389-396.
- [41] Fedrizzi M., Cacini S., Burchi G. Heating optimization in ornamental plant production: basal heating uniformity and energy saving in protected environments (ABS0014). Proceeding of the International Symposium on High Technology for Greenhouse Systems Conference: GreenSys2009, Quebec City, Canada.
- [42] Fedrizzi M., Cacini S., Burchi G. Produzioni florovivaistiche: spesa energetica e qualità di riscaldamento basale. *Culture protette* 2009, Vol. 38(10), pp. 84-88.
- [43] Fedrizzi M., Cacini S., Burchi G. Raffreddamento del terreno con impianto idraulico coassiale. *Culture protette* 2011, Vol. 40(11), pp. 70-76.
- [44] Burchi G., Cacini S., Fedrizzi M., Pagano M., Guerrieri M. Temperature conditioning in ornamental plant production with a prototype device: root zone cooling in protected environments. *Journal of Agricultural Engineering* 2013, Vol. 44(1), pp. 257-260.
- [45] Hoagland D. R., Arnon D. I. The water culture method for growing plants without soil. *California Agriculture Experiment Station* 1950, Circular 347, pp. 347-349.
- [46] Massa D., Prisa D., Montoneri E., Battaglini D., Ginepro M., Negre M., Burchi G. Application of municipal biowaste derived products in Hibiscus cultivation: effect on leaf gaseous exchange activity, and plant biomass accumulation and quality. *Scientia Horticulturae* 2016, Vol. 205, pp. 59-69.
- [47] Cataldo D.A., Haroon M., Schrader L.E., Youngs V.L. Rapid colorimetric determination of nitrate in plant tissue by nitration of salicylic acid. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1975, pp. 71-80.
- [48] Ministero dell'ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare. Tabelle parametri standard normalizzati. Coefficienti utilizzati per l'inventario delle emissioni di CO₂ nell'inventario nazionale UNFCC. Roma, 2017.
- [49] Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA). National Inventory Report (NIR 2018). Roma 2018.

-
- [50] Putievsky E., Galambosi B. Production systems of sweet basil. *In: Medicinal and Aromatic Plants - Industrial Profiles, Volume 10: Basil - The Genus Ocimum*, Ed. Hiltunen Raimo, Holm Yvonne, 1999, pp. 39-65.
- [51] Chang X., Alderson P., Wright C. Effect of temperature integration on the growth and volatile oil content of basil (*Ocimum basilicum* L.). *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 2005, Vol. 80(5), pp. 593-598.
- [52] Shamshiri R. R., Jones J. W., Thorp K. R., Ahmad D., Che Man H., Taheri S. Review of optimum temperature, humidity, and vapour pressure deficit for microclimate evaluation and control in greenhouse cultivation of tomato: a review. *International Agrophysics* 2018, Vol. 32, pp. 287-302.
- [53] Pheng T. L., He J., Lee S. K. Effects of root-zone temperature on the root development and nutrient uptake of *Lactuca sativa* L. "Panama" grown in an aeroponic system in the tropics. *Journal of Plant Nutrition* 2002, Vol. 25(2), pp. 297-314.
- [54] Qiuyan Y., Zengqiang D. J. M., Xun L., Fei D. Effects of root-zone temperature and N, P, and K supplies on nutrient uptake of cucumber (*Cucumis sativus* L.) seedlings in hydroponics. *Soil Science and Plant Nutrition* 2012, Vol. 58(6), pp. 707-717.
- [55] Kimberly A. K. Root-zone temperature effects on the nutrient uptake of horticultural crops. Retrospective Theses and Dissertations. Iowa State University, 1995. pp. 14-27.
- [56] Elad Y., Rav D. D., Israeli L., Fogel M. Passive heat treatment of sweet basil crops suppresses white mould and grey mould. *Plant Pathology* 2017, Vol. 66, pp. 105–114.

APPENDICE

Riscaldamento basale a tubazioni coassiali

Il riscaldamento basale è una tecnica che trova ampia applicazione nel settore delle colture protette per il riscaldamento di semenzai o bancali per il taleaggio e/o innesto e per consentire la coltivazione di alcune specie ornamentali che necessitano di temperature del suolo costanti durante tutto l'anno per poter garantire continuità e qualità di produzione.

(<https://www.floraviva.it/news/notizie/dal-crea-viv-di-pescia-nuove-tecniche-colturali-per-coltivazioni-protette.html> - 27.03.2019).

La tecnologia impiantistica più diffusa per la realizzazione di un impianto basale prevede l'utilizzo di tradizionali tubazioni in PE (polietilene) per il trasporto dell'acqua calda. Questo tipo di impianto manifesta però un rilevante problema relativo alla scarsa uniformità di riscaldamento delle colture rilevabile in maniera sensibile nelle zone che si trovano più lontane dal punto di installazione del generatore di calore. L'acqua calda che circola all'interno delle tubazioni presenta infatti una temperatura all'inizio del suo percorso (T_1) molto più alta di quella che si registra alla fine del suo percorso (T_2). Questo perché l'acqua, scorrendo all'interno delle tubazioni, cede calore al terreno raffreddandosi progressivamente. Inevitabilmente le porzioni di terreno più vicine al punto di uscita dell'acqua dal generatore ricevono più calore di quelle vicine al punto di ritorno dell'acqua al generatore stesso (Fig. A1).

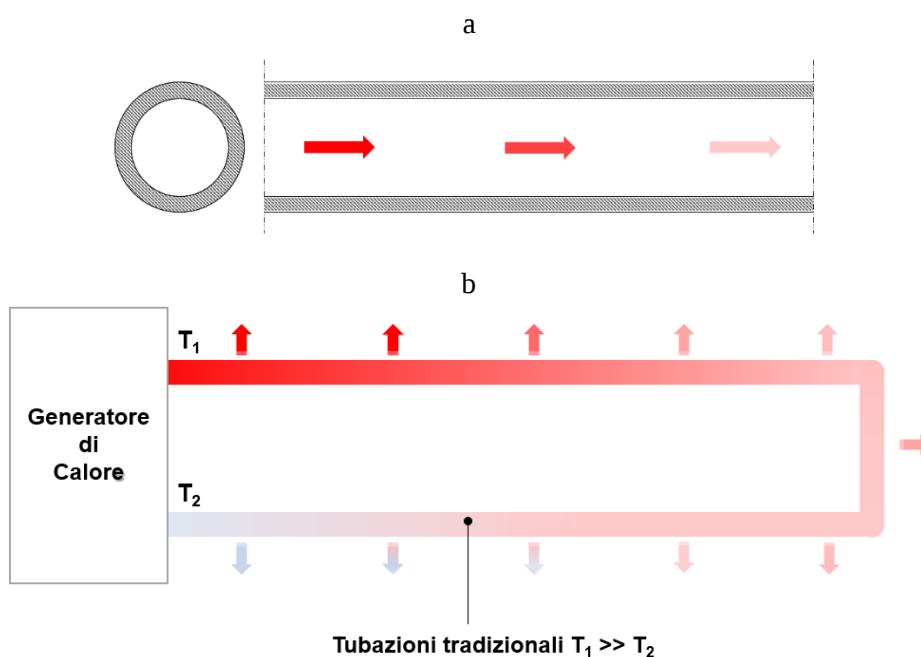


Figura A1 Riscaldamento basale di tipo tradizionale;
a) sezione trasversale e longitudinale di tubazione tradizionale per impianto basale;
b) schema di funzionamento di un impianto basale tradizionale.

Un impianto basale a tubazioni coassiali consente di risolvere il problema della non uniformità di riscaldamento tipica di un impianto basale di tipo tradizionale. Questo tipo di impianto è costituito da due tubazioni in PE di diverso diametro posizionate coassialmente l'una nell'altra. Il suo schema di funzionamento è quello di uno scambiatore di calore controcorrente dove l'acqua in uscita dal generatore di calore fluisce nel tubo interno e, l'acqua di ritorno, nella regione anulare. L'acqua calda che scorre nel tubo più interno cede progressivamente calore all'acqua nella regione anulare andando progressivamente a raffreddarsi e contemporaneamente a riscaldare l'acqua nella regione anulare ad essa adiacente (Fig A2). Nel tempo si va quindi ad instaurare una situazione di equilibrio termico tra i due fluidi che comporta una maggiore omogeneità della temperatura dell'acqua rispetto a quella che si misura in un impianto di tipo tradizionale. Conseguentemente anche le porzioni di terreno servite dal riscaldamento basale a tubazioni coassiali saranno riscaldate in modo più omogeneo.

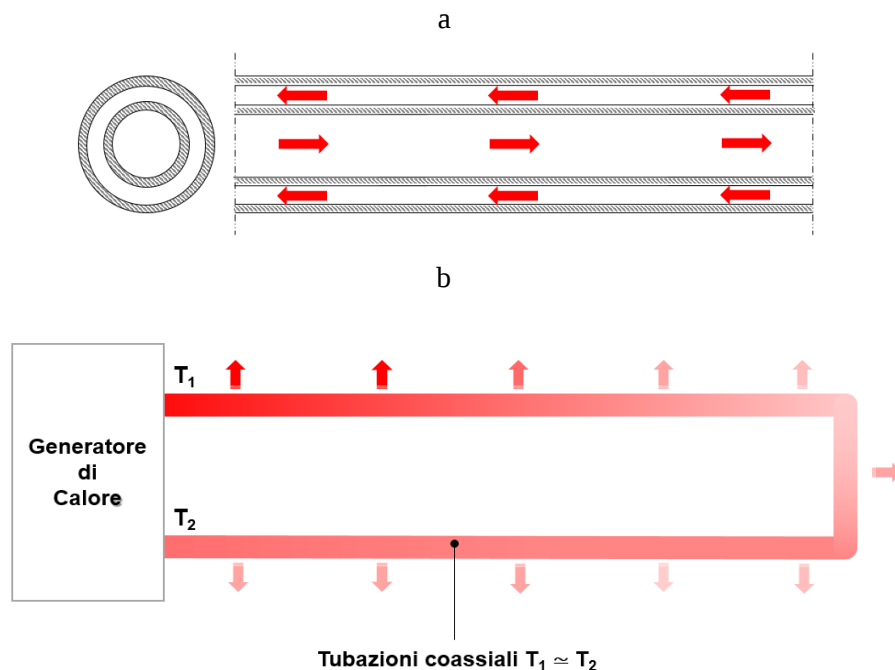


Figura A2 Riscaldamento basale di tipo coassiale;
a) sezione trasversale e longitudinale di tubazione coassiale per impianto basale;
b) schema di funzionamento di un impianto coassiale tradizionale.

Negli anni 2008/2009, presso il CREA (Consiglio per la ricerca in agricoltura e l'analisi dell'economia agraria) di Pescia, all'interno del progetto di ricerca nazionale Florener (Florovivaismo: Logistica e Risparmio Energetico) [20], è stato sperimentato un sistema di riscaldamento basale costituito da tubazioni coassiali brevettato [28] per riscaldare una serie di vasi posizionati su più bancali in cemento costituenti un'unica linea di coltivazione. L'impianto è stato alimentato con una caldaia a condensazione di nuova generazione. In ogni vaso, riempito

con terriccio, sono stati trapiantati due bulbi di calla, la quale, per poter garantire un'abbondante fioritura anche in inverno, necessita di una temperatura del substrato di coltivazione mantenuta costantemente al di sopra dei 14 °C. La temperatura nei diversi punti del terreno di coltura è stata rilevata attraverso l'impiego di data logger dotati di un sensore inserito nel terreno. I data logger sono stati collocati in tre diversi punti del bancale: uno in prossimità del generatore di calore (*start position*), uno al centro (*central position*), e uno alla fine della linea di coltivazione (*final position*). Parallelamente è stata allestita una linea di coltivazione riscaldata da un impianto basale costituito da tubazioni di tipo tradizionale per poter effettuare un confronto in termini di omogeneità di riscaldamento.

I risultati ottenuti sono riportati sinteticamente in figura A3. [30]

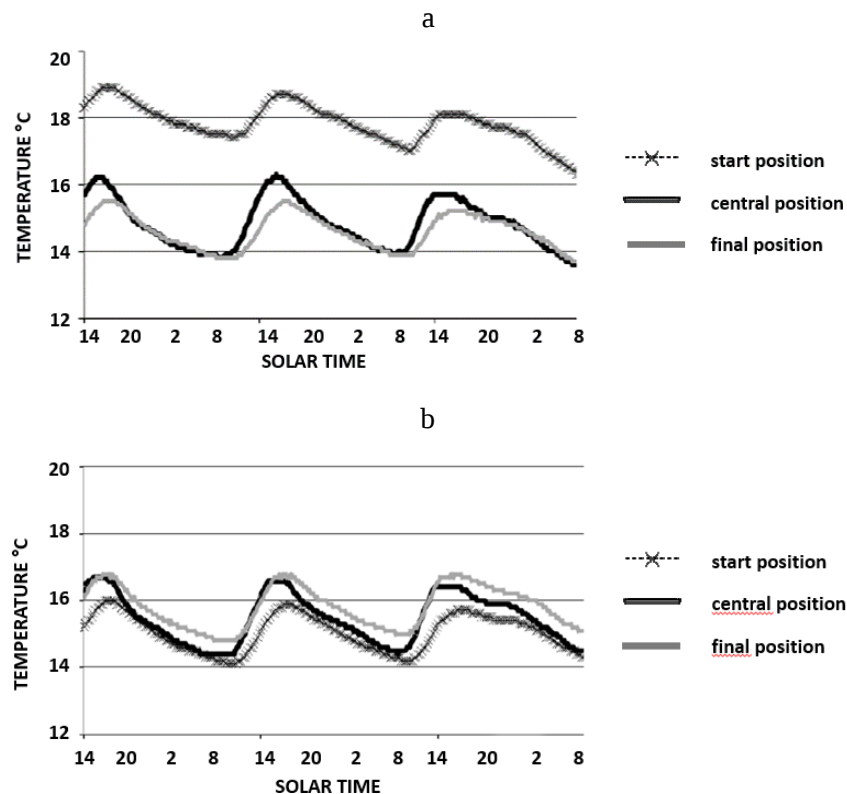


Figura A3 Andamento delle temperature nelle due tesi sperimentali;
a) impianto basale a tubazioni tradizionali;
b) impianto basale innovativo a tubazioni coassiali.

Nel sistema alimentato da tubazioni coassiali, la temperatura registrata nei tre diversi punti di acquisizione si è mantenuta mediamente intorno ai 15 °C garantendo omogeneità nel riscaldamento del terriccio contenuto nei vasi; al contrario nel sistema alimentato da tubazioni tradizionali si registrano temperature diverse nei tre punti di acquisizione. In particolare, in accordo con quanto illustrato nello schema di funzionamento dell'impianto basale tradizionale

riportato in figura A1, la temperatura in prossimità del generatore è stata mediamente più alta di quella registrata nel punto più distante.

ELENCO ATTIVITA' SVOLTE ANNI 2015 - 2018

I° Anno 2015-2016

SEMINARI E FORMAZIONE

- ***“Substrati di Coltivazione e Colture in Fuori Suolo”***
CREA-VIV di Pescia (PT), 29-30 Ottobre 2015
- ***“Luci e Ombre sulla Pianta: Effetti sui parametri funzionali ed estetici”***
Università di Pisa, Facoltà di Scienze Agrarie, 4 Dicembre 2015
- ***“Comunicazione della Ricerca Scientifica”***
Università degli studi della Tuscia, Viterbo (VT), 10 Dicembre 2015
- ***“Corso di Inglese Accademico”***
Università di Pisa, Facoltà di Scienze Agrarie, 25 Gennaio e 1-8-15 Febbraio 2016
- ***“Pompe di calore – climatizzazione in pompa di calore geo-acqua-aria”***
G.S.I – Global System Integration, Ponte di Piave, Treviso (TV), 14-15 Aprile 2016
- ***“Progettazione e gestione degli impianti irrigui nei parchi e nei giardini”***
CREA-VIV di Pescia (PT), 20-21-22 Aprile 2016
- ***“Corso di introduzione alla progettazione di Impianti Termici”***
AGENZIA FIORENTINA PER L'ENERGIA, Firenze (FI), 25-26-27 Maggio 2016
- ***“Terzo Livello sulle colture Fuori Suolo e loro gestione”***
CREA-VIV di Pescia (PT), 29-30 Ottobre 2016

CONVEGNI E WORKSHOP

- ***“Crop Modelling for sustainable greenhouse horticulture”***
Università di Pisa, Facoltà di Scienze Agrarie, 27 Novembre 2015
- ***“Efficienza Energetica ed Acustica dopo il DM. 26/06/2015”***
Euro Hotel di Cascina (PI), 31 Marzo 2016
- ***“Tecnologie e innovazione per una gestione sostenibile dell'agricoltura, dell'ambiente e della biodiversità”***
Certosa di Calci (PI), 7-8 Luglio 2016

EVENTI

- ***“Inaugurazione Serra dedicata all'agricoltura di precisione – Progetto Sam-Lab”***
Ce.R.S.A.A, Albenga (SV) 19 Febbraio 2016

II° Anno 2016-2017

SEMINARI E FORMAZIONE

- ***“L’ambiente statistico in R”***
Università degli studi della Tuscia, Viterbo (VT), 5-9 Giugno 2017

CONVEGNI E WORKSHOP

- ***“50° Convegno Internazionale AICARR: beyond NZEB buildings”***
Palazzo Viceconte, Matera (MT), 10-11 Maggio 2017
- ***“Convegno VitroSoi 2017: III° Convegno Nazionale sulla micropropagazione”***
Sala convegni Hotel San Lorenzo, Pescia (PT), 29-30-31 Maggio 2017
- ***“Advances in Horticultural and Postharvest Sciences”***
Scuola superiore San’Anna – Pisa (PI), 28 Settembre 2017

III° Anno 2017-2018

SEMINARI E FORMAZIONE

- ***“Corso di Scrittura scientifica”***
Università degli studi della Tuscia, Viterbo (VT), 16-17-18-19-20 Luglio 2018

CONVEGNI E WORKSHOP

- ***“Open Day AGROENER: Soluzioni innovative per la gestione della temperatura nelle colture protette ai fini del risparmio energetico”***
CREA-VIV di Pescia (PT), 1 Dicembre 2017
- ***“Open Day PROGETTO SUPERA: SUBstrati torba-free per specie vivaistiche a elevata Performance destinate a Recupero ambientali e Aree verdi a bassa manutenzione”***
CREA-VIV di Pescia (PT), 10 Maggio 2018
- ***“XII Giornate Scientifiche SOI 2018”***
Scuola di agraria e medicina veterinaria - Bologna (BO), 20-21 Giugno 2018

EVENTI

- ***“GreenWeek: Tour le fabbriche della sostenibilità e festival della green economy”***
Trento (TN), 13-14-15-16-17-18 Marzo 2018

LAVORI PRESENTATI

- ***“Valutazione di un sistema innovativo di riscaldamento basale per la coltivazione invernale in serra di piante orticole”***
XII Giornate Scientifiche SOI 2018 - Sessione “4.1 – Tecniche vivaistiche”
Bologna (BO), 20-21 Giugno 2018
- ***“Stato dell’arte e criticità dei sistemi di riscaldamento utilizzati in colture protette: risultati di un’indagine preliminare”***
Open Day AGROENER: Soluzioni innovative per la gestione della temperatura nelle colture protette ai fini del risparmio energetico
CREA-VIV di Pescia (PT), 1 Dicembre 2017

PUBBLICAZIONI

Terrosi C., 2018. ***“Riscaldamento colture protette: stato dell’arte e prospettive”***. *Il Floricoltore*, 55(7-8), pp. 44-47.

Terrosi C., Cacini S., Massa D., Fedrizzi M., Costa C., Cutini M., Brambilla M., Burchi G., 2018. ***“Valutazione di un sistema innovativo di riscaldamento basale per la coltivazione invernale in serra di piante orticole”***. *Acta Italus Hortus*, 23, p. 37.

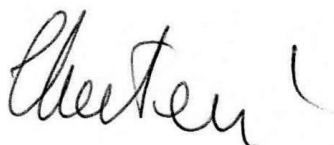
Brambilla M., Romano E., Cutini M., Fedrizzi M., Pagano M., Burchi G., Cacini S., Massa D., Terrosi C., Bisaglia C., 2018. ***“Effect of Bench Heating on Growing Medium Temperature and Heat Loss From a Greenhouse in Wintertime”***. Book of Abstracts del Convegno EurAgEng 2018 “New engineering concepts for a valued agriculture”, 8-12 July 2018, Wageningen, the Netherlands: http://ageng2018.com/sites/default/files/ageng2018_book_of_abstracts_draft_version.pdf

Brambilla M., Romano E., Cutini M., Fedrizzi M., Pagano M., Burchi G., Cacini S., Massa D., Terrosi C., Bisaglia C., 2018. ***“Sensitivity Analysis of a Modified Equation for Greenhouse Energy Demand Assessment”***. Book of Abstracts del Convegno EurAgEng 2018 “New engineering concepts for a valued agriculture”, 8-12 July 2018, Wageningen, the Netherlands: http://ageng2018.com/sites/default/files/ageng2018_book_of_abstracts_draft_version.pdf

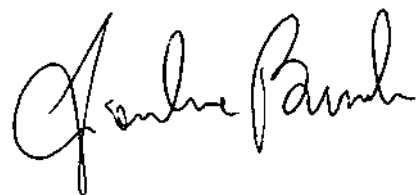
Brambilla M., Romano E., Cutini M., Fedrizzi M., Pagano M., Burchi G., Cacini S., Massa D., Terrosi C., Bisaglia C., 2018. ***“Effect of Bench Heating on Growing Medium Temperature and Heat Loss From a Greenhouse in Wintertime”***. Proceedings of EurAgEng 2018 Conference [in attesa di indicizzazione SCOPUS].

Brambilla M., Romano E., Cutini M., Fedrizzi M., Pagano M., Burchi G., Cacini S., Massa D., Terrosi C., Bisaglia C., 2018. ***“Sensitivity Analysis of a Modified Equation for Greenhouse Energy Demand Assessment”***. Proceedings of EurAgEng 2018 Conference [in attesa di indicizzazione SCOPUS].

Dottoranda
Chiara Terrosi



Tutor
Dott. Gianluca Burchi



Tutte le immagini e le tabelle riportate nella presente tesi di dottorato sono originali e state realizzate dal candidato durante il percorso triennale di attività. Parte dei dati presentati nella tesi sono stati oggetto di pubblicazioni scientifiche e presentati nell'ambito di convegni.

Dottoranda

Chiara Terrosi