

**ENEA**

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



MINISTERO DELLA  
TRANSIZIONE ECOLOGICA



## Sperimentazione di multistrati a film sottile e moduli BIPV per involucri vetrati semitrasparenti in serra

F. Carteni, M. Zotti, F. Giannino, G. Bonanomi, R. Motti, S. Mazzoleni



MUSA  
Reggia di Portici

## SPERIMENTAZIONE DI MULTISTRATI A FILM SOTTILE E MODULI BIPV PER INVOLUCRI VETRATI SEMITRASPARENTI IN SERRA

F. Cartenì, M. Zotti, F. Giannino, G. Bonanomi, R. Motti, S. Mazzoleni  
Università degli studi di Napoli Federico II, Dipartimento di Agraria

Dicembre 2021

### Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero della Transizione Ecologica - ENEA

Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - III annualità

Obiettivo: *Tecnologie*

Progetto: 1.1 Fotovoltaico ad alta efficienza

Work package 2: Fotovoltaico Piano

Linea di attività: LA2.18 BIPV: Sperimentazione di multistrati a film sottile e moduli BIPV per involucri vetrati semitrasparenti in serra;

Responsabile del Progetto Paola Delli Veneri ENEA

Responsabile del Work package: Paola Delli Veneri ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Sperimentazione di multistrati a film sottile e moduli BIPV in serra e relativi sistemi prototipali".

Responsabile scientifico ENEA: Lucia V. Mercaldo, A. Scognamiglio

Responsabile scientifico: Fabrizio Cartenì

## Indice

SOMMARIO.....	3
1 INTRODUZIONE.....	4
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI.....	6
2.1 SPERIMENTAZIONE SU PICCOLA SCALA.....	6
2.1.1 <i>Design del sistema sperimentale</i> .....	6
2.1.2 <i>Sperimentazione con luce a bassa intensità</i> .....	8
2.1.3 <i>Sperimentazione con luce ad alta intensità</i> .....	14
2.1.4 <i>Sperimentazione luce naturale su piante</i> .....	27
2.1.5 <i>Sperimentazione luce naturale su microalghe</i> .....	35
2.2 SPERIMENTAZIONE SU SCALA MEDIA.....	41
2.2.1 <i>Realizzazione serra scala media</i> .....	41
2.2.2 <i>Sensoristica IoT</i> .....	44
2.2.3 <i>Sperimentazione su piante</i> .....	44
2.2.4 <i>Sperimentazione su microalghe in bioreattore</i> .....	53
2.3 SIMULAZIONE DELLA RISPOSTA FOTOSINTETICA DI PIANTE IN CONDIZIONE DI LUCE DINAMICA.....	54
2.3.1 <i>Descrizione del modello e degli esperimenti per la sua calibrazione</i> .....	54
2.3.2 <i>Risultati</i> .....	56
2.4 STUDIO PRELIMINARE PER LA REALIZZAZIONE DI SERRA FOTOVOLTAICA SU LARGA SCALA.....	59
3 CONCLUSIONI.....	61
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI.....	62
5 ABBREVIAZIONI ED ACRONIMI.....	62
6 ALLEGATI.....	63
ALLEGATO 1 - CURRICULUM DEL GRUPPO DI LAVORO.....	63
ALLEGATO 2 – REPORT SENSORISTICA IoT.....	65

## Sommario

Il presente report descrive le attività svolte nel working package 2 LA2.18 denominato “BIPV: Sperimentazione su multistrati a film sottile e moduli BIPV per involucri vetriati semitrasparenti in serra”. L’attività è stata svolta dal centro museale “Musei delle scienze Agrarie -MUSA” dell’Università degli studi di Napoli Federico II. Gli obiettivi dell’attività sono stati quelli di valutare l’effetto dei multistrati a film sottile prodotti dall’ENEA e di moduli BIPV sulla crescita di organismi fotosintetici a tre diverse scale. Alla piccola scala sono state effettuate diverse sperimentazioni di laboratorio con varie specie vegetali e microalghe per valutare l’effetto di riduzione e selezione dello spettro luminoso da parte di multistrati a film sottile. I risultati indicano che a intensità luminose medie, l’effetto di riduzione della luce diventa trascurabile in termini di resa delle piante. Inoltre, ad elevate intensità luminose, i multistrati testati offrono un effetto di fotoprotezione dai potenziali danni causati da eccessive intensità luminose che nei nostri climi si verificano regolarmente. Per quanto riguarda la sperimentazione a media scala, è stata costruita una serra prototipale di circa 18 m<sup>2</sup> equipaggiata con sensoristica IoT, di cui metà con copertura di pannelli fotovoltaici semitrasparenti e metà di controllo con pannelli di policarbonato trasparenti. Le sperimentazioni a questa scala hanno confermato che la riduzione di radiazione solare da parte della copertura fotovoltaica non costituisce un limite alla crescita delle piante e microalghe testate. È stato inoltre sviluppato un modello di matematico di simulazione che permettesse di stimare i flussi fotosintetici delle piante attraverso i dati prelevati in tempo reale dai sensori aprendo la via per un controllo in tempo reale delle condizioni ambientali della serra in funzione della risposta simulata della pianta. Per quanto riguarda la larga scala è stata identificata una serra storica con una superficie di circa 120 m<sup>2</sup> che è stata oggetto delle attività della LA2.19.

## 1 Introduzione

Il presente report descrive le attività svolte nel working package 2 LA2.18 denominato “BIPV: Sperimentazione su multistrati a film sottile e moduli BIPV per involucri vetrati semitrasparenti in serra”. L’attività è stata svolta dal centro museale “Musei delle scienze Agrarie -MUSA” dell’Università degli studi di Napoli Federico II, quale soggetto responsabile, con la collaborazione dell’ENEA - Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l’energia e lo sviluppo economico sostenibile.

Gli obiettivi delle attività in carico al MUSA sono stati quelli di valutare l’effetto dei multistrati a film sottile prodotti dall’ENEA e di moduli BIPV sulla crescita di organismi fotosintetici. L’idea progettuale ha previsto che tale valutazione fosse svolta su differenti scale al fine di ottenere risultati diversi, ma complementari tra loro, per valutare la risposta produttiva di specie fotosintetiche in condizioni di luminosità ridotta. La prima scala, di dimensioni ridotte, denominata come piccola, è stata ideata per ottenere risultati in condizioni facilmente manipolabili e compatibili con i multistrati a film sottile 10x10 cm<sup>2</sup> progettati da ENEA nella LA2.16 del presente progetto. In parallelo, nella seconda scala di analisi, la scala media, si è provveduto alla realizzazione di una serra prototipale di piccole dimensioni equipaggiata con sensoristica IoT, progettata in collaborazione con l’ENEA, in cui in seguito sono state effettuate sperimentazioni di crescita sotto moduli BIPV. La sperimentazione su scala media ha usufruito delle informazioni ottenute sulla piccola scala, tramite il quale sono state ottimizzate le performance di crescita degli organismi vegetali tramite uno scale up di sistema. Per quanto riguarda la larga scala, è stata effettuato uno studio preliminare per la valutazione delle strutture preesistenti presso il centro MUSA ed il Dipartimento di Agraria dell’Università di Napoli Federico II ed è stata selezionata una serra storica di patologia vegetale, in stato di abbandono, per predisporre le attività poi realizzane nella linea LA2.19 che ha previsto la ristrutturazione e messa in opera di una serra fotovoltaica con moduli BIPV equipaggiata con sensoristica IoT e l’avvio di sperimentazioni di crescita di organismi fotosintetici.

Per quanto riguarda la sperimentazione su piccola scala, sono stati effettuati diversi esperimenti in laboratorio per analizzare l’effetto sulla fotosintesi dei multistrati a film sottile (10x10 cm<sup>2</sup>) prodotti dall’ENEA nella linea LA2.16. Nella fase di disegno sperimentale si è optato per una prima sperimentazione svolta in camera di crescita con luci a bassa intensità nel quale veniva utilizzata la specie modello *Arabidopsis thaliana*. La sperimentazione è stata effettuata per capire in maniera diretta quelli che sono i limiti di efficienza fotosintetica per la specie modello e per lavorare nel massimo della semplificazione della forma sperimentale ed evitare potenziali effetti aggiuntivi dovuti a fattori esogeni non previsti (es. fluttuazioni dei parametri ambientali, presenza di patogeni). Altresì sono state ottenute informazioni generali su come la selettività del film semitrasparente altera lo spettro luminoso, e come la carenza di una porzione di spettro altera l’efficienza di produzione di biomassa nella pianta. Successivamente, una prova simile è stata effettuata in condizioni di radiazione luminosa elevata in camera di crescita ed illuminazione LED su tre differenti specie di interesse agrario quali lattuga, basilico e pomodoro. Permettendo anche di seguire le tendenze di produzione di biomassa nel tempo. Una terza sperimentazione è stata effettuata in condizioni controllate ma con luce naturale su plantule di lattuga per valutare l’effetto dalla selettività dei multistrati a film sottile nel filtrare la luce solare, che presenta una naturale variabilità di intensità e angolo di incidenza durante l’arco della giornata. Nello specifico si è voluto optare per una modifica della configurazione dei sistemi sperimentali, quali opacità dei box ed inclinazione dei film sottili per valutare la capacità di alterazione di questi ultimi sull’intensità e composizione degli spettri luminosi e come questi potessero favorire/limitare la produttività vegetale. Parallelamente, la sperimentazione di piccola scala sotto luce naturale è stata effettuata anche su microalghe delle specie *Arthrospira platensis* e *Chlorella vulgaris*.

L’aumento di diffusione nell’utilizzo di queste specie e le loro caratteristiche nutrizionali interessanti perché ad alto contenuto di proteine (> 60%) per un’alimentazione vegana o vegetariana e per la presenza di composti capaci di promuovere attività fisiologiche ricostituenti, depurative e immunostimolanti hanno fatto convergere l’attenzione del presente progetto su queste due specie. Sia la *Arthrospira* che la *Chlorella* sono inoltre entrambe già commercializzate in Italia come integratori alimentari.

Le microalghe rappresentano una risorsa biologica naturale di grande importanza per le loro varie applicazioni, la loro coltivazione industriale su larga scala è sempre più diffusa principalmente per la produzione di integratori alimentari e molecole ad alto valore aggiunto in campo nutraceutico e

Farmaceutico/Medicale. Le microalghe attualmente presenti sul mercato sono diverse: *Arthrospira*, *Chlorella*, *Haematococcus*, *Dunaliella*, *Klamath*, *Schizochytrium*, ognuna con caratteristiche, applicazioni e funzionalità diverse. Sono inoltre diversi i principi attivi estratti dalle suddette microalghe che hanno applicazioni sempre più ampie sul mercato: Ficocianina, Astaxantina,  $\beta$ -carotene, olio  $\omega$ 3, DHA, EPA vegetale, pigmenti. Le microalghe con mercato potenzialmente più elevato in questo momento sono sicuramente la *Arthrospira* e la *Chlorella*, motivo per il quale sono state scelte nell'ambito della presente sperimentazione. La *Arthrospira* è una microalga il cui consumo umano è autorizzato in USA (GRAS dall'FDA) ed in Europa (dall'EFSA). In Italia, il Ministero della Salute le ha riconosciuto un ruolo come integratore alimentare con effetto fisiologico di sostegno e ricostituente. Ad essa si affianca, per la diffusione nell'utilizzo, la microalga *Chlorella*, anche essa autorizzata sia in Usa che in Europa da FDA ed EFSA, con l'effetto fisiologico disintossicante, utile per sostenere le difese naturali e le funzioni depurative dell'organismo. Da un punto di vista sistematico e tassonomico *Arthrospira* è un cianobatterio, mentre la *Chlorella* è una clorofita.

Nella presente attività del progetto è stata valutata la combinazione innovativa della coltivazione di microalghe fotosintetiche ad alto potenziale di mercato, con la produzione di energia da film sottili e moduli BIPV. L'associazione di questi due specifici sistemi di produzione basati sull'utilizzo della radiazione solare è potenzialmente vincente viste le caratteristiche di fotoadattamento delle specie considerate che ottimizzano la loro crescita in ambienti con illuminazione non eccessiva. La coltivazione su larga scala delle microalghe può avvenire principalmente in due modi, tramite *Raceway ponds*, sistemi di coltivazione aperti a ricircolo continuo, dotati di pale per il ricircolo della coltura, e Fotobioreattori, sistemi chiusi costruiti in materiale trasparente, con geometrie e dettagli che ottimizzano esposizione solare della coltura e ricircolo forzato. Le due tecniche di coltivazione si differenziano in base alle specie in coltivazione, ed in base ai costi di investimento e produttività di biomassa normalizzata alla superficie agricola occupata superiore. La tecnica di accoppiamento della crescita microalgale agli impianti fotovoltaici di nuova generazione può coinvolgere entrambi i metodi di coltivazione su larga scala. Nel corso del presente progetto sono stati svolti alcuni esperimenti su piccola scala al fine di valutare il comportamento delle due specie di interesse commerciale scelte in un ambiente ombreggiato da multistrati a film sottile con diverse impostazioni sperimentali.

Per quanto riguarda la media scala è stata realizzata una serra prototipale, progettata nella LA2.17, divisa in due sottomoduli, una parte di controllo con copertura di pannelli trasparenti in policarbonato e una parte con copertura di pannelli solari innovativi basati su tecnologia brevettata di micro-inseguimento per concentrare la luce solare su celle solari ad alta efficienza, lasciando passare luce diffusa, sviluppati dalla società Insolight. Inoltre, la serra prototipale è stata equipaggiata con sensoristica IoT per monitorare le condizioni ambientali all'interno dei due sottomoduli. In questo contesto sono state svolte invece prove per testare l'applicabilità del sistema sperimentale nell'ottica dell'ottimizzazione del sistema energia-pianta valutando la crescita di organismi fotosintetici in associazione con pannelli innovativi a ombreggiamento parziale controllato. Nella serra sono state effettuate prove sperimentali sulla risposta di crescita di produzioni agrarie di interesse commerciali adattabili a coltura in ombreggiamento. La specie individuata è stata la fragola (*Fragaria x ananassa*) in qualità di specie di sottobosco. Ulteriormente, data la dimensione della struttura ed il contesto dell'Orto botanico del MUSA che ha come missione quella di fungere da centro di conservazione della biodiversità vegetale delle specie naturali ed ornamentali, si è optato per la valutazione del prototipo di serra come area di propagazione e taleggio di essenze vegetali ornamentali come *Lavandula angustifolia* (lavanda). Inoltre, una sperimentazione in fotobioreattore da 150 litri è stata svolta all'interno della serra sulla specie *Arthrospira* in modo tale da verificare la correttezza delle stime di produzione ottenute su piccola scala.

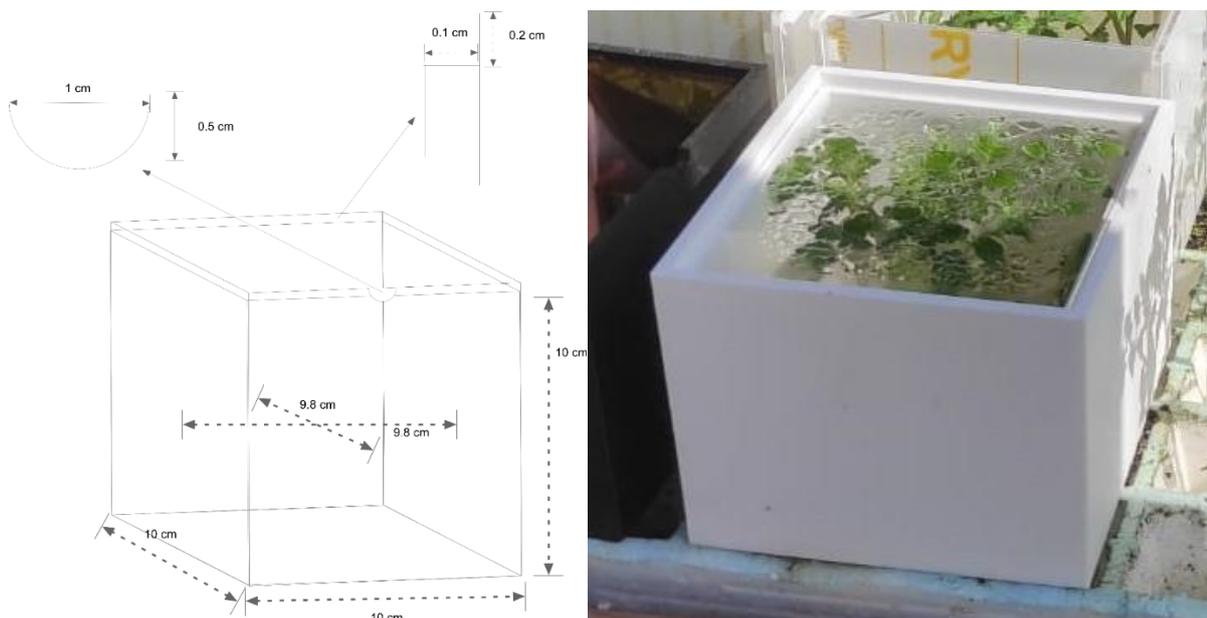
I risultati ottenuti alle varie scale di sperimentazione sono stati utilizzati per la calibrazione di un modello di fotosintesi capace di stimare, in silico, la performance fotosintetica integrando in tempo reale i dati raccolti dal sistema di sensori IoT.

## 2 Descrizione delle attività svolte e risultati

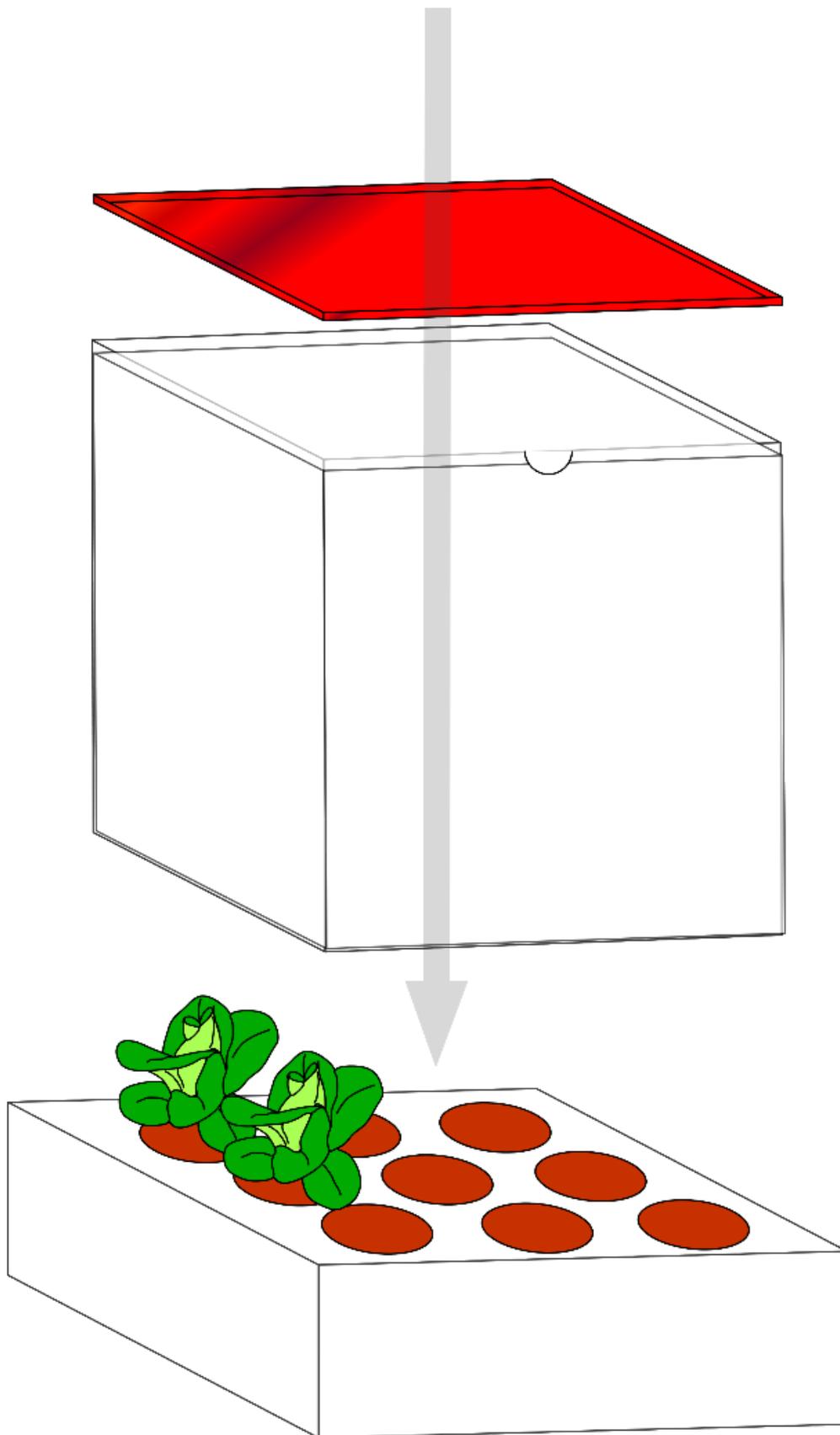
### 2.1 Sperimentazione su piccola scala

#### 2.1.1 Design del sistema sperimentale

La configurazione sperimentale che ha accomunato le varie prove è stata concepita per stimare la crescita delle specie vegetali all'interno di un sistema chiuso che permettesse il controllo del passaggio del fascio luminoso esclusivamente attraverso il film selettivo o tramite la modulazione del fascio luminoso provenienti dall'esterno. Per valutare effetto selettivo della luce dovuto al film, il sistema sperimentale è stato isolato da condizioni di luce diffusa o fasci di luce diretta tramite dei box in polycarbonato prodotti con stampante 3d (Figura 1). Il polycarbonato utilizzato è di tipo opaco che non permette il passaggio di luce laterale, in aggiunta è stato valutato se la colorazione del box influisse sulla crescita vegetale. Nel dettaglio, i box consistono in strutture dalla forma cubica con lato superiore ed inferiori liberi da pareti. Il lato superiore è stato concepito per permettere l'alloggio e fissaggio del film selettivo tramite guide di appoggio dello spessore di 1 mm per lato. La porzione inferiore del box è stata lasciata senza parete per permettere il sopra-posizionamento dell'ultimo sulle piante da testare. Nel dettaglio il box ha dimensioni di 11x11x11 cm con uno spessore delle pareti laterali di 4 mm per lato. I box assemblati con il film selettivo sono stati poggiati su porzioni di seminiere di polistirolo sagomate in forma quadrangolare con superficie (13x13 cm) eccedente rispetto al lato inferiore del box, al fine di permettere ampio appoggio. Per ogni seminiere è stata garantita la copertura sotto film di 9 alveoli dal diametro di 3 cm ed una profondità di 4 cm nel quale sono state alloggiate le specie vegetali (Figura 2).



**Figura 1** Box in polycarbonato progettato per la sperimentazione dei film sottili con relative misure (a sinistra). Prototipo reale di box in polycarbonato utilizzato in sperimentazione preliminare (a destra)



**Figura 2** Rappresentazione schematica del sistema sperimentale utilizzato per testare la crescita vegetale sotto film selettivo

Le piante per le prove sperimentali sono state tutte germinate con la stessa metodologia. Unica eccezione è stata per le piante impiegate nella seconda prova (*Lactuca sativa var. acuiuo*) che sono state acquistate già germinate in seminiere da 180 alveoli con una altezza media delle plantule di circa 5 cm. Nel dettaglio, Prima della fase di germinazione le superfici dei semi sono state sterilizzate per evitare possibili interferenze dovute a specie microbiche antagoniste delle specie vegetali testate. La sterilizzazione è avvenuta tramite trattamento con ipoclorito di sodio al 4 % in soluzione acquosa. I semi sono stati immersi in soluzione per 15 minuti e la soluzione messa in agitazione in un Becher tramite agitatore magnetico. Successivamente, i semi sono stati risciacquati con acqua distillata e lasciati gocciolare. L'operazione è stata ripetuta per 3 volte. Alla fine del processo di sterilizzazione i semi sono stati asciugati su carta assorbente in cappa microbiologica per mantenere le condizioni di sterilità. I semi dopo la fase di asciugatura sono stati tenuti al buio ad una temperatura di 4°C per una settimana al fine di ottenere stratificazione a freddo. Il trattamento è stato effettuato per ottenere germinazione contemporanea ed omogeneizzare le plantule da testare. Di seguito 2 semi per alveolo sono stati impiantati ad una profondità di circa 5 mm). Il terriccio è stato previamente sterilizzato in autoclave a temperatura di 121°C per 15 min. e pressione di 3 bar. Dopo la messa a dimora dei semi, il terreno è stato mantenuto umido per nebulizzazione ripetuta e giornaliera. Sulla superficie delle seminiere, per evitare disseccamento da evapotraspirazione degli strati di terriccio superficiale, sono state ricoperte con tre strati di fogli di carta filtro Whatman® 5 per filtraggio di soluzioni torbide ed acqua. La copertura di carta filtro è stata lasciata fino all'emersione dal suolo dei primi abbozzi germinativi.

### 2.1.2 Sperimentazione con luce a bassa intensità

La prima prova è stata effettuata in camera di crescita con illuminazione a base neon per testare il sistema sperimentale costituito dai box e dai vetrini. Contemporaneamente si è voluto visualizzare l'effetto della copertura con film semitrasparente sulla crescita delle piante.

Lo schema sperimentale consisteva in 5 trattamenti:

- Crescita in Box con vetrino trasparente. L'obiettivo è quello di valutare l'effetto del sistema sperimentale in assenza di schermatura luminosa ma in presenza di vetro trasparente (condizioni simili ad una serra)
- Crescita in Box con vetrino ricoperto da film sottile selettivo. Valutazione preliminare dell'effetto di schermatura dello spettro luminoso sulla crescita delle piante
- Crescita in Box di colore bianco in assenza di vetrino. Valutare se la crescita delle piante ha un effetto riconducibile al colore del box bianco o alla presenza del solo box
- Crescita in Box di colore nero in assenza di vetrino. Valutare se la crescita delle piante ha un effetto riconducibile al colore del box Nero o alla presenza del solo box
- Crescita senza box. ottenere un termine di paragone rispetto ad una crescita vegetale in piena esposizione al fascio di luce diretto

La camera di crescita consiste in una struttura rettangolare con scheletro in alluminio. Le pareti sono in fogli di bachelite sovrapposti a lamine di acciaio riflettenti rivolte verso l'interno della struttura al fine di favorire la massima diffusione ed efficienza dei fasci luminosi (Figura 3 i box disposti nella camera di crescita della prima sperimentazione. Si notano le pareti riflettenti nella camera di crescita.. La camera è termostata e la temperatura viene mantenuta grazie a serpentine riscaldanti decorrenti ai lati interni della struttura ed un sistema di raffreddamento a ventole che permettono la fuoriuscita dell'aria calda e l'entrata di aria fredda. L'impianto di illuminazione consiste in 8 lampade Osram-Biolux T8 30W/965 a neon regolabili a seconda dell'alternanza di ore di luce e buio necessarie e l'alternanza luce buio è regolabile tramite un interruttore temporizzato.



**Figura 3** i box disposti nella camera di crescita della prima sperimentazione. Si notano le pareti riflettenti nella camera di crescita.

Per ogni condizione sperimentale sono state ottenute 9 repliche. Le piante sono state germinate come descritte nel paragrafo precedente (*Design del sistema sperimentale*) in assenza di box e vetrini e coperte con carta filtro. Dopo la germinazione, che ha impiegato 2 gg la carta filtro è stata rimossa. Le piante sono state fatte acclimatare alle condizioni di luce della camera di crescita per 1 gg per poi essere diradate al numero di una singola pianta per alveolo.

Dopo la fase di acclimatamento i box sono stati posti al di sopra degli alveoli come da schema riportato in figura 2. In seguito, le piante sono state lasciate crescere per 14 gg. Nello specifico, l'esperienza è partita il giorno 03/11/2020 e si è conclusa il 20/11/2020 includendo le fasi di germinazione, acclimatamento e crescita. Il ciclo di alternanza giorno notte consisteva in 16 ore di luce ed 8 di buio. La temperatura della camera di crescita è stata fissata a 26°. Durante l'esperienza le plantule sono state controllate quotidianamente per valutare lo stato di salute generale e l'acqua è stata periodicamente somministrata per subirrigazione degli alveoli che erano stati preventivamente posti in piastre Petri da 14,5 mm con la funzione di sottovaso.

Alla fine del periodo di crescita i box sono stati rimossi e le piante distrutte per la raccolta dati. Le variabili misurate sono state:

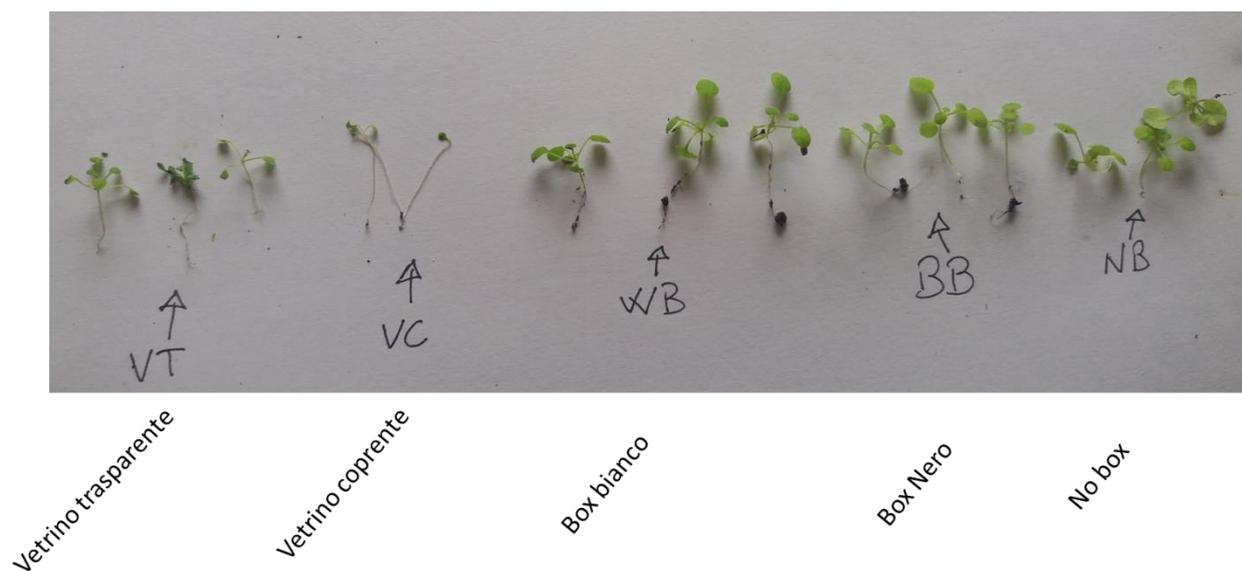
- 1-Numero di piante sopravvissute sul totale di 9 repliche
- 2-Biomassa totale delle plantule (somma delle biomasse per trattamento sperimentale)
- 3-Peso medio per pianta
- 4-Numero medio di foglie per pianta
- 5-Altezza media per pianta

A seguito delle misure biometriche delle piante testate sono state effettuate misure sull'intensità del fascio luminoso prodotto nella camera di crescita e dell'intensità dello spettro luminoso stesso. La misura è stata effettuata tramite uno spettroradiometro posto al disotto del box in presenza di film selettivo, in presenza di vetrino trasparente, in assenza di alcun genere di copertura ed in assenza di box. Dalla misurazione sono

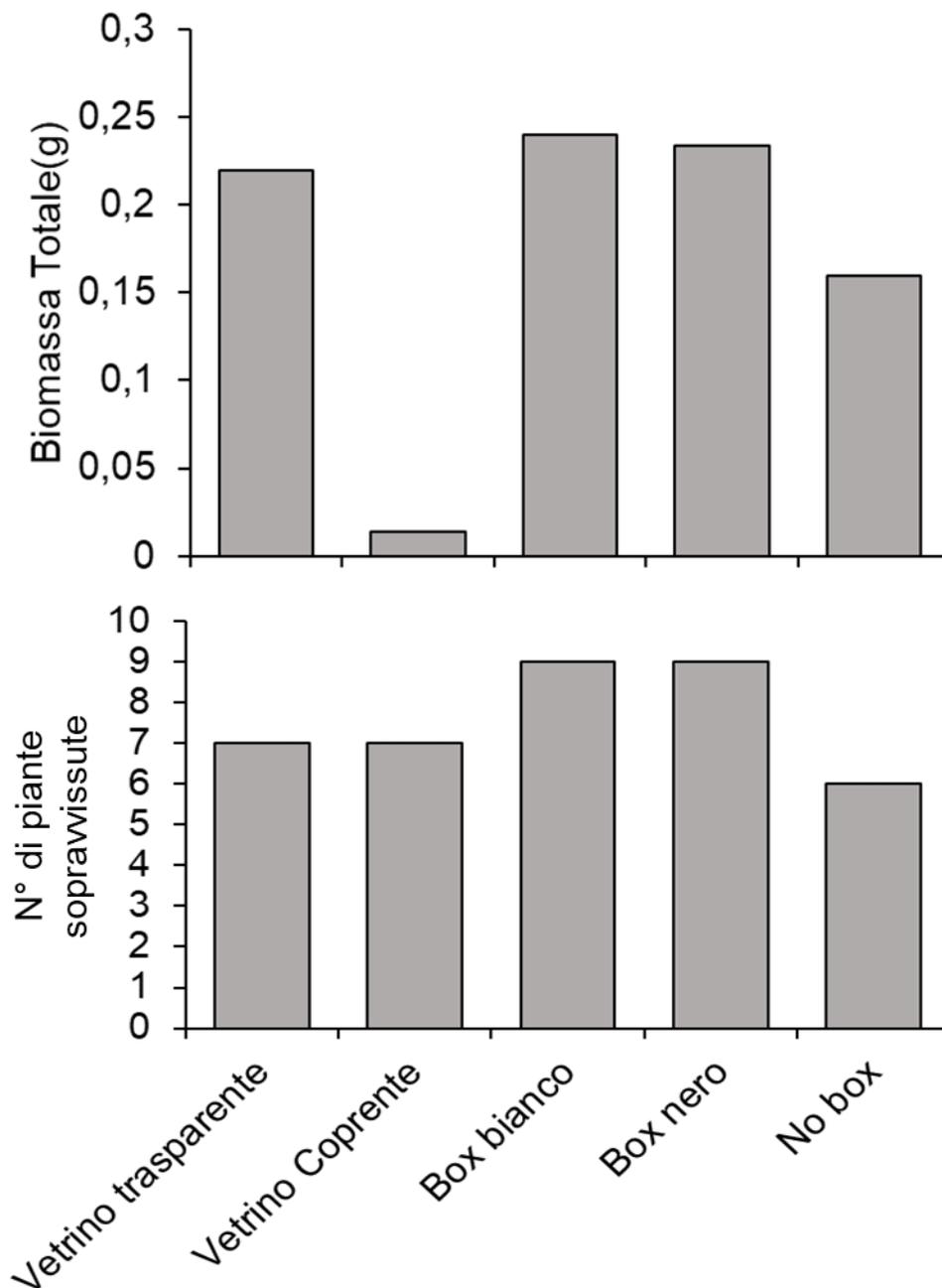
stati ottenuti i dati di intensità del fascio luminoso in Lux e l'intensità suddivisa per 8 porzioni spettrali della luce visibile (400-700 nm). Le 8 regioni spettrali misurate sono:

- 405-435 nm Violetto
- 440-500 nm Indaco
- 505-520 nm Blu
- 525-565 nm Verde
- 570-590 nm Giallo
- 595-625 nm Arancio
- 630-665 nm Rosso
- 670-690 nm Rosso lontano

Dopo 14 gg di crescita si è visualizzato l'effetto della copertura con film semi-trasparenti sulla crescita di *Arabidopsis thaliana* (Figura 4). Si è potuto riscontrare dalla sperimentazione che la presenza del film non incide sul numero di piante sopravvissute alla sperimentazione in quanto sia in film che in vetro trasparente il numero di piante sopravvissute è di 7 su 9. Diversamente la sopravvivenza delle piante aumenta in Box con assenza di copertura indifferentemente dalla colorazione di questi ultimi, essendo tutte le piante incluse nella prova arrivate alla fine della sperimentazione (9 su 9). Più bassi sono invece i livelli di sopravvivenza per le plantule prive di box di cui 6 su 9 sono arrivate alla fine della sperimentazione. Similarmente la biomassa cumulata nei vari trattamenti sperimentali segue la stessa tendenza delle piante sopravvissute ad eccezione delle piante di *A. thaliana* cresciute sotto film con una biomassa totale più bassa intorno ai 0,02 gr (Figura 5)



**Figura 4** Piante di *Arabidopsis thaliana* dopo 14 gg di crescita in camera di crescita sotto diverse condizioni di copertura di film sottili, sotto vetro trasparente, con box senza coperture e diverse colorazioni ed in assenza di box.



**Figura 5** Grafico a barre con (In alto) Biomassa totale delle plantule di *Arabidopsis thaliana* cresciute nelle diverse condizioni sperimentali ed Numero di piante di *A. thaliana* sopravvissute alla sperimentazione.

Questo è dovuto alla minore capacità di produrre biomassa per singola pianta che nel caso del film semitrasparente è minore rispetto a tutti gli altri trattamenti, che invece hanno tutti una capacità di crescita simile tra di loro (Figura 6). Alla stessa maniera, il numero di foglie prodotte per pianta è più basso sotto film semitrasparente con sole 2 foglie vere rispetto alle 5-6 foglie sotto vetro trasparente. In compenso le piante di *A. thaliana* sotto film hanno prodotto la maggiore elongazione della parte aerea comparate agli altri trattamenti.

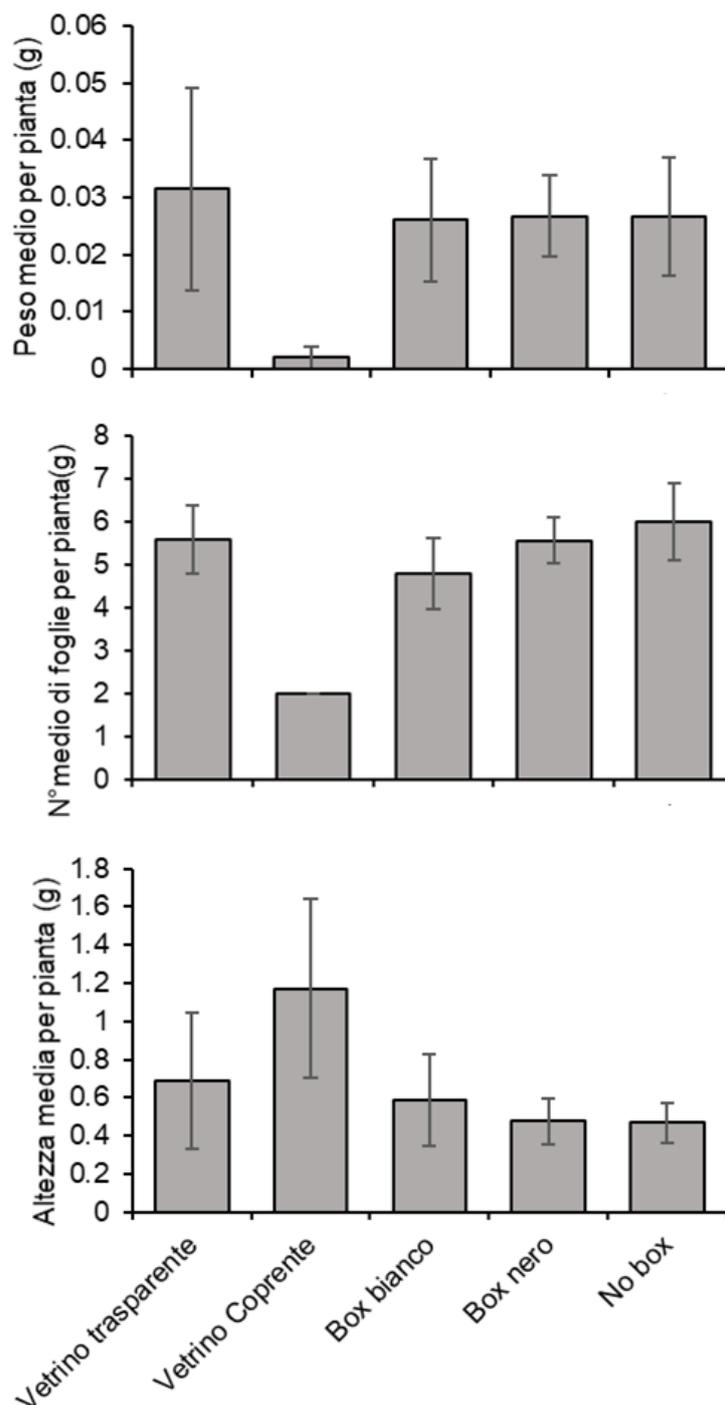


Figura 6 Grafici a barre di Peso medio per pianta (in alto), Numero medio di foglie per pianta (al centro) dell'altezza media della pianta (in basso) per le plantule di *A. thaliana* utilizzate nella sperimentazione. I segmenti sulle barre fanno riferimento alla deviazione standard

La misurazione della densità luminosa sotto le varie condizioni sperimentali ha fornito una valutazione degli effetti dei film semitrasparenti sul fascio luminoso. La PAR (Photosynthetic Active Radiation) nella camera di crescita raggiunge il massimo valore di intensità in assenza di copertura ( $147.94 \text{ PPFD } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ) mentre la presenza di box con vetro trasparenza influisce minimamente sulla PAR che arriva sulle plantule di *A. thaliana* con valori di  $118.00 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . Inversamente, si osserva un considerevole abbassamento della PAR sotto film semitrasparente con valori di PAR pari a  $32.00 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  (Figura 7). Per quanto riguarda gli

effetti del film sulla composizione relativa dello spettro della luce visibile, si osserva che sotto copertura trasparente lo spettro non varia nella sua composizione quando comparato con quello sotto luce diretta in camera di crescita. Inversamente, la selettività del film sulla porzione di spettro visibile nel blu è chiaramente visibile in figura 8 dove invece aumenta il contributo relativo di rosso e rosso lontano nello spettro (Figura 8).

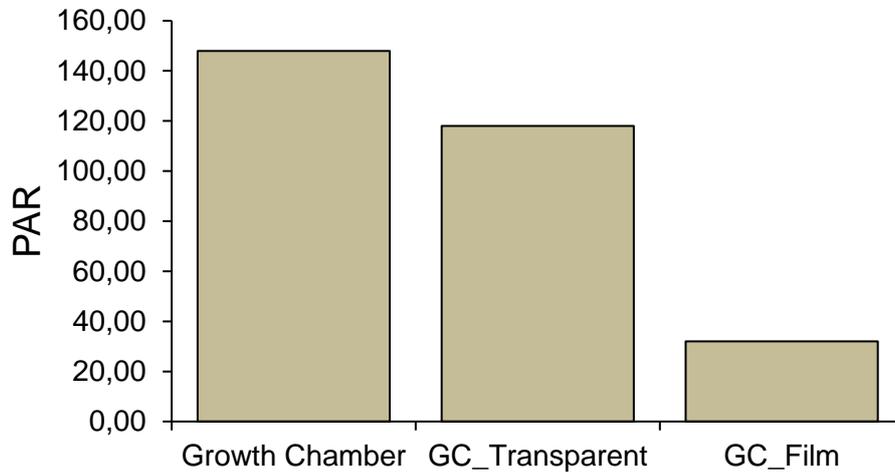


Figura 7 PAR in camera di crescita in condizioni normali, con Box e vetro trasparente e con Box ricoperto da film sottile

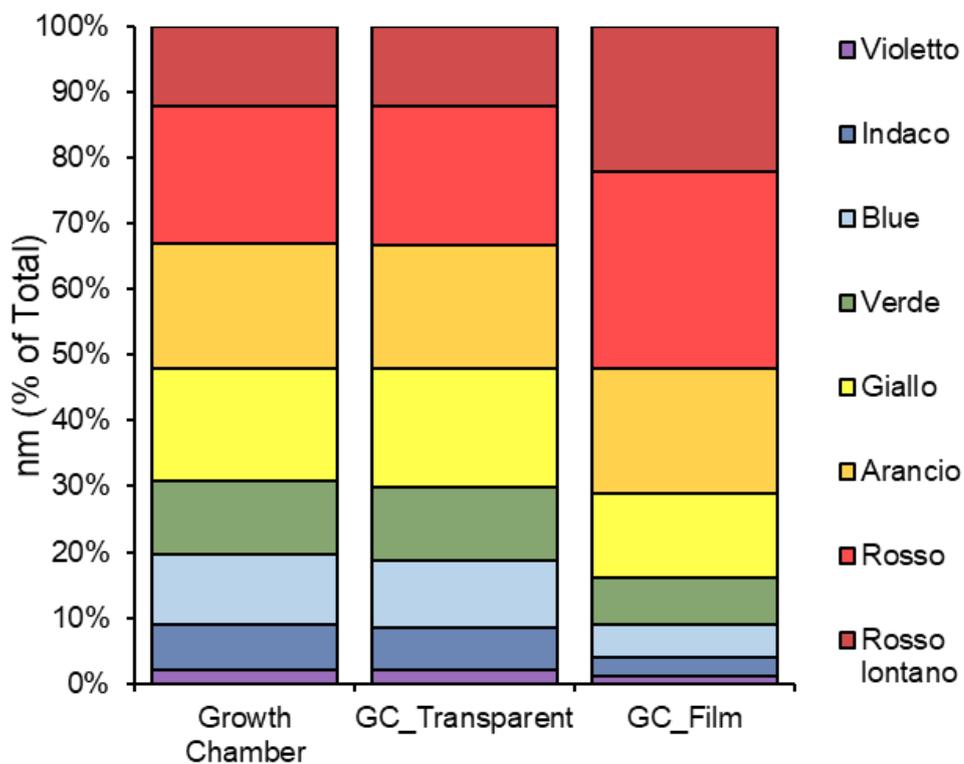


Figura 8 composizione relativa dello spettro luminoso suddiviso per regioni spettrali nella camera di crescita

### 2.1.3 Sperimentazione con luce ad alta intensità

Un'ulteriore sperimentazione è stata effettuata in camera di crescita per testare la selettività dei film sullo spettro luminoso ed il suo effetto sulla crescita vegetale. In questa sperimentazione si è voluto osservare se gli effetti valutati nelle precedenti sperimentazioni fossero legati alla specie vegetale utilizzata e se le condizioni di crescita riportate fino ad ora fossero state affette dalle condizioni ambientali e dalla fonte luminosa utilizzata. In aggiunta è stata valutata la crescita delle piante nel periodo sperimentale in tre tempi, inizio, nel mezzo ed alla fine dell'esperimento.

La prova è stata effettuata presso il dipartimento di scienze Agrarie dell'Università degli studi Federico II di Napoli a Portici, in camera di crescita (KBP-6395F, Termaks, Bergen, Norway) equipaggiata con unità a pannello LED (Light-Emitting Diode) (K5 Series XL750, Kind LED, Santa Rosa, CA, USA) con un range di emissione della lunghezza d'onda che va da 400–700 nm.

Il pannello a Led posizionato all'interno della camera di crescita assicura un'omogenea distribuzione della luce ( $2000 \pm 10 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) sull'intera superficie del bancale ( $0.4 \text{ m}^2$ ) (Figura 9). Ciò nonostante, le seminiere con i rispettivi vassoi in alluminio sono stati ruotati ogni 24 h per incrementare l'informatività dell'intensità luminosa. La densità del flusso dei fotoni fotosintetici (PPFD) e lo spettro luminoso sono stati regolati tramite uno spettroradiometro (MSC15, Gigahertz-Optik, Turkenfeld, Germany). La temperatura e l'umidità relativa dell'aria è stata impostata a 24/18 °C and 75/85% nel ciclo giorno/notte in accordo con un fotoperiodo impostato su 16 h di luce ed 8 di buio.



**Figura 9** la camera di crescita utilizzata nella terza sperimentazione con il pannello LED (Light-Emitting Diode) (K5 Series XL750, Kind LED, Santa Rosa, CA, USA)

Le specie testate sono state *Lactuca sativa* var. *canasta*, *Lycopersicon esculentum* (Pomodoro) var. *pachino* ed *Ocimum basilicum* (Basilico) var. *genovese*. Le plantule previamente germinate con la stessa

metodica citata in sez. 1.3 sono state utilizzate per la prova con un'altezza media di partenza di 5.26 cm per la Lattuga, 7.78 cm per Pomodoro e 4.48 cm per Basilico. Le piante sono state sistemate in seminiere di polistirolo con diametro alveolare di 3 cm circa e adagiate su contenitori in alluminio contenenti soluzione nutritiva Hoagland preparata con acqua distillata contenente 2.0 mM di nitrato, 0.25 mM zolfo, 0.20 mM fosforo, 0.62 mM potassio, 0.75 mM calcio, 0.17 mM magnesio, 0.25 mM ammoniaca, 20  $\mu$ M ferro, 9  $\mu$ M manganese, 0.3  $\mu$ M rame, 1.6  $\mu$ M zinco, 20  $\mu$ M boro, and 0.3  $\mu$ M molibdeno, con una conduttività elettrica (EC) of 0.35 dS m<sup>-1</sup> e pH di 6.0. Al di sopra di ogni seminiera (1 per specie) sono stati posti 4 box, 2 con vetrino ricoperto da film selettivo e 2 con vetro tal quale. Per ottenere una visualizzazione del processo di sviluppo delle piante durante l'esperimento, il campionamento delle piante è stato effettuato in tempistiche differenti. Una misura delle piante in condizioni di partenza (time 0 – T0), misurazione delle piante dopo 5 giorni di crescita nelle condizioni sperimentali (time 1 – T1) ed una misura alla fine della sperimentazione dopo ulteriori 5 giorni di crescita (time 2- T2) (Figura 10).

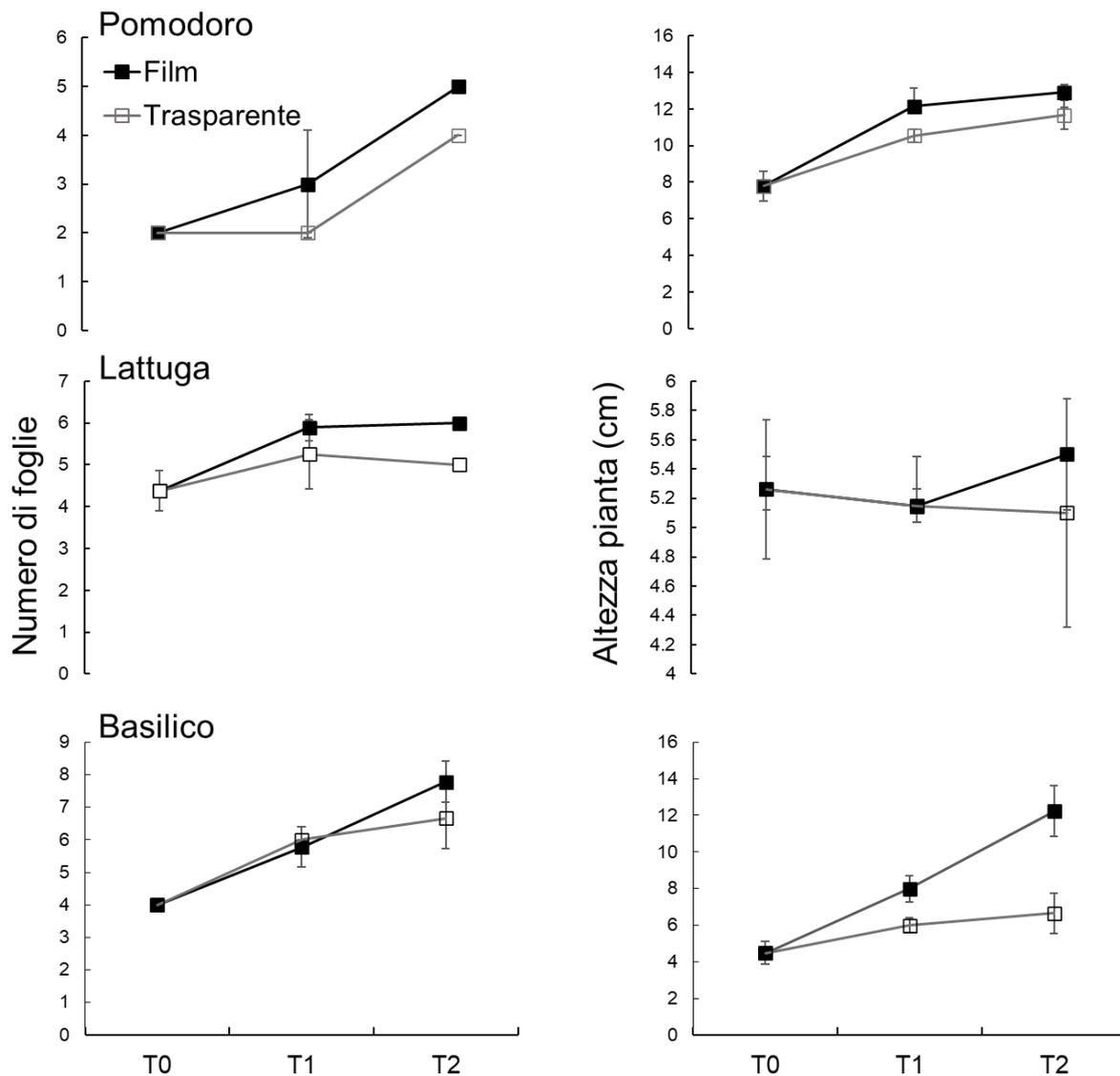
Per ogni tempo (t) sono stati raccolti dati biometrici sulla crescita delle specie vegetali utilizzate.

Le variabili misurate sono state:

- Numero di foglie vere (escluse le foglie cotiledonari).
- Lunghezza della parte aerea (Dal colletto all'apice).
- Biomassa radicale fresca e secca.
- Biomassa dello stelo fresco e secco.
- Biomassa fogliare fresca e secca.
- Biomassa totale fresca e secca
- Rapporto di biomassa tra porzione radicale e fogliare.
- Area fogliare
- Lunghezza fogliare
- Larghezza fogliare
- Rapporto tra lunghezza e larghezza delle foglie
- Spad (Misurazione della clorofilla con assorbanza tra 650 e 950 nm).



**Figura 10 a sinistra piante di pomodoro (in alto), di lattuga (in mezzo) e di basilico (in basso) cresciute sotto vetro trasparente e film semitrasparente dopo 5 giorni di crescita in camera di crescita. A destra le stesse specie vegetali nelle stesse combinazioni dopo 10 gg in camera di crescita**



**Figura 11** Andamento di numero di foglie (a sinistra) e Altezza della pianta (destra) in pomodoro (in alto), lattuga (in mezzo) e basilico (in basso) sotto film semitrasparente o vetro in tre tempi di crescita.

Dall'analisi dei dati nelle tre date di campionamento si è osservato che, indifferentemente dalla specie, il numero di foglie e l'altezza delle piante tende ad essere maggiore sotto copertura di film semitrasparente quando confrontato con quelle sotto vetro trasparente (Figura 11). Diversamente si è denotato che il tasso di crescita per numero di foglie e altezza della pianta tende ad essere inferiore solo per le plantule di lattuga. Per quanto riguarda invece i parametri legati alla biomassa si osservavano andamenti simili per le varie specie testate con valori di crescita molto simili tra le piante cresciute sotto vetro trasparente e film semitrasparenti (Figura 12). Nel dettaglio, per la biomassa radicale fresca e secca si osservano valori di crescita simili sotto vetro e sotto film, ciononostante si denotava che le biomasse radicali erano maggiori nelle piante sottovetro ad eccezione del pomodoro che ha mostrato preferenza di crescita sotto copertura semitrasparente (Figura 13). Per il peso del fusto, i dati sono disponibili unicamente per pomodoro e basilico data la particolare morfologia nelle piante di lattuga che tendono a sviluppare il fusto durante la fioritura e che per il resto della vita invece non è presente. Nelle due specie si osserva che le piante sviluppavano strutture adibite al

mantenimento delle foglie più robuste sotto film semitrasparente rispetto alle piante sotto vetro trasparente (Figura 14).

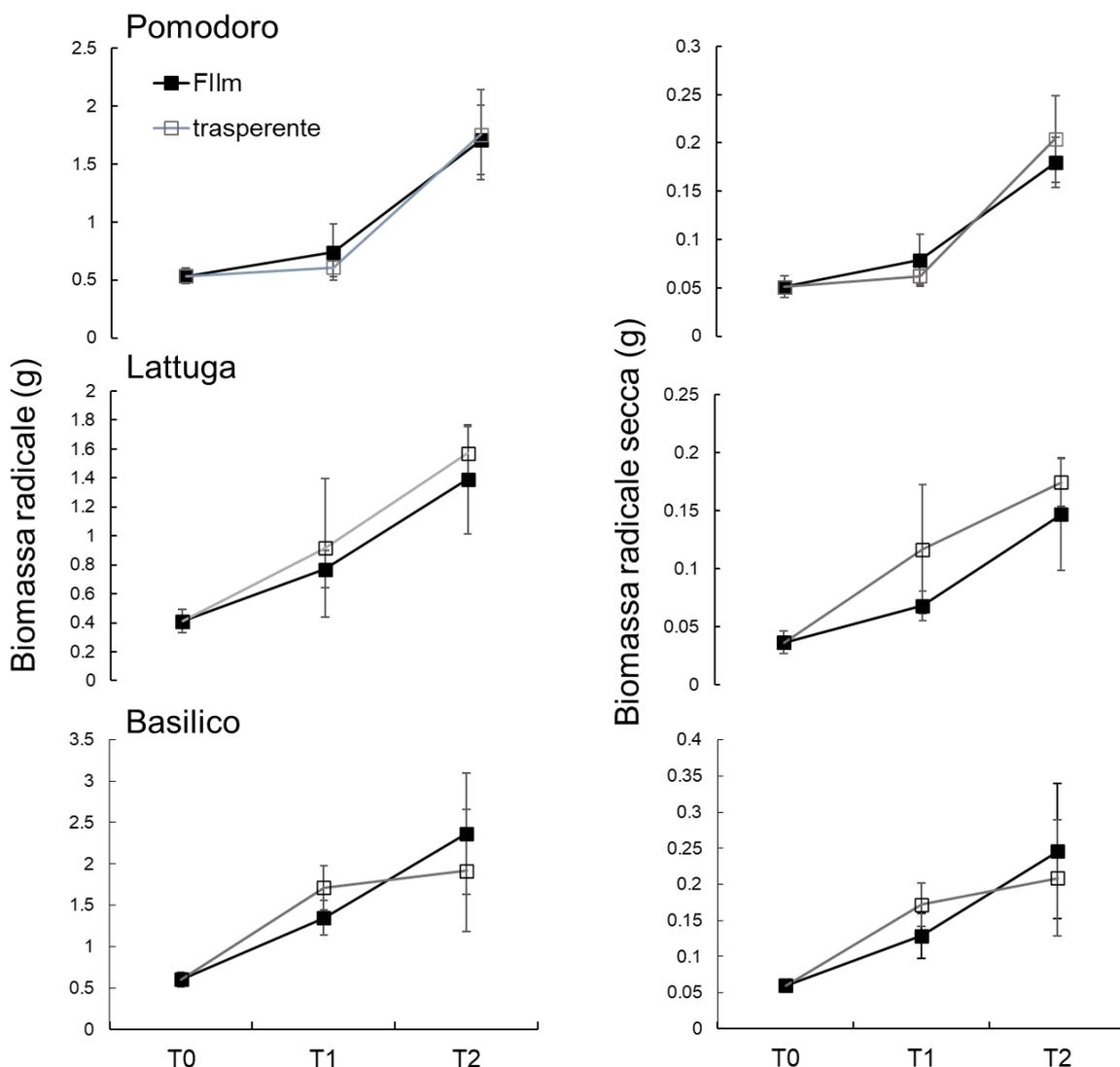


Figura 12 Andamento della biomassa radicale fresca (a sinistra) e secca (destra) in pomodoro (in alto), lattuga (in mezzo) e basilico (in basso) sotto film semitrasparente o vetro in tre tempi di crescita.

La tendenza delle piante a sviluppare fusti più pesanti sotto film si riflette anche sulla porzione fogliare della parte aerea. Infatti questa tende ad essere sempre maggiore sotto film semitrasparente rispetto alle piante sotto vetro trasparente, nonostante in molti casi i valori della crescita nelle due condizioni sperimentali sono sovrapponibili con poche differenze tangibili. Unica eccezione era per le piante di lattuga che sviluppavano foglie dal peso secco maggiore sotto copertura trasparente che sotto film (Figura 13 e Figura 14). L'aggregazione dei dati di biomassa ci dà una visione della crescita totale sviluppata durante i tre tempi di crescita nell'esperimento. Dai dati di biomassa totale si osserva che generalmente le piante hanno un accrescimento maggiore sotto film semitrasparente. Ad eccezione per il peso secco totale nelle piante di lattuga. Ciononostante, i valori di accrescimento sono molto simili sotto vetro e sotto film. Si osserva quindi, che le differenze prima osservate nella biomassa del fusto e biomassa fogliare vengono compensate nella

biomassa totale grazie agli accrescimenti maggiore negli apparati sotto vetro trasparente (Figura 15). L'ultima osservazione è confermata dai valori del rapporto tra biomassa radicale e biomassa della porzione aerea (R/S), in cui si osservano crescite maggiormente sbilanciate verso gli apparati radicali sotto copertura trasparente rispetto alle crescite sotto film semitrasparente. L'andamento dei rapporti R/S è simile per tutte le specie e si mantiene costante durante tutto l'arco dell'esperimento con unica eccezione per il pomodoro dopo 5 gg di crescita in cui il rapporto R/S è di poco maggiore sotto film (Figura 16).

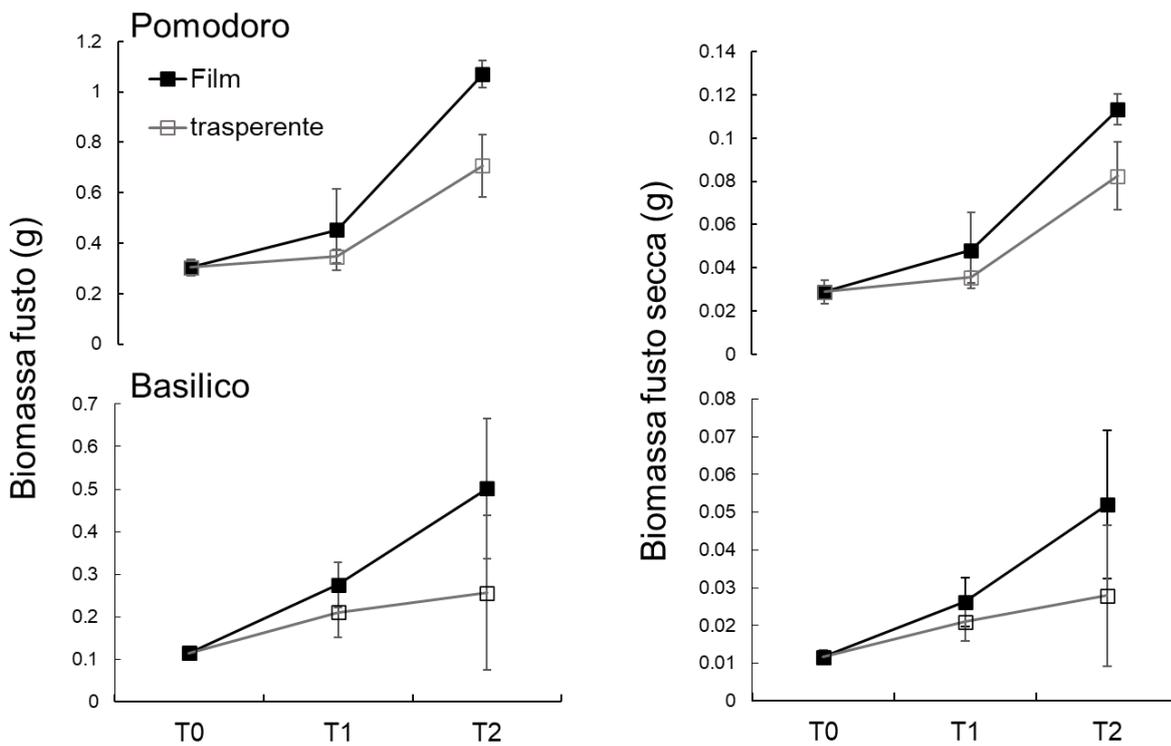


Figura 13 Andamento della biomassa del fusto fresca (a sinistra) e secca (destra) in pomodoro (in alto), e basilico (in basso) sotto film semitrasparente o vetro in tre tempi di crescita.

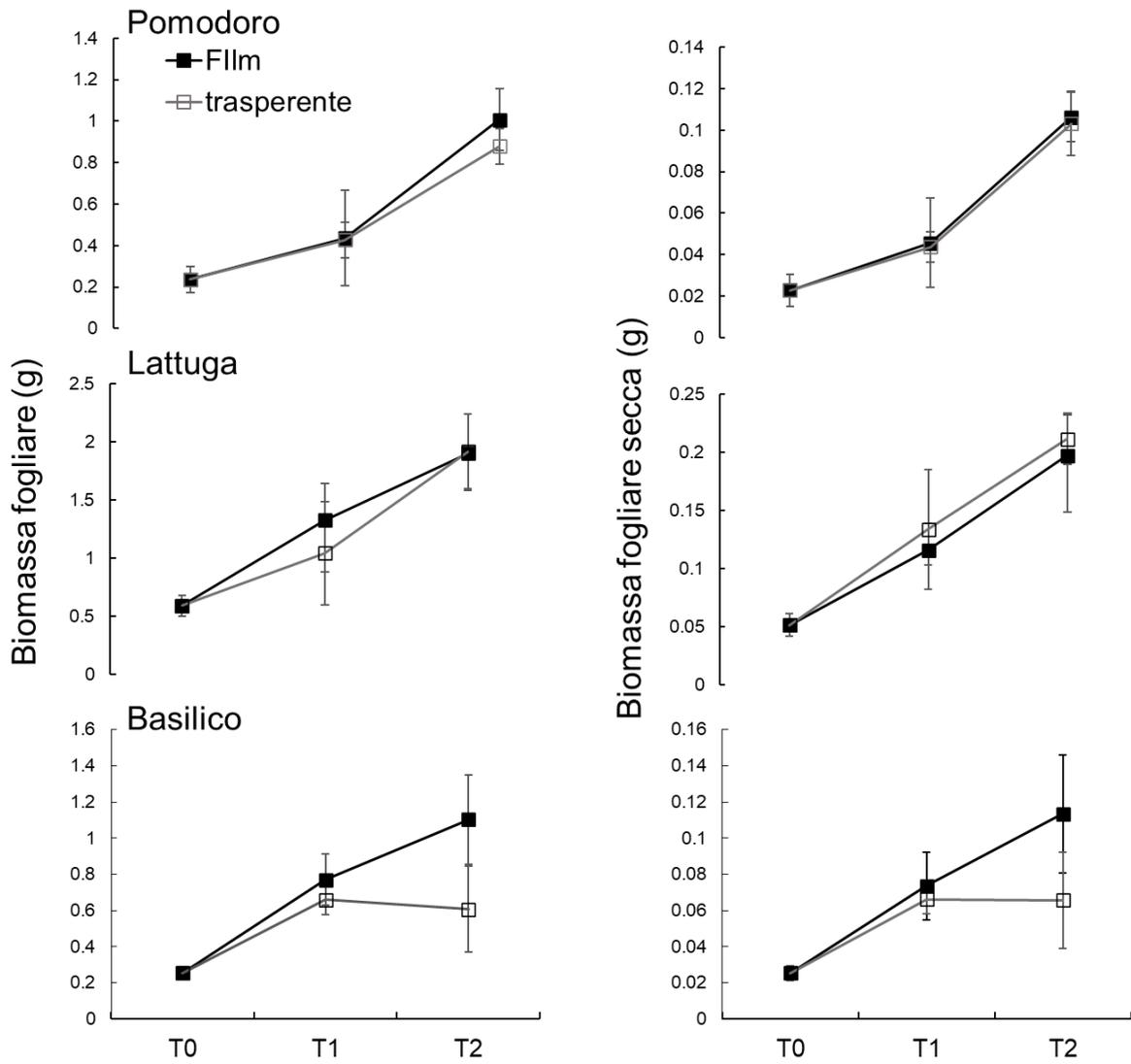
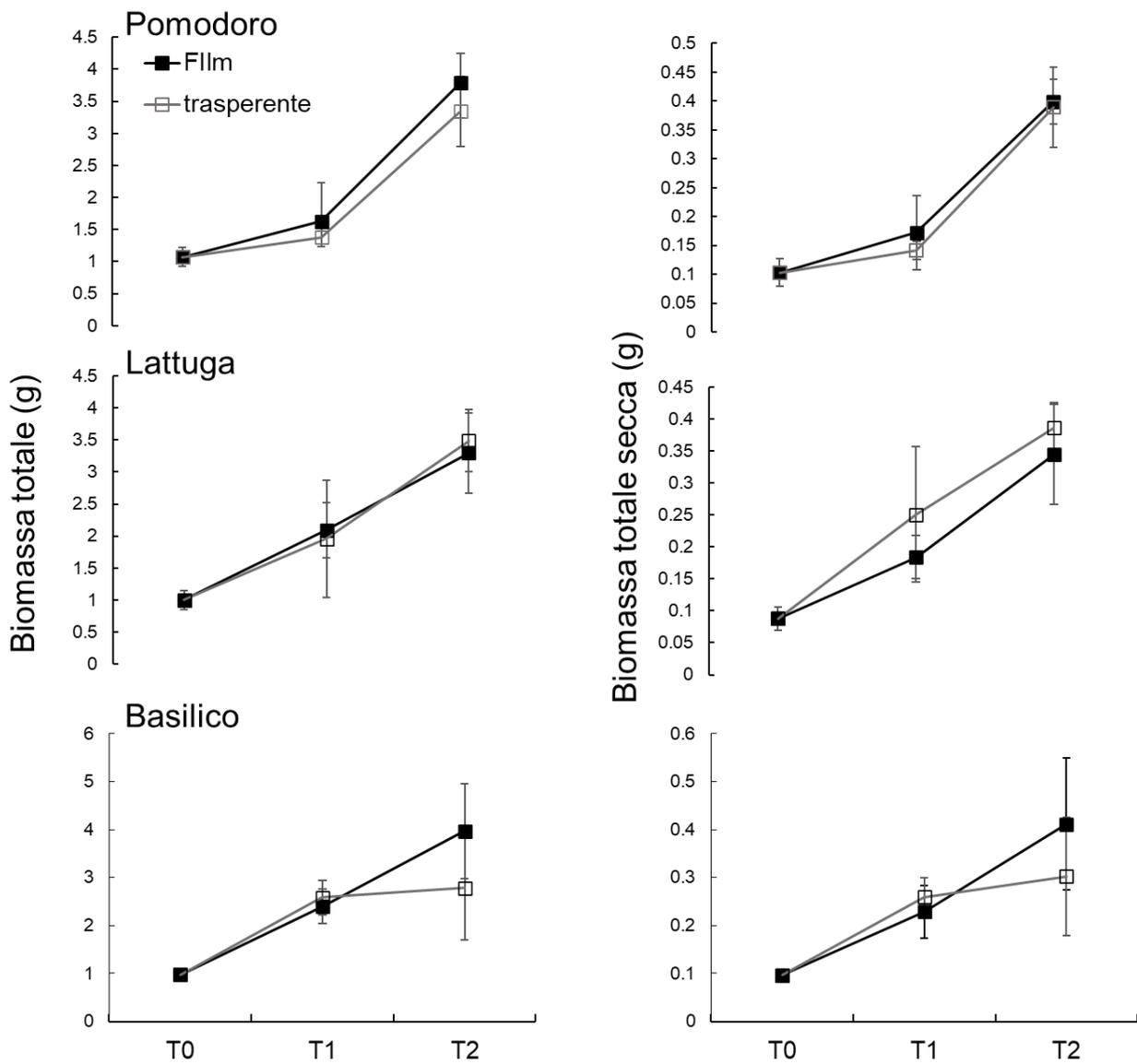


Figura 14 Andamento della biomassa fogliare fresca (a sinistra) e secca (destra) in pomodoro (in alto), lattuga (in mezzo) e basilico (in basso) sotto film semitrasparente o vetro in tre tempi di crescita.



**Figura 15** Andamento della biomassa totale fresca (a sinistra) e secca (destra) in pomodoro (in alto), lattuga (in mezzo) e basilico (in basso) sotto film semitrasparente o vetro in tre tempi di crescita.

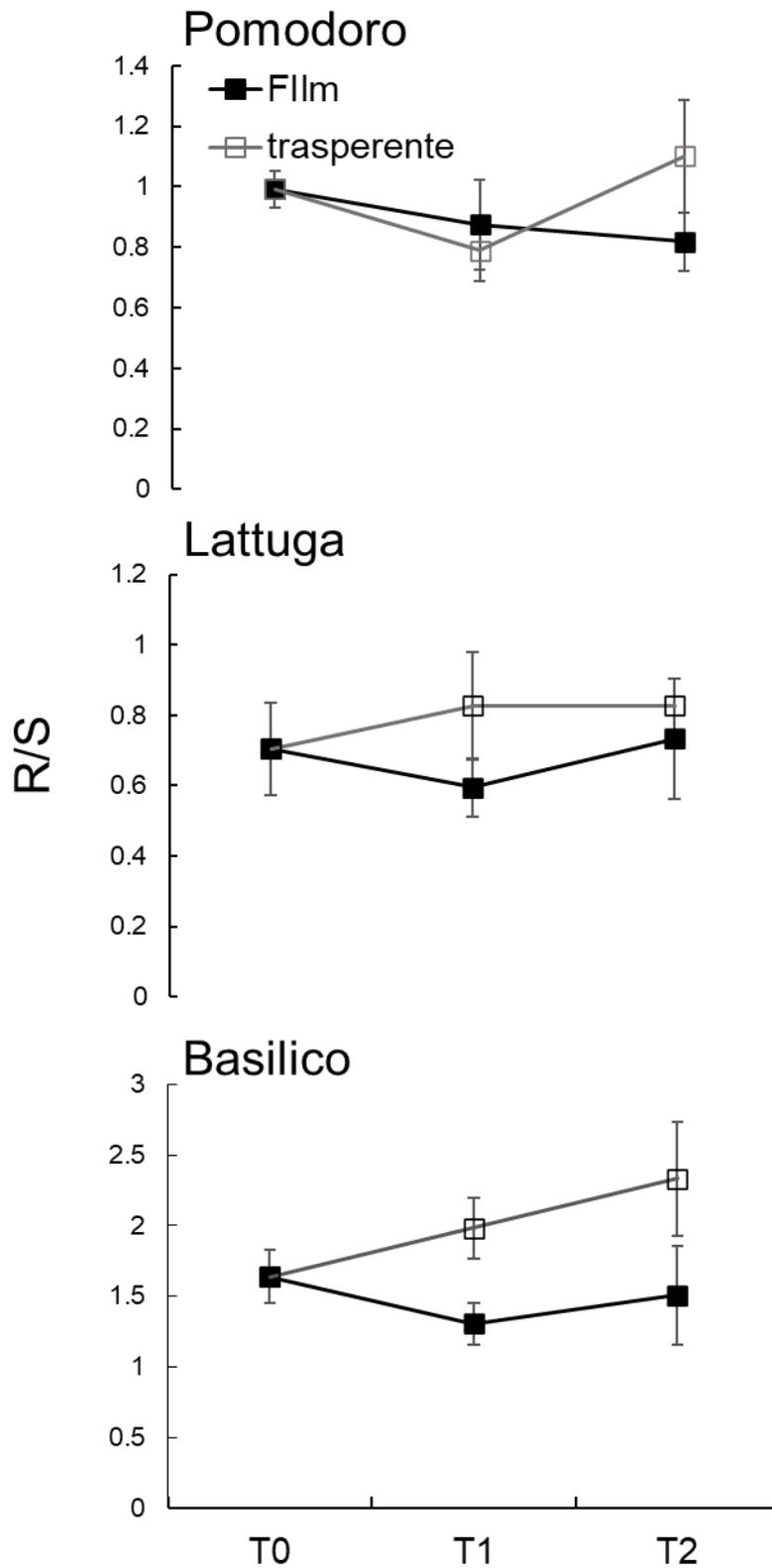
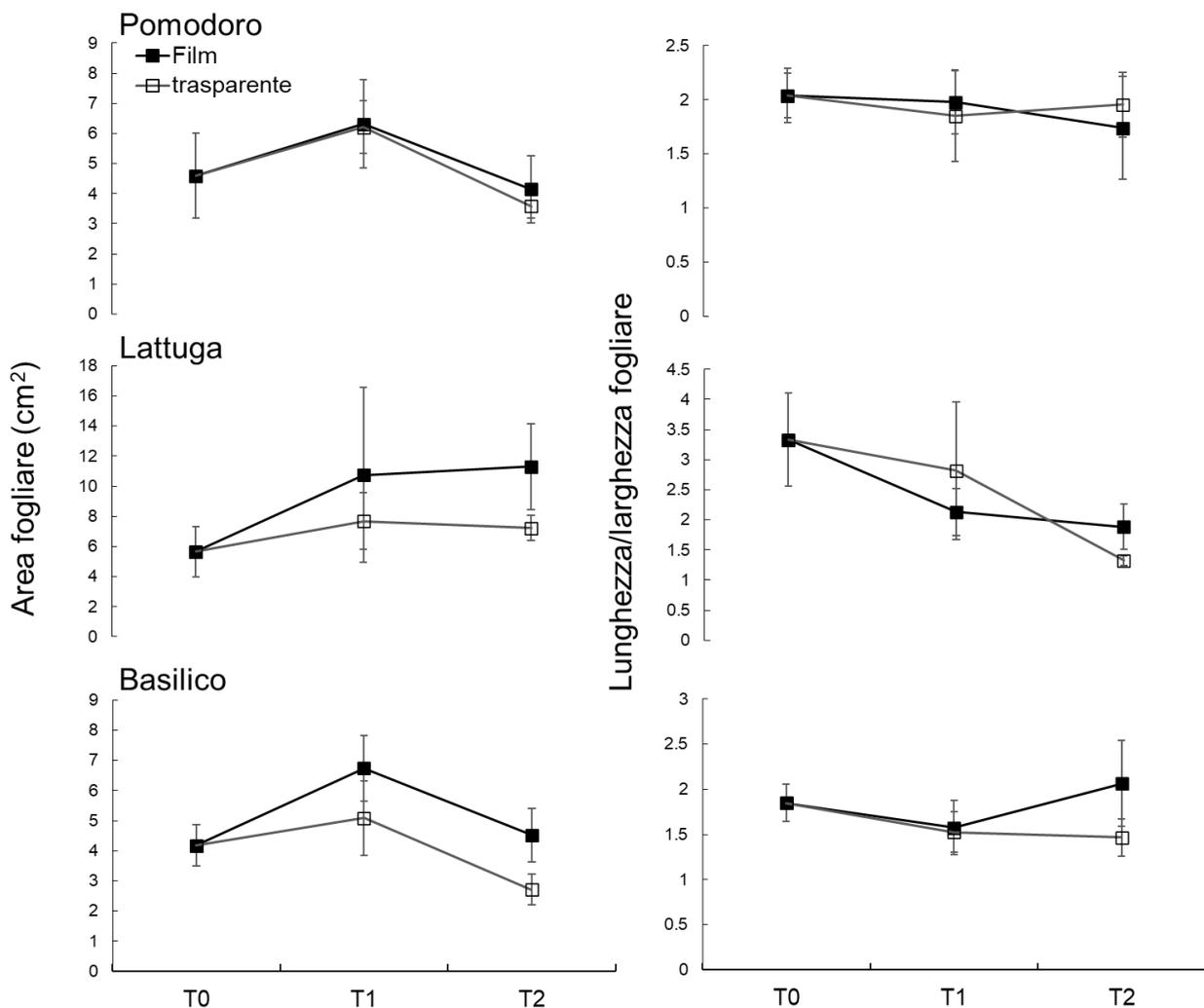


Figura 16 Andamento del rapporto tra biomassa radicale fresca e biomassa aerea fresca in pomodoro (in alto), lattuga (in mezzo) e basilico (in basso) sotto film semitrasparente o vetro in tre tempi di crescita.

Per quello che riguarda le biometrie fogliari si osserva che le piante sotto film sviluppano un'area fogliare maggiore rispetto a quelle sotto vetro, meno accentuata è la maggiore area fogliare sotto film per pomodoro ma comunque in linea con il comportamento generale delle altre 2 specie testate (Figura 17). Delle aree fogliari si osserva che sia sotto film che sotto vetro trasparente non c'è un preferenza di sviluppo della foglia se verso la larghezza o lunghezza in tutte e tre le specie. Inversamente quando analizzate le variabili di lunghezza e larghezza fogliare singolarmente si notano differenze consistenti per la lunghezza e la larghezza degli apparati fogliari in lattuga e basilico che tendono ad essere maggiori sotto film rispetto a vetro trasparente (Figura 18). Per quello che riguarda i contenuti in clorofilla non si osservano differenze marcate nelle varie specie testate e sotto diverse condizioni luminose ad eccezione del basilico che ha valori di SPAD molto più alti sotto copertura trasparente rispetto a coperture semitrasparenti (Figura 19).



**Figura 17** Andamento dell'area fogliare (a sinistra) e secca (destra) in pomodoro (in alto), lattuga (in mezzo) e basilico (in basso) sotto film semitrasparente o vetro in tre tempi di crescita.

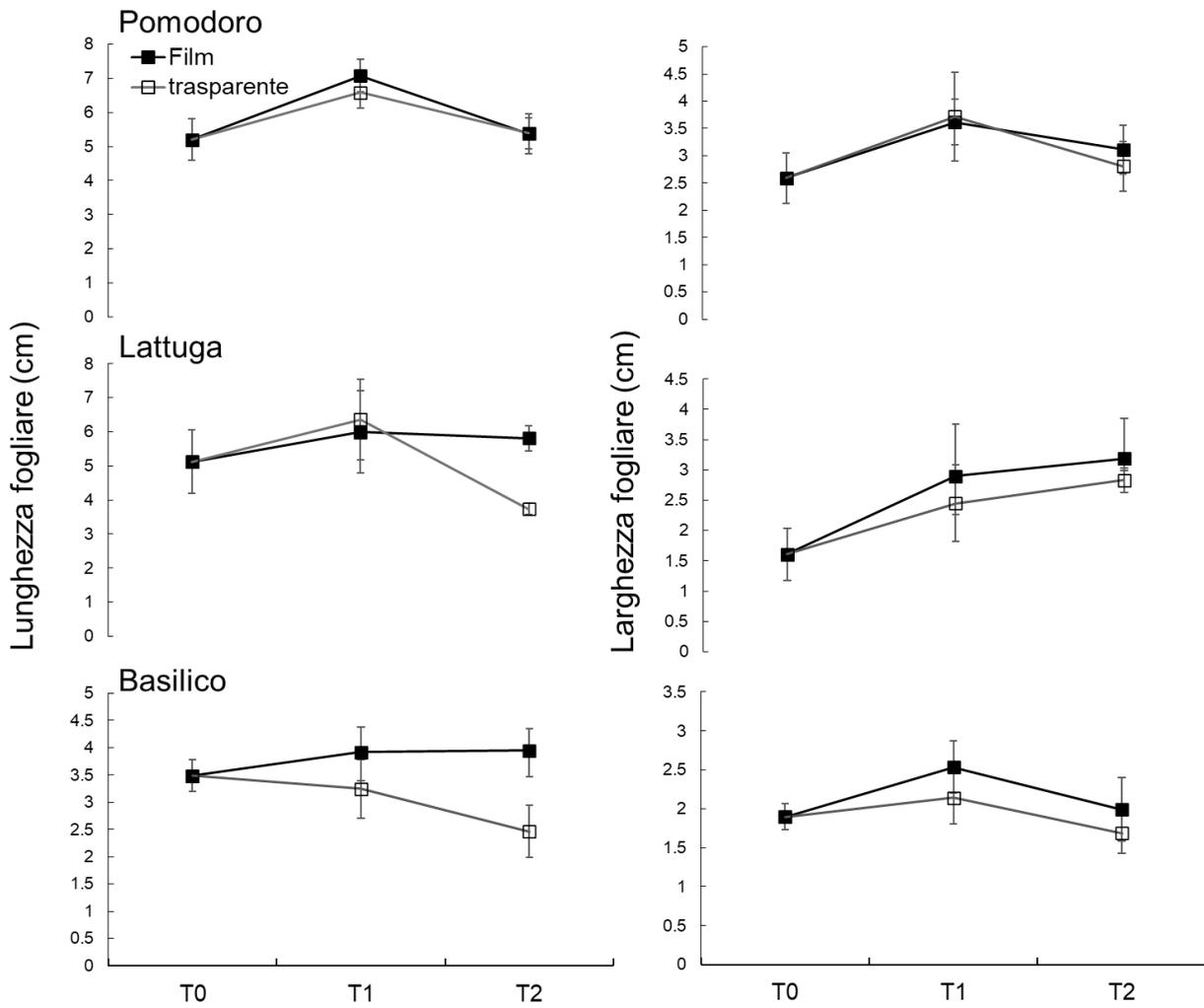
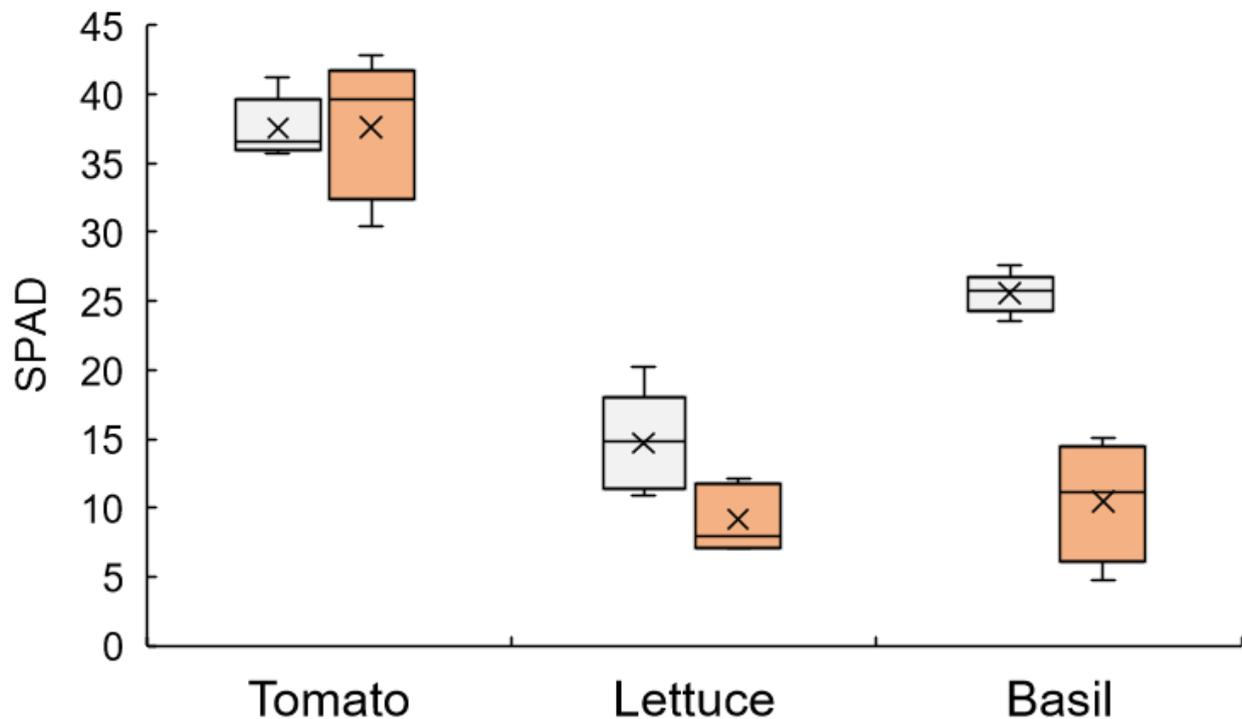


Figura 18 Andamento della lunghezza (sinistra) e larghezza delle foglie (destra) in pomodoro (in alto), lattuga (in mezzo) e basilico (in basso) sotto film semitrasparente o vetro in tre tempi di crescita.



**Figura 19** Diagramma a scatola e baffi della misura alla fine della sperimentazione di SPAD nelle vari specie utilizzate sotto vetro trasparente (Box grigio) e sotto film semitrasparente (Box arancio)

La misura della radiazione luminosa indica invece che le condizioni di PAR che si creano all'interno del box coperto con vetrino trasparente sono simili a quelle in piena luce della camera di crescita (Figura 20). Inversamente la presenza del film semitrasparente trattiene una porzione dello spettro luminoso portando la PAR a valori di circa  $818.65 \text{ PPFD } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ . Dello spettro luminoso passante attraverso i sistemi sperimentali, si osserva che la luce della camera di crescita ha dei picchi di intensità nelle regioni intorno a 450 nm e 650-700 nm quando libera in camera di crescita. Stesso vale per la luce sotto vetrino trasparente che però tende a diminuire leggermente negli stessi picchi. Inversamente sotto vetrino si osserva che lo spettro del visibile ha un'intensità generalizzata minore (come visualizzato dalla PAR), ma in particolare modo si osserva che il film semitrasparente non lascia passare le radiazioni nell'intorno del range di 450 nm (Figura 21).

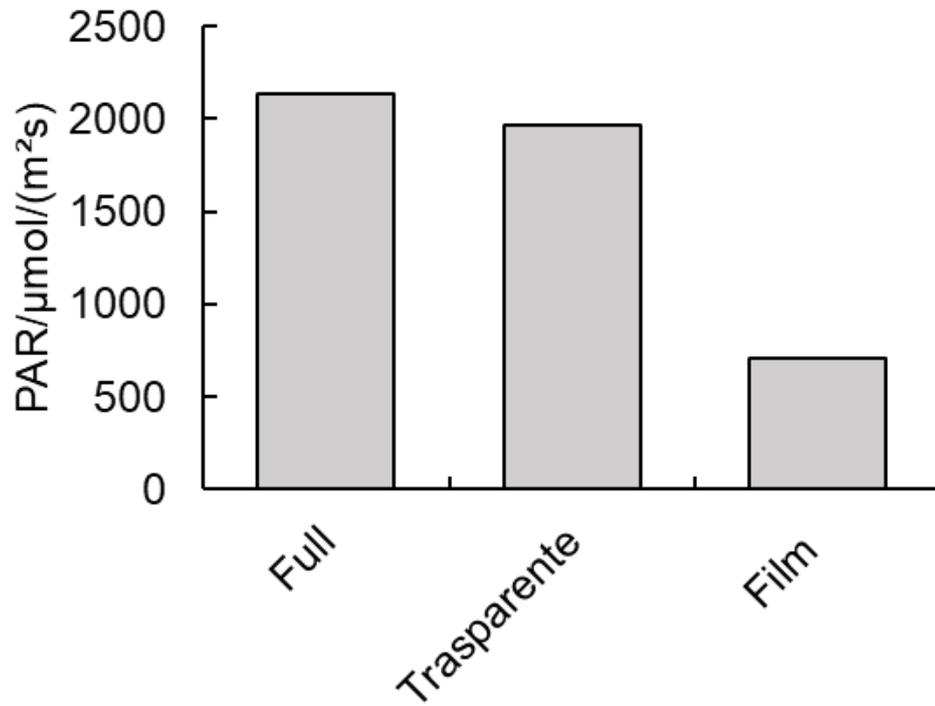


Figura 20 Grafico a barre della PAR osservata in camera di crescita senza coperture, sotto vetro trasparente e sotto film semitrasparente.

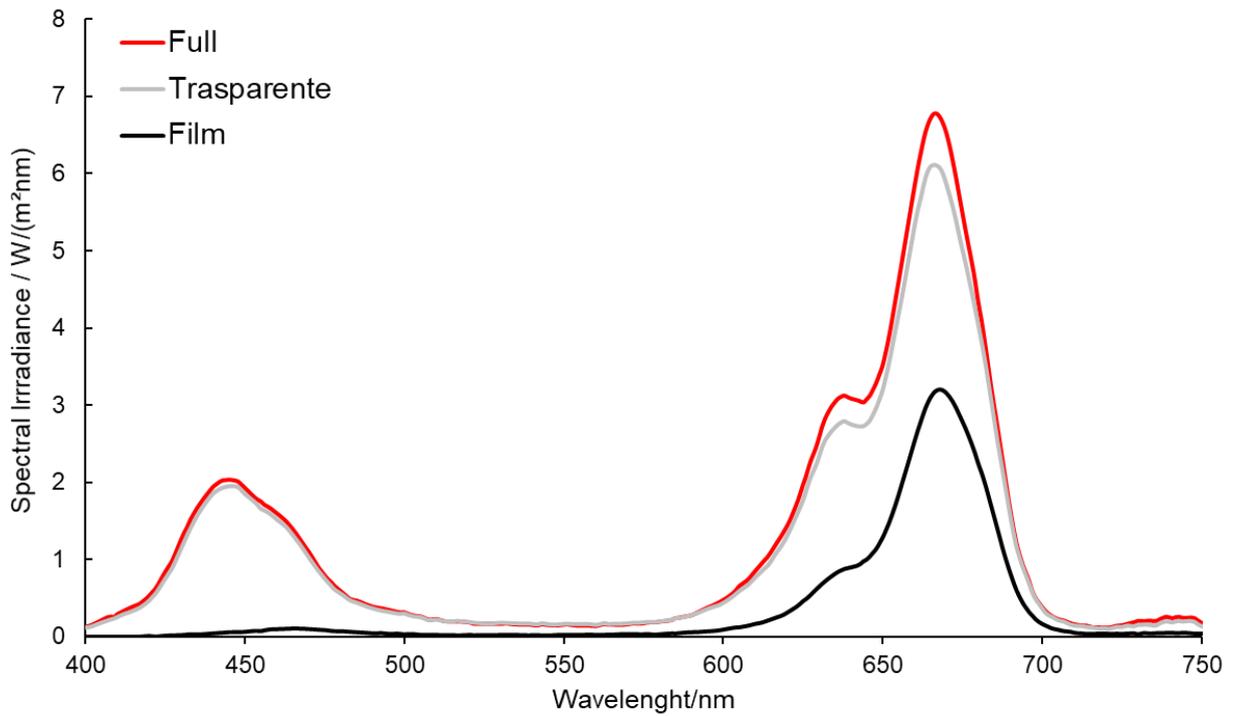


Figura 21 Spettro della luce visibile in camera di crescita senza coperture, sotto vetro trasparente e sotto film semitrasparente.

#### 2.1.4 *Sperimentazione luce naturale su piante*

In base ai risultati della sperimentazione precedente si è optato per una sperimentazione in serra con una fonte luminosa naturale ma comunque in condizioni protette. Inoltre, si è voluto permettere il passaggio di una porzione del fascio luminoso senza schermature ed il passaggio di luce diffusa per soddisfare i requisiti minimi di crescita vegetale ed incrementare l'apporto della radiazione visibile nel blu. Essendo quest'ultima una delle componenti del fascio luminoso che maggiormente regola l'elongazione degli apparati aerei nelle piante. Questo è stato possibile mettendo a punto una differente configurazione del sistema vetrino-box-pianta. In pratica, si è modificato il sistema sperimentale dando un'angolazione di 32° ad i vetri di modo da simulare l'inclinazione tipica dei tetti delle serre e per permettere quindi l'accesso di una porzione di spettro completo. Per valutare invece l'importanza dell'illuminazione laterale nel controllo della crescita vegetale sono stati prodotti dei box composti da materiale plastico trasparente, che, per permettere solo un passaggio parziale della luce attraverso le pareti, è stato ricoperto da una pellicola plastica semi-trasparente. Per eliminare invece l'effetto della radiazione luminosa laterale gli stessi box sono stati foderati internamente con del cartoncino nero sagomato sulla misura delle pareti laterali dei box. I diversi trattamenti di illuminazione, sia dall'alto con configurazione del vetrino angolati e laterali con box trasparenti sono stati testati in combinazione fattoriale (Figura 22).

Stessa prova è stata tentata su piantine di pomodoro che però già risultavano troppo alte per essere impiegate in un sistema sperimentale come quello attualmente ideato.

**Tabella 1 Disegno sperimentale e trattamenti utilizzati nella sperimentazione**

	Specie	Box	Filtro	Luce Diffusa	Inclinazione tetto	Repliche	Totale piante testate
N° di Condizioni	1	2	2	2	2	4	64
	Lattuga	No box	Vetro	Trasparente	30°		
		Box	Film	Opaco	No-Tilt (0°)		

Per ogni trattamento riportato in Tabella 1 sono state testate 4 piante di Lattuga dell'altezza di circa 5 cm. La serra in cui risiedevano le plantule è stata posta su di un sottovaso in plastica delle dimensioni 100x40x5 cm di modo da poter irrigare le plantule per subirrigazione e non portare a contatto i vetri con possibili gocce d'acqua che potessero alterare l'effetto di passaggio del fascio luminoso. La sperimentazione è stata svolta nella serra storica delle piante grasse, del Museo delle Scienze Agrarie di Portici. Nella Serra la temperatura è stata controllata da un sistema di aereazione e sollevamento del tetto. La temperatura media giornaliera si aggirava intorno ai 35°C. L'illuminazione ha seguito il naturale fotoperiodo dei mesi in cui è avvenuta la sperimentazione. Le plantule impiegate sono state reperite presso un rivenditore della zona. Al momento della prova sperimentale le piante avevano un'altezza di circa 5 cm. La sperimentazione in tutte le sue fasi, incluso l'allestimento e la messa in opera della sperimentazione ha impiegato 1 mese all'interno della struttura a cavallo tra i mesi di marzo ed aprile del 2021 (Figura 22).



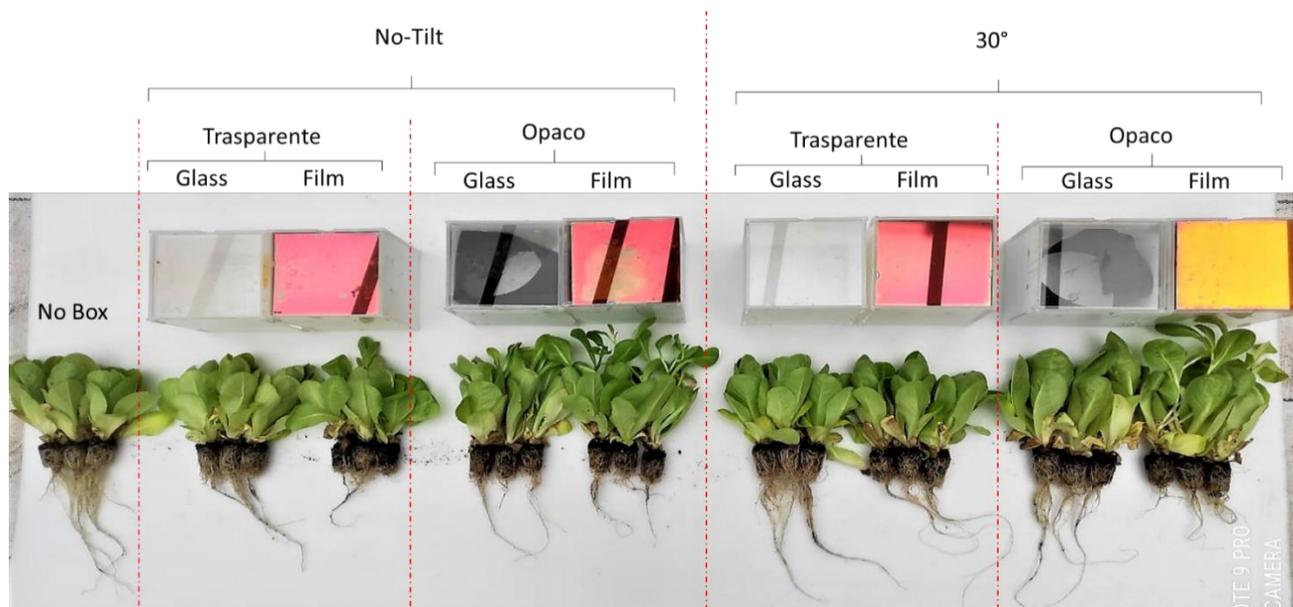
**Figura 22** Sperimentazione su lattuga in serra con differenti configurazioni angolari del film sottile e diverse condizioni di luce diffusa laterale.

Alla fine della fase di crescita durata 15 giorni i box sono stati rimossi e misure distruttive delle piantine di Lattuga sono state ottenute. I parametri misurati sono stati:

- Biomassa totale
- Biomassa fogliare
- Numero di foglie
- Lunghezza della porzione aerea

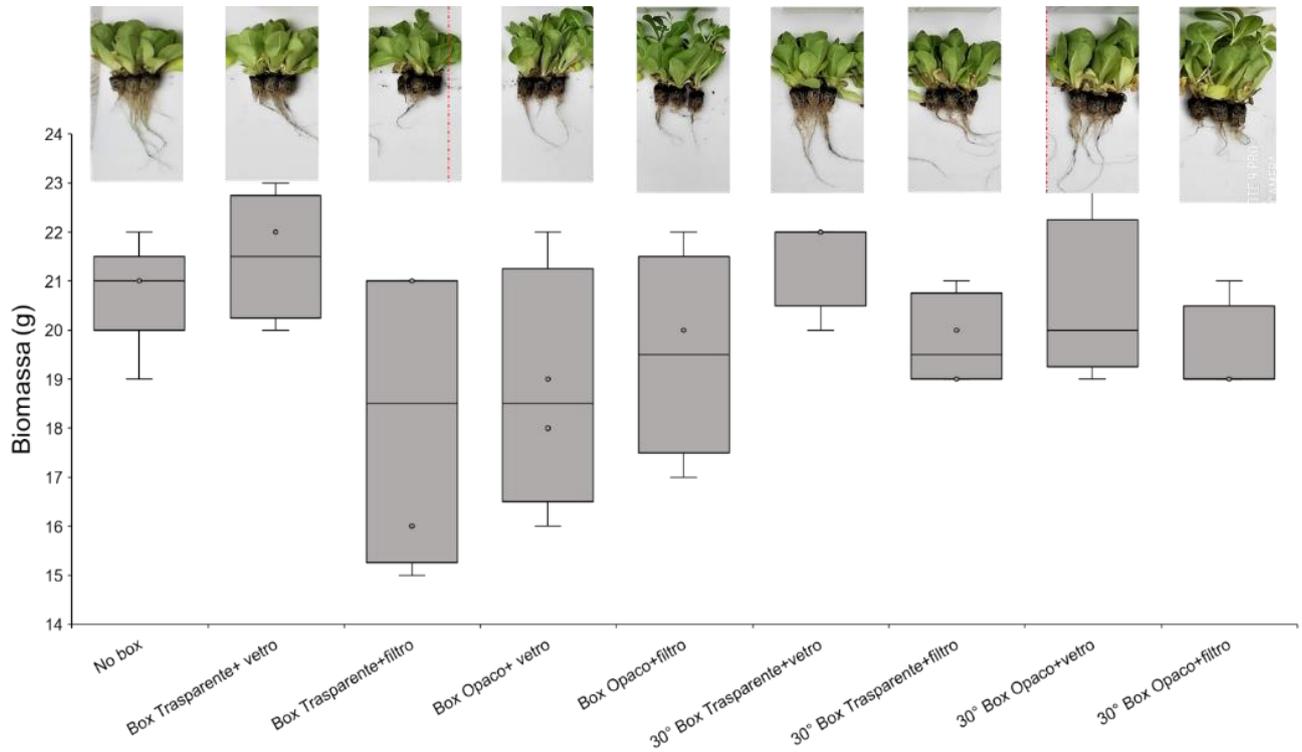
Come per la sperimentazione precedente, a seguito delle misure biometriche delle piante, sono state effettuate misure sull'intensità del fascio luminoso e dell'intensità dello spettro luminoso nella serra. La misura è stata effettuata tramite uno spettroradiometro posto al disotto dei box nelle diverse condizioni sperimentali (Figura 23)

Dalla sperimentazione si è osservato che l'effetto soppressivo della crescita dovuto alla modulazione dell'intensità delle diverse regioni dello spettro visibile può essere attenuata tramite la creazione di aree di accesso per lo spettro luminoso non modificato (Figura 24).



**Figura 23** Piante di *Lactuca sativa* impiegate nella seconda sperimentazione. Da sinistra verso destra, piante cresciute in condizioni di luminosità normale ed in assenza di box, piante in cui l'angolazione dei vetrini sia con e senza film è di 180° con box trasparenti ed opachi, e piante cresciute sotto film e vetri in cui è stata data angolazione di 30° con box trasparenti ed opachi.

Nel dettaglio si è osservato che le piante che crescono in assenza di box e vetri erano quelle che sono state capaci di formare più biomassa, insieme alle piante che crescevano sotto vetro e box trasparente. In generale, tutte le piante hanno mostrato accrescimenti simili, indipendentemente dalle condizioni sperimentali in cui sono state messe a crescere. Ciò nonostante, si è notato che l'incremento di inclinazione delle coperture tendeva a favorire, seppur lievemente, lo sviluppo vegetale più delle configurazioni no tilt ed a 180° (Figura 25).



**Figura 24** Foto e corrispondente diagramma a scatola e baffi della biomassa media per pianta di *L. sativa* cresciute sotto differenti condizioni sperimentali.

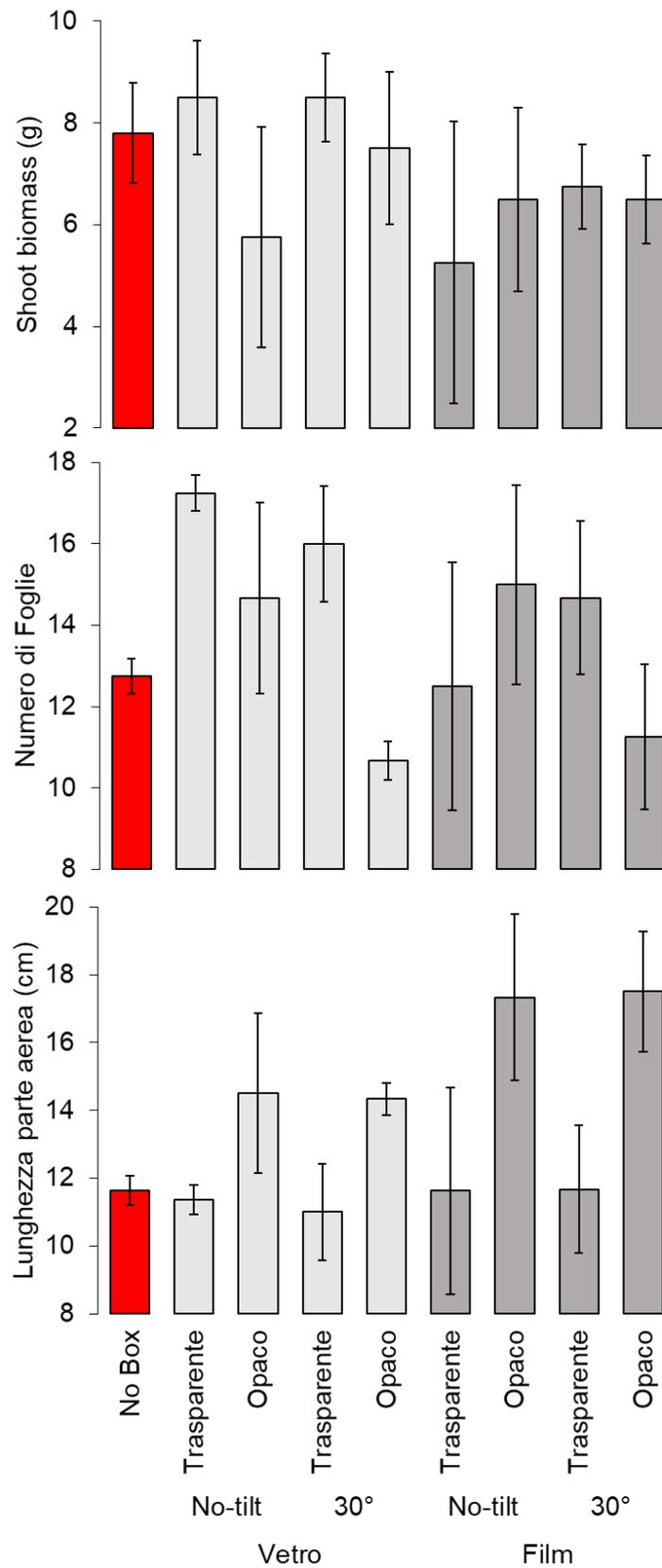
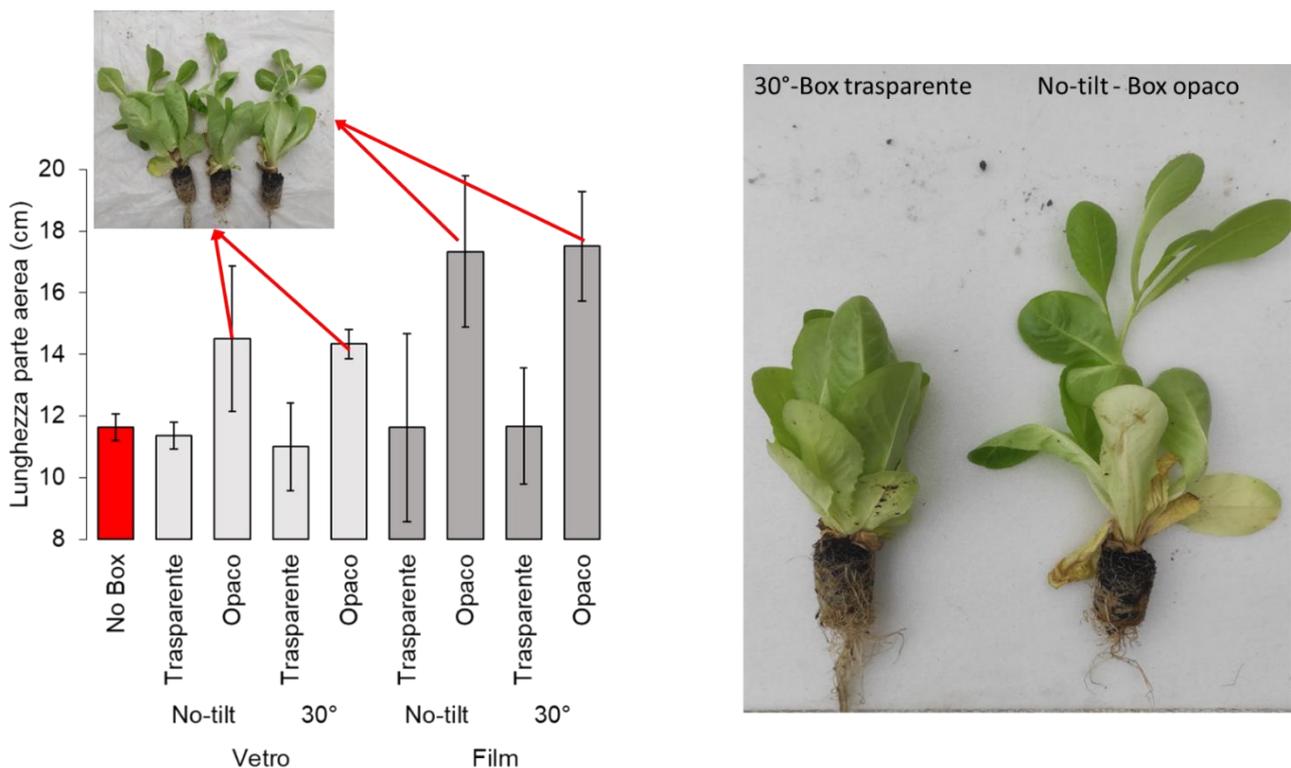


Figura 25 Biomassa della parte aerea (in alto), Numero di Foglie (in mezzo) e Lunghezza della parte aerea (in basso) delle piante di *Lactuca sativa* nelle varie condizioni sperimentali. I segmenti al di sopra delle barre indicano deviazione standard.

I parametri biometrici delle piante testate hanno indicato che le piante sotto copertura di film semitrasparente hanno avuto crescita minore rispetto a quelle sotto vetrino trasparente che invece hanno avuto uno sviluppo della biomassa aerea simile a quelle senza box. Per quanto riguarda il numero di foglie medio per pianta, in linea generale non sono state notate differenze tra condizioni di copertura sotto film o sotto vetro trasparente, mentre invece le piante che crescevano in assenza di luce laterale e sotto copertura a 30 ° sviluppavano il minor numero di foglie tra tutte le condizioni sperimentali, indifferentemente se sotto film o vetro. La lunghezza della parte aerea è un indicatore di quanto le condizioni di luce siano sufficienti per supportare la crescita di una specie vegetale. Nel caso specifico si è osservato allungamento maggiore per le piante che crescono sotto film ma solo in assenza di un apporto di luce laterale. Stesso effetto si osservava per le piante sotto copertura trasparente ma con una magnitudine di effetto minore (Figura 25 e Figura 26).



**Figura 26** Dettaglio delle piante di *L. sativa* cresciute in assenza di luce laterale (sinistra) e paragone tra piante cresciute sotto film con inclinazione di 30° e box trasparente e sotto film senza inclinazione e box opaco. Le piante che non hanno un apporto di luce sufficiente sviluppano una crescita verso l'altezza con allungamento dello stelo.

La misura della radiazione luminosa ha mostrato nessuna differenza tra la PAR misurata all'aperto e quella effettuata nella serra storica (1212.00 PPFD  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ). Quando invece la misura veniva effettuata sotto vetro in box c'è una diminuzione in PAR, di 768.94 PPFD  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  con un'angolazione di 180° e di 753.62 PPFD  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  con vetri inclinati di 30°. Ancora più bassi i livelli di PAR sotto film semitrasparenti che avevano valori intorno a 307.81 PPFD  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  e 295.75 PPFD  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$  rispettivamente per angolazioni a 180° e 30° (Figura 27).

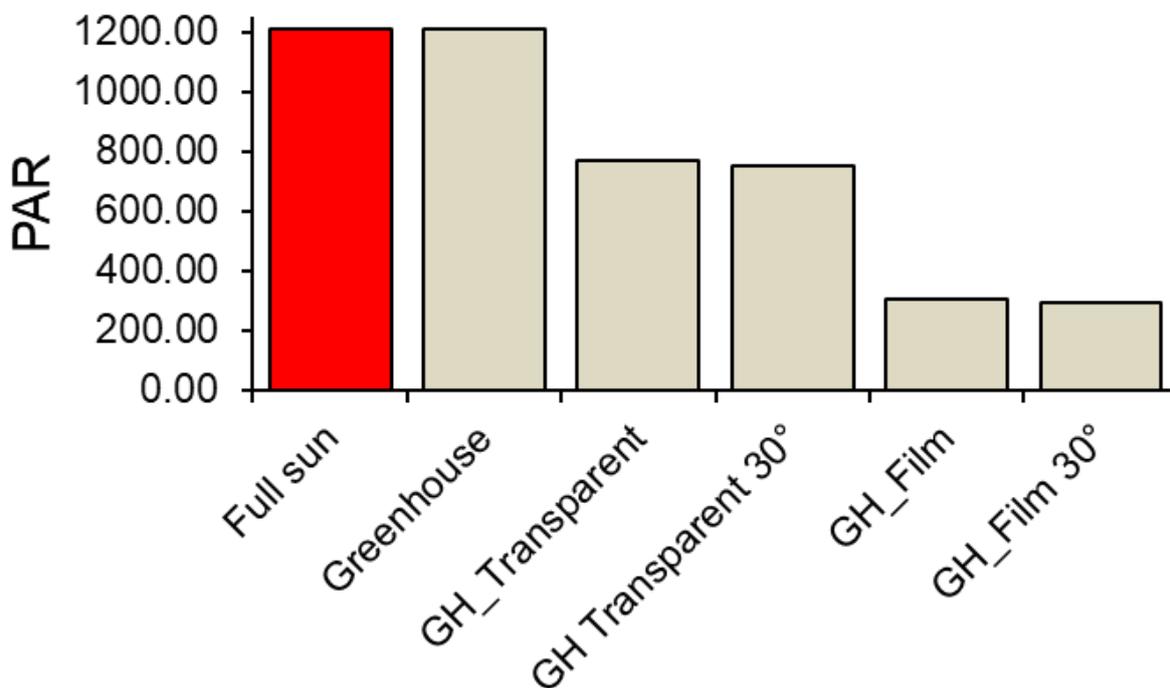


Figura 27 PAR nelle varie condizioni sperimentali, in pieno sole, nella serra storica, sotto vetro trasparente con angolazione di 180° e 32 ° e sotto film a 180° e 30 °

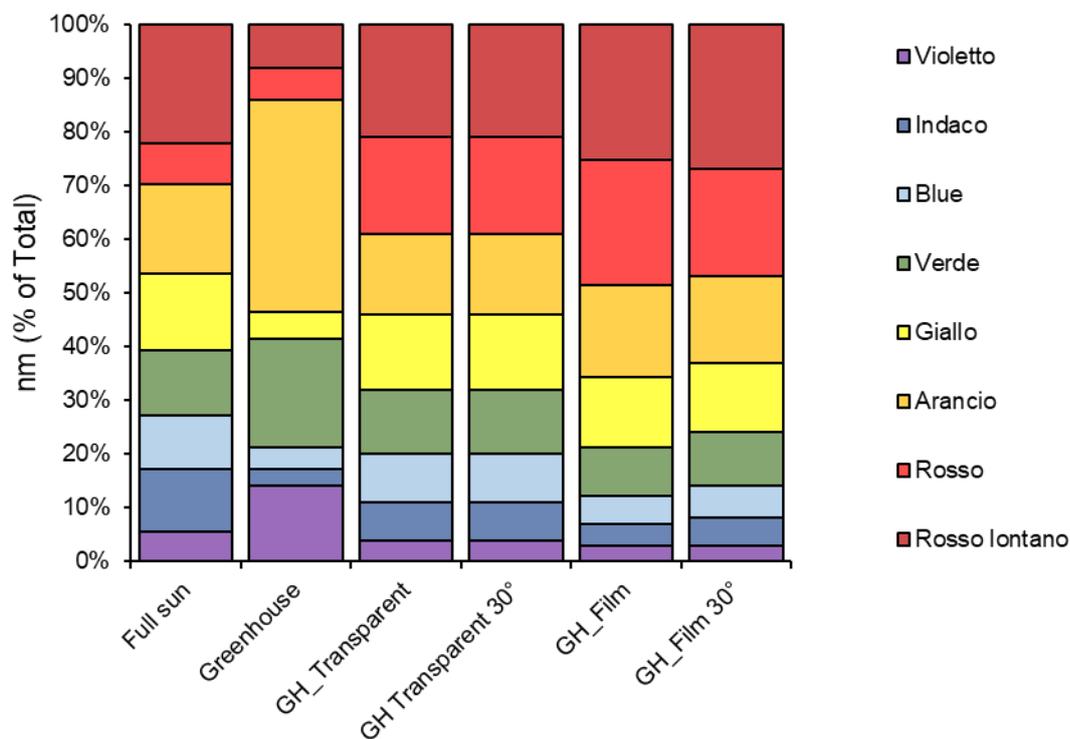


Figura 28 composizione relativa dello spettro luminoso suddiviso per regioni spettrali nelle condizioni sperimentali della serra storica

Per i rapporti di composizione degli spettri della luce visibile, il passaggio del fascio luminoso attraverso il fil semitrasparente ha portato ad una diminuzione delle porzioni di blu, indaco e violetto con un aumento relativo di rosso e rosso lontano, confermando così l'effetto selettivo sulla porzione dello spettro visibile corrispondente al blu osservato nella precedente sperimentazione (Figura 28).

### 2.1.5 Sperimentazione luce naturale su microalghe

Alla luce del crescente interesse commerciale verso le microalghe quale prodotto di elevato valore utilizzato in più contesti produttivi, è stato messo a punto un processo di indagine multi-sperimentale per capire se questo tipo di coltura fosse conciliabile con le tecnologie sviluppate nel presente progetto.

Nella presente attività è stata valutata l'esigenza fotosintetica delle microalghe, e quindi la produzione di biomassa, con coltivazione in mezzo liquido, in combinazione con la produzione di energia da film sottili semitrasparenti. Nel dettaglio, sono stati svolti alcuni esperimenti su scala piccola al fine di valutare il comportamento delle popolazioni di alghe del genere *Arthrospira* e *Chlorella* quali taxa con forte interesse commerciale. Tali specie sono state scelte anche in base alla conoscenza pregressa della loro adattabilità ad un ambiente ombreggiato quale può essere un multistrato a film sottile con capacità di filtraggio selettivo sullo spettro luminoso. La sperimentazione è stata inoltre svolta con diverse modalità di ombreggiamento al fine di valutare la migliore configurazione possibile per la crescita microalgale.

Più nello specifico, gli esperimenti in oggetto sono stati svolti all'interno di una serra localizzata nel parco della reggia di Portici sede del centro MUSA.

Un inoculo di entrambe le specie considerate è stato posto a crescere rispettivamente in 4 beute sterili da 100 ml chiuse da un tappo sterile traspirante in modo da garantire lo scambio gassoso fra l'interno e l'esterno. Tali beute sono state poste in box ombreggiati di forma cubica aperti alla base e in superficie (spigolo 10 cm). Tali box sono stati modificati in modo da riprodurre 3 condizioni di ombreggiamento diverse, una quarta beuta per specie è stata posta all'esterno priva di box.

Schema sintetico Set-up sperimentale

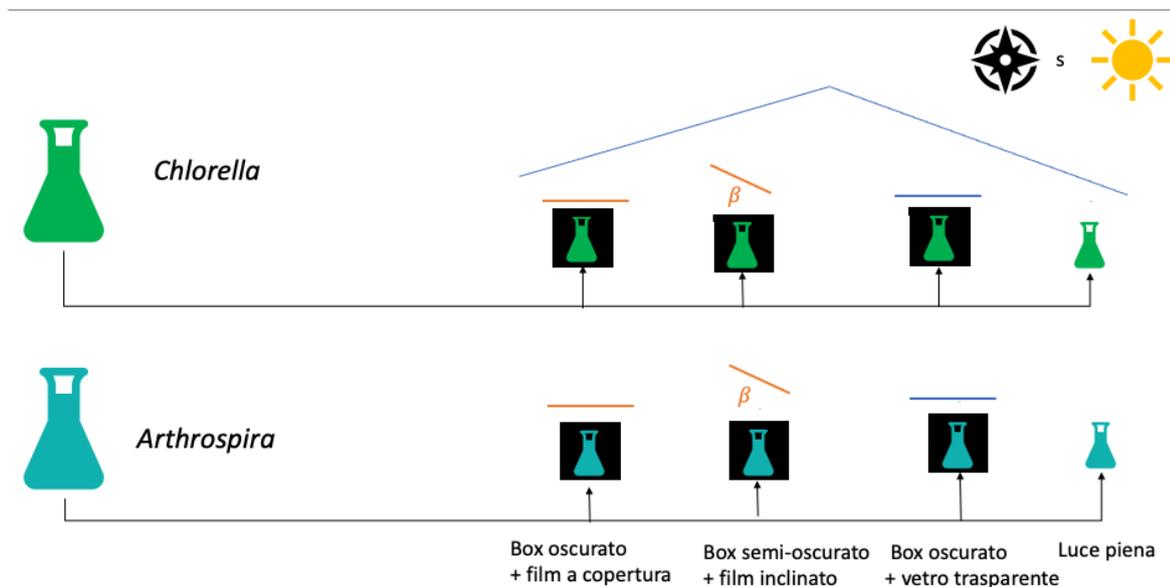


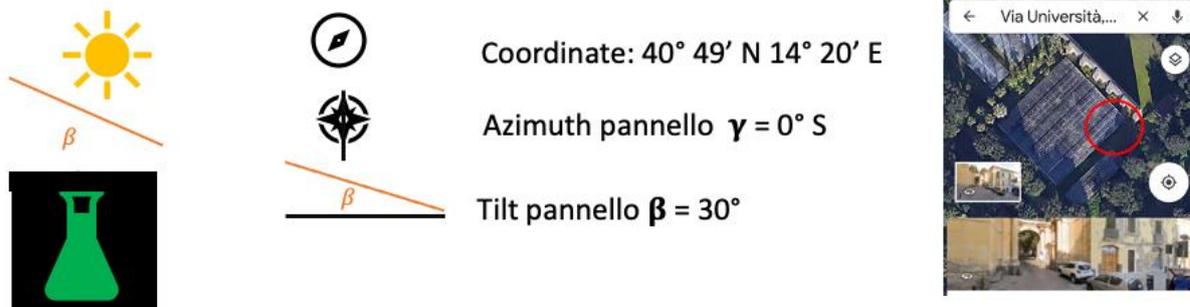
Figura 29 Schema del setup sperimentale adottato

Il setup sperimentale utilizzato, schematizzato in Figura 29 Schema del setup sperimentale adottato, ha quindi interessato 8 condizioni sperimentali formate dalla combinazione fattoriale di:

- 2 specie di microalghe con spettro di assorbimento diverso e capacità foto-adattative diverse (*Arthrospira* - indicata con l'acronimo AP e *Chlorella* - indicata con l'acronimo CP)
- 4 regimi luminosi:

- Beuta fuori dal box, spettro solare tal quale piena luce
- Beuta in un box coperto con film PV orizzontale, copertura orizzontale totale del box, illuminazione sulla coltura con solo spettro derivante dal film
- Beuta in un box coperto con film PV inclinato, illuminazione coltura con spettro filtrato + spettro solare diffuso - simulazione inclinazione pannelli e serra PV
- Beuta in un box coperto con vetrino trasparente – spettro su coltura derivante dal solo box con vetro e spettro diretto

**Set-up sperimentale**  
scelta orientamento e inclinazione ottimali - film fotovoltaico nel sito sperimentale



**Figura 30 Schema sintetico dell'inclinazione e orientamento utilizzati risultanti di una simulazione di un pannello fotovoltaico alle coordinate della serra.**

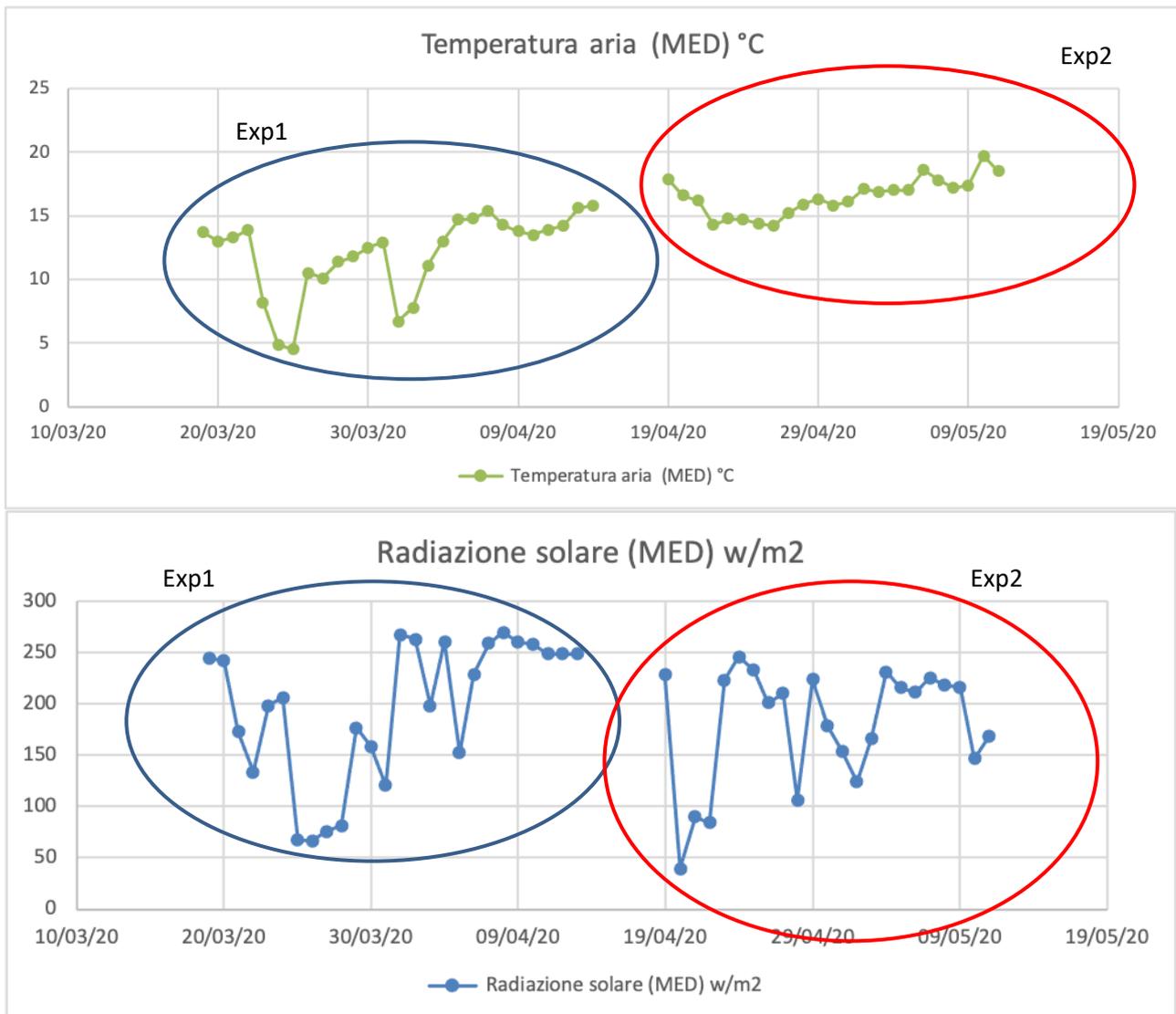
I Box con le colture sono stati posti nella zona della serra più sottoposta alla radiazione diretta. Il pannello con il film inclinato ha deciso l'orientamento di tutti i box. L'orientamento a sud, Azimut, e l'inclinazione del pannello film sottile, Tilt, sono stati calcolati e progettati in base alle coordinate del sito di sperimentazione, Portici, condizione di Tilt e Azimut per massimizzare la produzione fotovoltaica, per poter riprodurre quindi il regime luminoso con film inclinato la condizione più simile a quella che le microalghe subirebbero nello spazio sottostante ad un pannello fotovoltaico posizionato in un impianto reale di produzione fotovoltaica (Figura 30). Si sono quindi ricavate 8 curve di crescita: 4 per ogni specie di microalga, AP e CP, rispettivamente con spettro di piena luce, spettro ombreggiato filtrato dal film in superficie orizzontale, spettro con vetro trasparente orizzontale, spettro con film con azimut 0°S e tilt 30° (condizione impianto reale PV).

Le curve di crescita sono state valutate misurando l'assorbanza ottica a due lunghezze d'onda tramite uno spettrofotometro UV-VIS. Le equazioni di correlazione utilizzate fra gli OD e la concentrazione algale sono state ricavate in letteratura per le due alghe selezionate [1].

Gli esperimenti compiuti seguendo questo setup sperimentale sono stati due; il primo è partito il 19 marzo 2020 ed è terminato il 14 aprile 2020 denominato exp1, mentre il secondo è iniziato il 19 aprile 2020 ed è terminato l'11 maggio 2020 ed è stato denominato exp2.

I risultati in termini di produttività (come variazione della concentrazione di biomassa algale nel tempo) in funzione del regime di irradianza sono stati confrontati con una curva di crescita ottenuta in un fotobioreattore da 150 lt posto al di sotto dei moduli BIPV oggetto del report nella sperimentazione a scala media (sez. 2.2.4) in serra e valutati in modo tale da considerare la produttività teorica nel caso di accoppiamento fra crescita microalgale e pannelli fotovoltaici innovativi.

Analizzando i dati meteorologici è stato possibile rilevare che il primo esperimento è stato caratterizzato da una maggiore instabilità meteorologica, con due episodi di perturbazioni con rapido raffreddamento della temperatura dell'aria e diminuzione della radiazione solare a cui sono seguiti giorni di temperature ancora basse ma associati a forti radiazioni (Figura 31).



**Figura 31 condizioni meteorologiche nel periodo dei due esperimenti condotti**

Entrambi questi episodi, tipici degli esordi della primavera alla nostra latitudine hanno influenzato la crescita microalgale nel momento iniziale che è anche il più delicato della coltivazione, fase di start/lag phase. Tale influenza è stata maggiormente registrata soprattutto della specie più adatta alla crescita alle alte temperature: *Arthrospira*, che ha evidenziato un maggiore stress con anche una decrescita iniziale in tutte le condizioni luminose (Figura 32). L'exp2 sebbene sia avvenuto in un periodo di copertura nuvolosa altalenante non ha sottoposto le coltivazioni ad alcuna situazione di stress termico/luminoso poiché è invece avvenuto in un periodo di temperatura pressoché costante.

Nel corso del primo esperimento la specie *Arthrospira* è cresciuta al meglio (raggiungendo anche concentrazioni superiori al grammo/litro) nelle condizioni sperimentali di simulazione di un box fotovoltaico inclinato. Infatti, le condizioni luminose del box chiuso con il vetrino erano troppo foto-limitanti consentendo una minima crescita algale, evidenza ancora maggiore nella difficoltà di crescita in condizioni luminose così basse si è riscontrata ancora di più nel box oscurato e chiuso da un film ombreggiante.

Contro intuitivamente invece la beuta posta direttamente alla luce esterna non è cresciuta in quanto quella luce esterna in concomitanza con le improvvise basse temperature ha danneggiato l'apparato fotosintetico e inibito la crescita: foto-danno. Per tali ragioni: foto-limitazione alle basse irradianze e foto-danno alle alte radiazioni, la crescita maggiore è stata riscontrata alle radiazioni intermedie più simili alla futura applicazione reale.

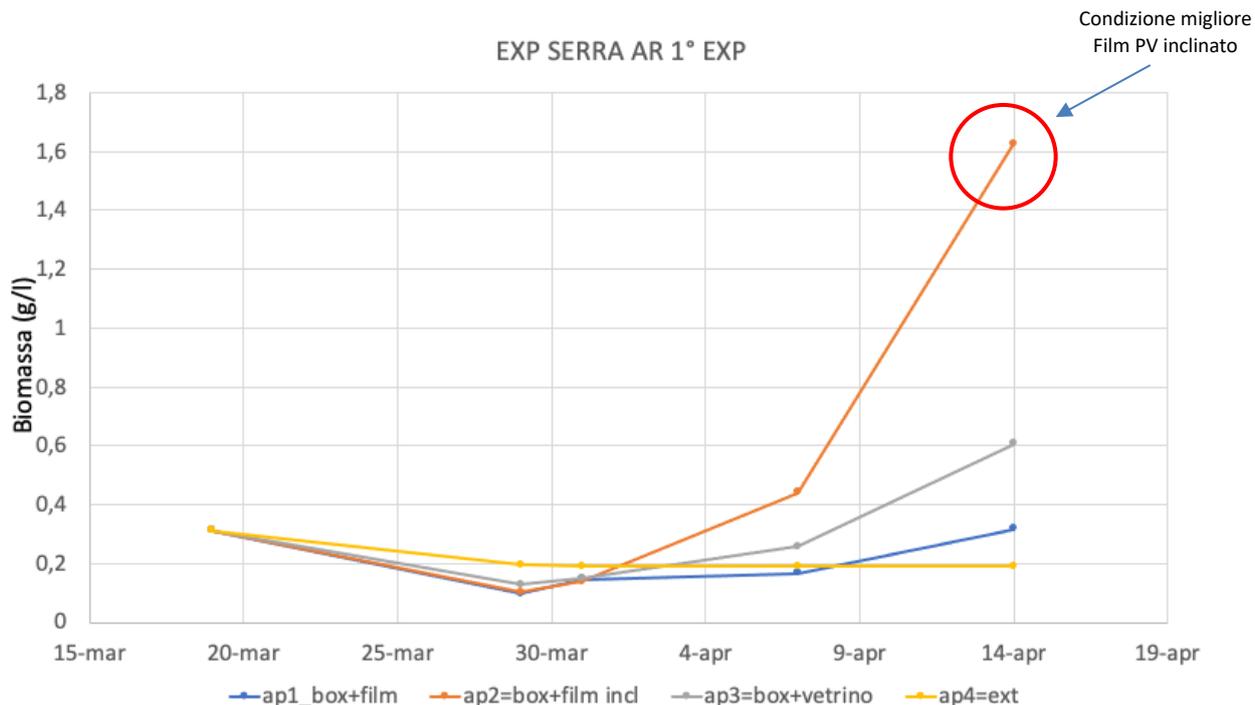


Figura 32 curve di crescita delle 4 beute della specie *Arthrospira* nel corso del primo esperimento

La specie *Chlorella* ha invece evidenziato di preferire in maniera maggiore la crescita nel box oscurato sotto al vetrino trasparente, seguita dalla crescita in piena luce e poi dalla crescita nel box inclinato che però stava dimostrando la tendenza ad aumentare nel momento in cui si è terminato l'esperimento. Anche in questo caso il box ombreggiato e chiuso dal film non ha terminato la crescita per troppa foto-limitazione. In questo caso la specie *Chlorella* ha dimostrato una maggior tolleranza degli stress ambientali e una minore sensibilità alle alte irradianze della beuta esterna al box (Figura 33).

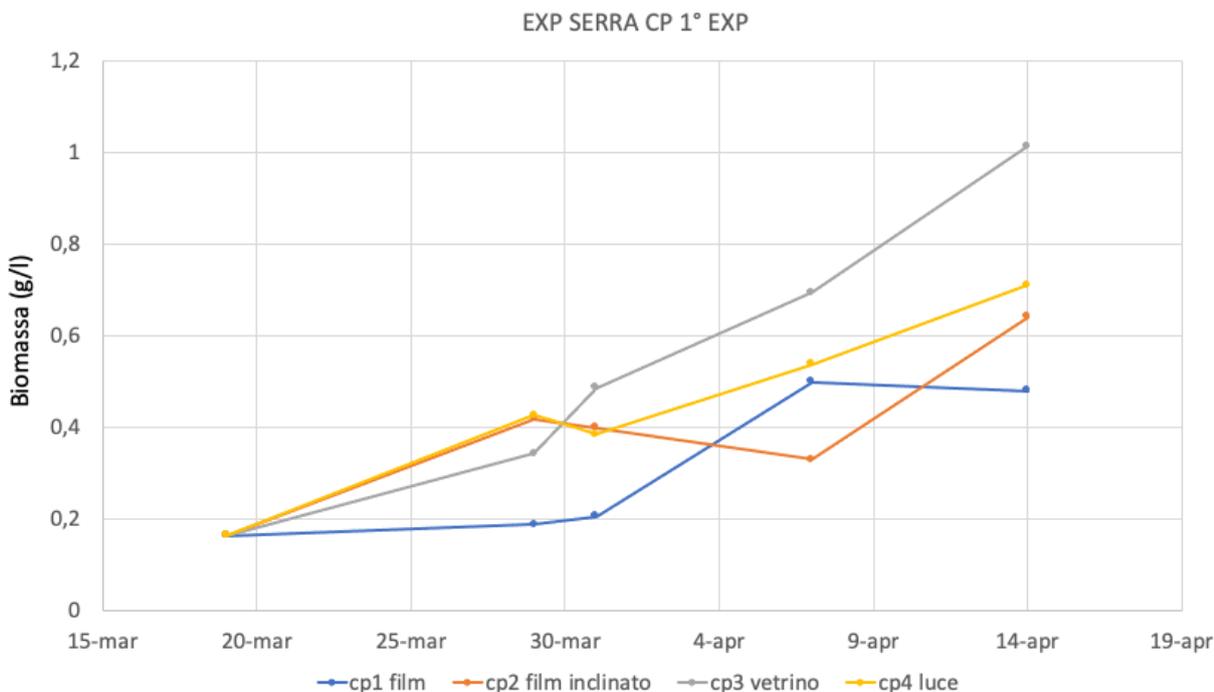
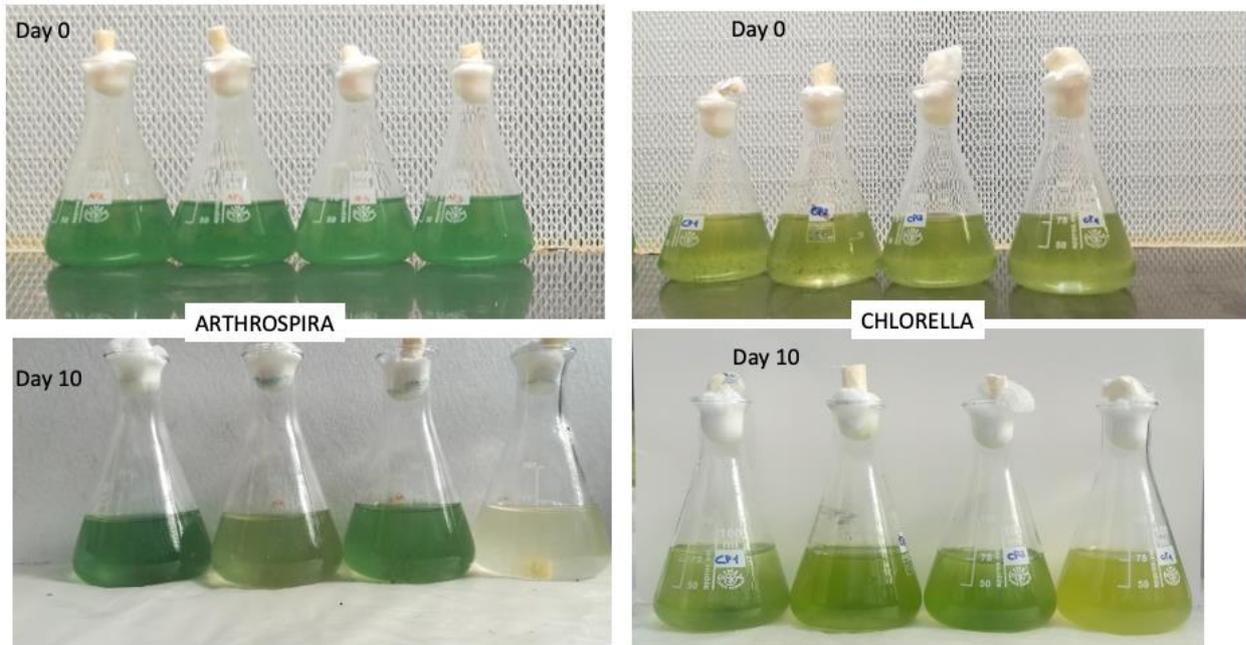


Figura 33 Curve di crescita della specie *Chlorella* nel corso del primo esperimento di crescita



**Figura 34 Confronto visivo fra le beute coinvolte nel primo esperimento sulle due specie da sinistra a destra Box nero + film ; box semitrasparente con film inclinato; box nero con vetrino trasparente ; luce piena**

Nel corso del primo esperimento, da un'analisi visiva del colore delle microalghe, e da un'analisi degli spettri pigmentari, è stato possibile evidenziare il fenomeno del bleaching (sbiancamento) avvenuto in seguito allo stress termico/luminoso sulla beuta esterna in piena luce e quella con il vetrino trasparente per la specie *Arthrospira* (parte sinistra della Figura 34). Nella specie *Chlorella* invece (parte destra della Figura 34) lo stress luminoso subito dalle alghe presenti nella beuta esterna non ha influenzato la crescita ma ne ha modificato il corredo pigmentario facendo aumentare il contenuto di pigmenti carotenoidi di color arancione, facendo virare la beuta verso il giallo. Nonostante, quindi, l'apparente curva di crescita elevata in piena luce, la specie coltivata in queste condizioni risultata quindi altamente soggetta a stress e in termini di qualità di biomassa finale non ottimale. Le condizioni quindi di crescita migliore, con qualità di biomassa finale migliore, è quella con film PV inclinato che ha avuto buone produzioni e buona qualità, e quella con film trasparente. Le condizioni di crescita, quindi, sono state molto buone in entrambi i casi di *Chlorella* e di *Arthrospira*, con film PV inclinato.

Il secondo esperimento è stato caratterizzato da una crescita maggiore da parte della specie *Arthrospira*, capace di crescere bene anche a temperature elevate, mentre inferiori per la specie *Chlorella* che ha temperatura di crescita ottimali minori. Nel corso del secondo esperimento, infatti, nelle colture si sono raggiunte temperature nettamente superiori al primo esperimento, temperature molto interessanti anche dal punto di vista realistico in coltivazione in serra.

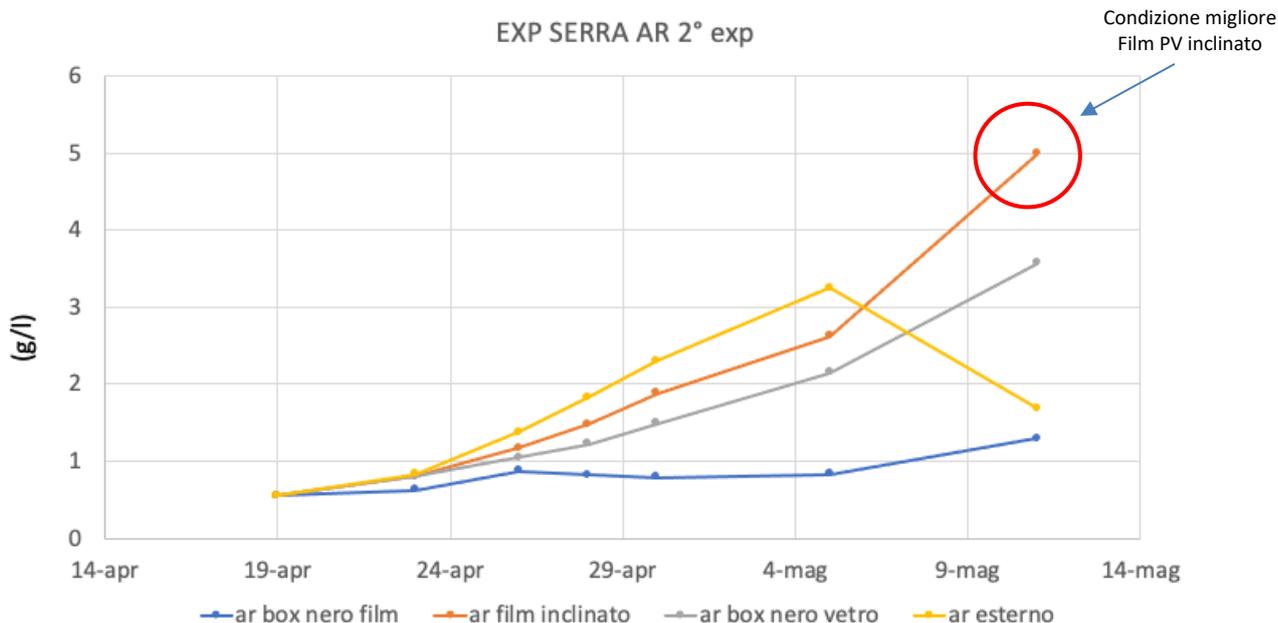


Figura 35 curve di crescita della specie *Arthrospira* nel corso del secondo esperimento

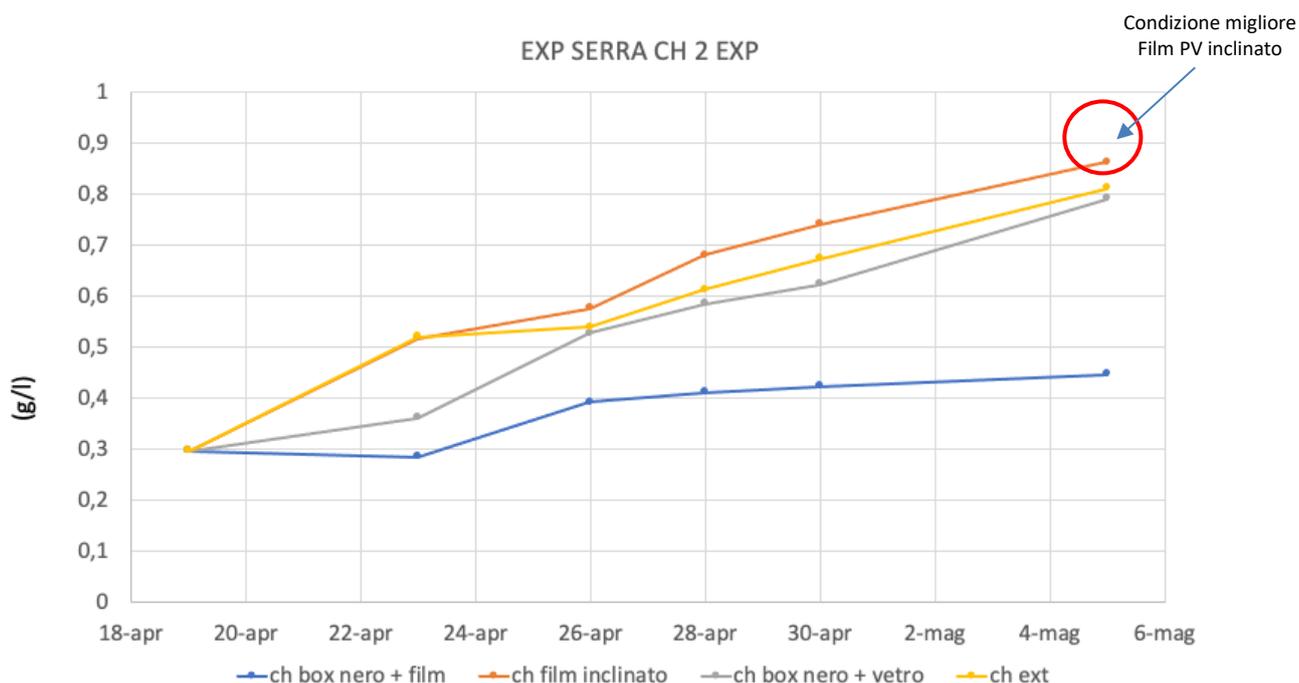


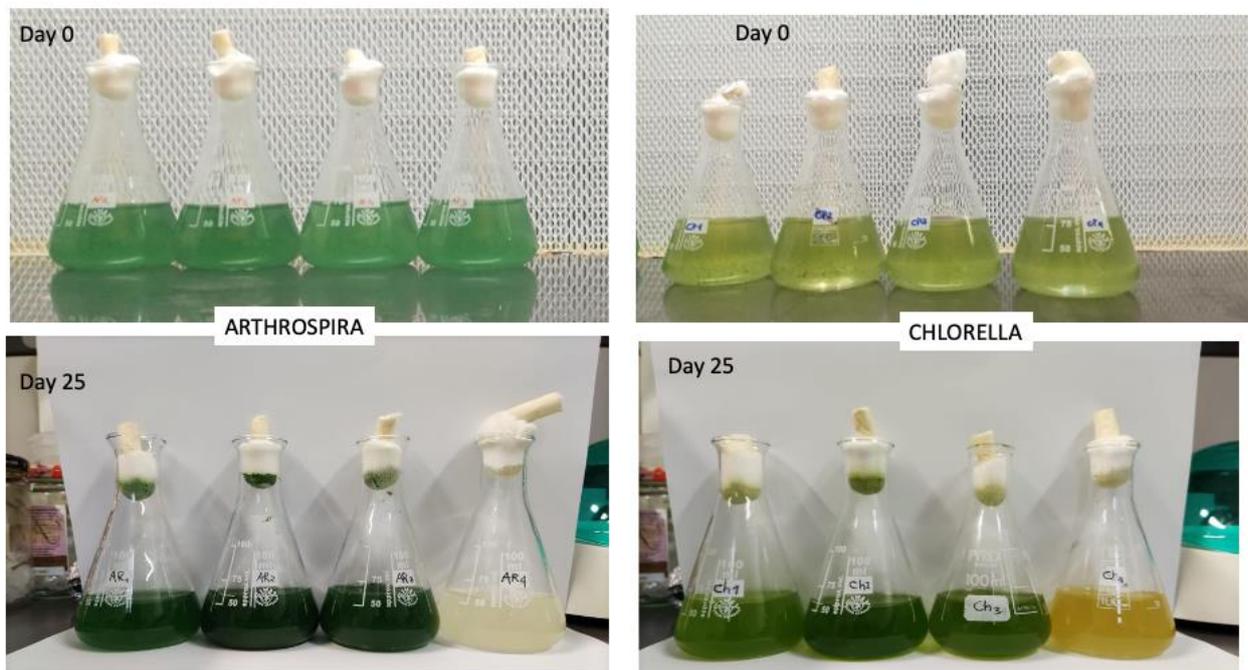
Figura 36 curve di crescita per la specie *Chlorella* nel corso del secondo esperimento

In queste condizioni, comunque, entrambe le specie hanno dimostrato una buona crescita. Le performances della specie *Arthrospira* in queste condizioni più stabili sono state nettamente migliori ma hanno ripetuto il pattern evidenziato nel corso dell'exp1: foto-limitazione nel box totalmente oscurato e nel box coperto da vetrino, foto-danno per la beuta esterna (Figura 35), si è confermata nuovamente la coltura con maggiore produzione algale la beuta sottoposta al film PV inclinato.

Nel corso dell'esperimento 2 sulla specie *Chlorella* è stato evidenziato un pattern differente dall'esperimento eseguito all'esordio primaverile e primi caldi e forti irradiazioni: la beuta che ha evidenziato una produttività maggiore è stata la beuta sottoposta alle irradiazioni di simulazione del film fotovoltaico

inclinato, seguita dalla beuta in piena luce, e successivamente da quella inserita nel box e coperta dal vetrino trasparente e da quella totalmente oscurata dal film.

La specie *Chlorella* in queste condizioni sperimentali: temperature più elevate e irradianza media maggiore ha dimostrato di essere foto-limitata nelle condizioni più ombreggiate e foto-inibita nelle condizioni non ombreggiate (Figura 36). La foto-inibizione a differenza del foto-danno (evidenziato nel genere *Arthrospira* sempre nella beuta esterna) è un fenomeno reversibile. Infatti, sulla beuta di *Chlorella* esposta alla luce esterna non si è evidenziato il fenomeno del bleaching (sbiancamento che provoca la morte della coltivazione) ma solo un fenomeno di riduzione della fotosintesi e della crescita in modo tale da non danneggiare irrimediabilmente l'apparato fotosintetico e le cellule. Osservando infatti il confronto visivo fra le beute delle due specie nelle 4 condizioni sperimentali è evidente che la beuta esterna di *Arthrospira* risulta bianca, mentre quella esterna di *Chlorella* risulta gialla per l'elevata produzione di carotenoidi foto-protettivi in risposta allo stress luminoso (Figura 37)



**Figura 37 confronto fra le beute all'inizio e alla fine del secondo esperimento**

## 2.2 Sperimentazione su scala media

### 2.2.1 Realizzazione serra scala media.

Per poter effettuare una valutazione consistente dell'applicabilità dei sistemi agro-voltaici in una scala media che rappresenta un formato più vicino alla scala delle necessità produttive si è predisposta la realizzazione di una struttura prototipale, di dimensioni ridotte, integrata con un sistema di sensoristica per il monitoraggio delle condizioni ambientali consultabile in tempo reale. Tale struttura ha lo scopo di fornire le informazioni necessarie per un scaling-up del sistema agro-voltaico su larga scala. L'idea, quindi, consisteva nella realizzazione di una piccola struttura con finalità sperimentali, nel quale potevano essere comparate le crescite degli organismi fotosintetici in condizioni di coltura protetta classica ed al di sotto di strutture BIPV con la funzione di accumulo di energia da radiazione solare. Una prima ispezione dell'aria ricadente all'interno dell'orto botanico di Portici ha permesso di individuare un'area dove posizionare la struttura, tenendo conto dell'esposizione alla luce solare ed alla vicinanza di alberature ad alto fusto che potessero interferire con l'efficienza della struttura sperimentale sia in termini energetici che produttivi. Nel contesto generale, è stato scelto di installare la struttura della serra all'interno del palmento ubicato nell'orto botanico di Portici, in quanto zona più soleggiata dell'intero orto. Nel dettaglio, il sito è stato prefissato nel lato ovest

del palmeto nel quale al momento del sopralluogo persistevano palme caratterizzate da altezze contenute (Figura 38).



**Figura 38 Ubicazione dell'area designata per la realizzazione della serra su piccola scala all'interno del palmeto dell'orto botanico di Portici**

In accordo con il partner ENEA si è deciso di procedere allo sviluppo della struttura nel sito scelto e i dettagli tecnici riguardanti la progettazione della serra sono riportati nel report dell'attività LA2.17.

Le fasi della costruzione hanno visto prima la risistemazione del fondo su cui installare la serra. La struttura portante è stata preparata e montata nel sito selezionato a cui è seguito il montaggio dei moduli fotovoltaici selezionati (Figura 39) e la successiva copertura dell'intera struttura con pannelli di policarbonato trasparenti. La serra comprende due distinte sezioni, una con copertura di moduli fotovoltaici a concentrazione ad elevata trasmissione di luce diffusa, ed una seconda sezione con copertura di pannelli in policarbonato trasparenti (Figura 40, Figura 41).

Una volta completata la struttura, la serra è stata equipaggiata con sensoristica IoT come descritto nella sezione seguente.



**Figura 39** Posa in opera della struttura portante della serra media e dettaglio dei moduli BIPV.



**Figura 40** Realizzazione della serra media con copertura di pannelli di policarbonato trasparente.



Figura 41 Veduta dall'alto della serra prototipale ubicata nel palmeto dell'Orto Botanico di Portici.

### 2.2.2 Sensoristica IoT.

Al fine di monitorare in tempo reale le condizioni ambientali all'interno e all'esterno (come riferimento) della serra realizzata nell'ambito della presente attività, è stata installata una rete di sensori. I sensori installati nel Parco (all'aperto e nella serra prototipale di media scala) sono equipaggiati con i trasduttori specifici richiesti, ovvero:

- Temperatura [°C]
- Umidità relativa [%]
- Concentrazione di CO<sub>2</sub> [ppm]
- PAR, photosynthetically active radiation [PPFD,  $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ]
- Spettrometro a 8 bande [Intensità per banda (nm)]
- Sensore di umidità del terreno [% VWC]

L'obiettivo è quello di monitorare le due distinte sezioni della serra con due gruppi di sensori identici, in modo da confrontarne i dati misurati e caratterizzare gli effetti che la presenza dei pannelli fotovoltaici ha sul microclima della serra. Per maggiore dettaglio sulle specifiche dei sensori e il loro funzionamento, si allega la relazione tecnica relativa al servizio di installazione, manutenzione e raccolta dati svolto dalla società TopView Srl (Allegato 2).

### 2.2.3 Sperimentazione su piante

#### Sperimentazione su Fragola

Alla luce dei risultati ottenuti dalla sperimentazione sulle piante agrarie in idroponica, si è optato per effettuare ulteriori prove su piante che bene si adattano alla produzione in ambiente protetto e che non avessero grande fabbisogno di luce. Si è optato quindi per una sperimentazione di confronto tra plantule di specie di sottobosco come *Fragaria x ananassa* sotto moduli fotovoltaici ed in condizioni di serra classiche (Figura 42). La crescita delle plantule è stata valutata anche in contesto di destagionalizzazione delle produzioni agrarie essendo la sperimentazione svolta in periodo invernale. Le plantule di fragole sono state ottenute da propagazione di piante di fragole acquistate a maggio 2021 e messe a cresce all'aperto nell'Orto botanico della reggia di Portici. Nel dettaglio, le plantule attaccate a stoloni di propagazione di fragola sono state separate dalla pianta madre a inizio settembre 2021, ripuliti di eventuali residui di suolo e pesate. Le plantule separate dagli stoloni ed in un intervallo di peso tra 2 e 3 g di peso sono state selezionate per la sperimentazione. Plantule con intervallo di peso superiore o inferiore ai 2-3 g, con eccessivo/limitato sviluppo

degli apparati radicali o aerei o con segni di infestazioni da patogeni sono state escluse dalla prova per evitare alterazioni dei risultati sperimentali. Le plantule selezionate, dopo essere state abbondantemente lavate in acqua distillata sterile, sono state successivamente lasciate per un giorno in perlite umida, previamente sterilizzata in autoclave a 121°C per 15 min. Successivamente, le plantule sono state trapiantate in vasi con diametro di 12 cm riempiti di suolo organico previamente sterilizzato in autoclave a 121°C per 15 min. le plantule così preparate sono state lasciate attecchire e crescere da metà settembre 2021 fino a febbraio 2022.

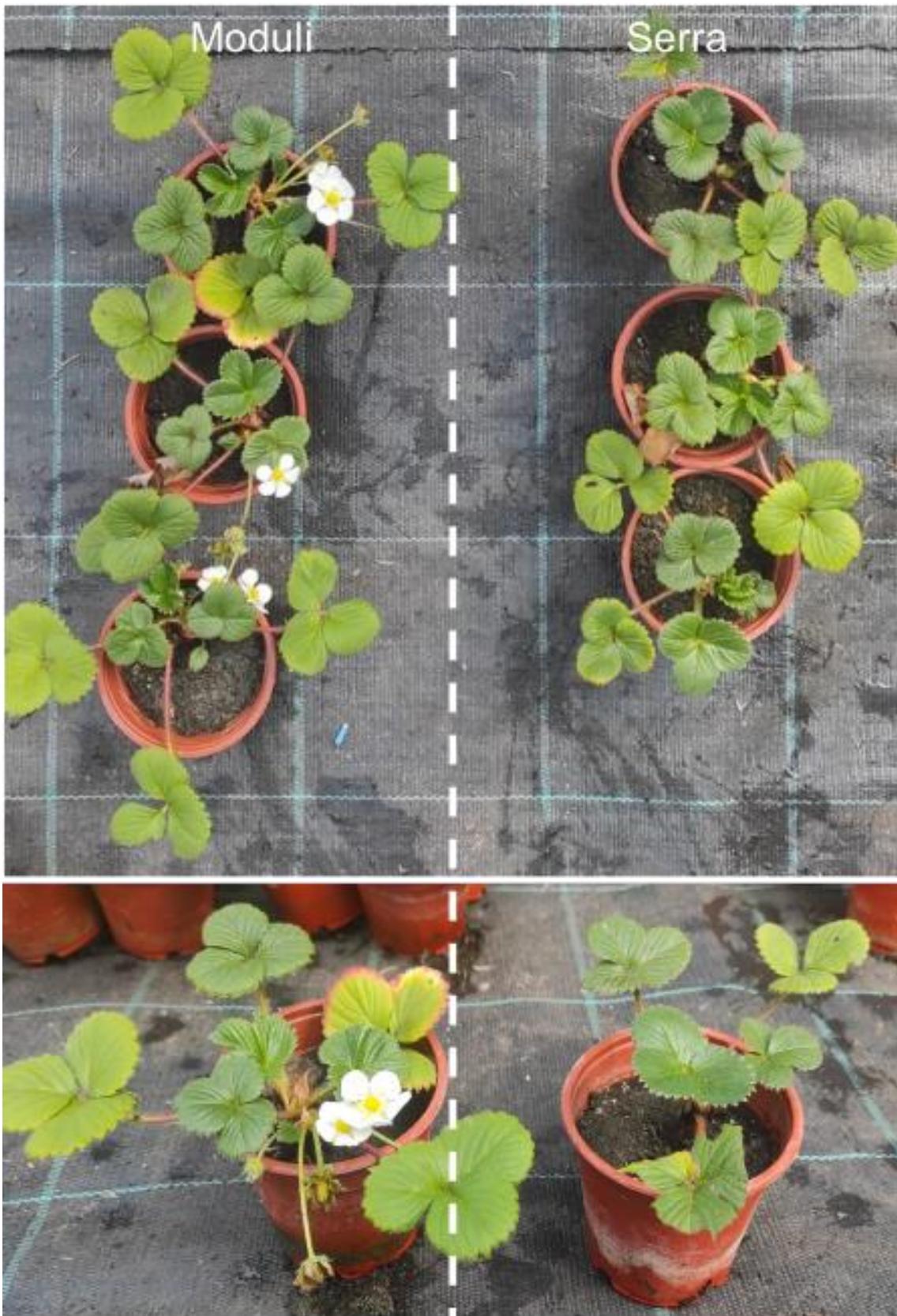


Figura 42 Piante di *Fragaria x ananassa* cresciute sotto moduli fotovoltaici. (a sinistra) e sotto serra (a destra). In basso dettaglio della struttura vegetale nelle differenti condizioni di luce. si denota incremento del numero di foglie e del numero delle strutture riproduttive sotto moduli fotovoltaici.

Durante la sperimentazione le plantule morte o attaccate da patogeni sono state tempestivamente rimosse. Delle risultanti piante misure distruttive sono state ottenute per le seguenti variabili:

- Biomassa totale
- Numero di Foglie
- Biomassa radicale
- Biomassa aerea
- Numero di strutture riproduttive (fiori/abbozzi fiorali/frutti)
- Rapporto tra biomassa radicale ed aerea.

I dati raccolti sono stati visualizzati nelle loro distribuzioni tramite diagrammi a scatola e baffi e la significatività nei cambiamenti delle medie testate tramite analisi della varianza (ANOVA) con livelli di significatività di p-value al di sotto di 0.05.

Dai risultati della sperimentazione si osserva che le piante di fragola cresciute sotto moduli fotovoltaici hanno trovato condizioni di crescita migliori rispetto a condizioni di pieno sole, ovvero in serra con copertura totalmente trasparente. Fortemente significativo è il cambiamento in biomassa totale nel quale si evidenziano valori mediani poco superiori a 9 g per plantula sotto moduli fotovoltaici a differenza di una mediana sui 6,8 g sotto serra. L'evidente capacità incrementata di fissare composti del carbonio da parte delle plantule sotto moduli si evidenzia anche per gli apparati aerei e radicali sempre significativamente maggiori sotto modulo che in serra. L'incrementata capacità di produrre biomassa è ben distribuita su tutte le strutture vegetali, come evidenziato dall'assenza di significatività nei cambiamenti di rapporto radice /parte aerea (R/S). Meno significativo ma comunque notevole è il risultato per la produzione di foglie che è maggiore sotto modulo, e denota che le piante possono investire un maggior quantitativo di energie in strutture fotosintetiche. Parallelamente, lo stato di benessere generalizzato delle plantule sotto moduli permette alle plantule di fragola di investire una parte dell'energia in riproduzione. Maggior numero di strutture riproduttive che includono, fiori e abbozzi fiorali ma anche frutti in allegagione è stato osservato ai limiti dei valori di significatività (Figura 43).

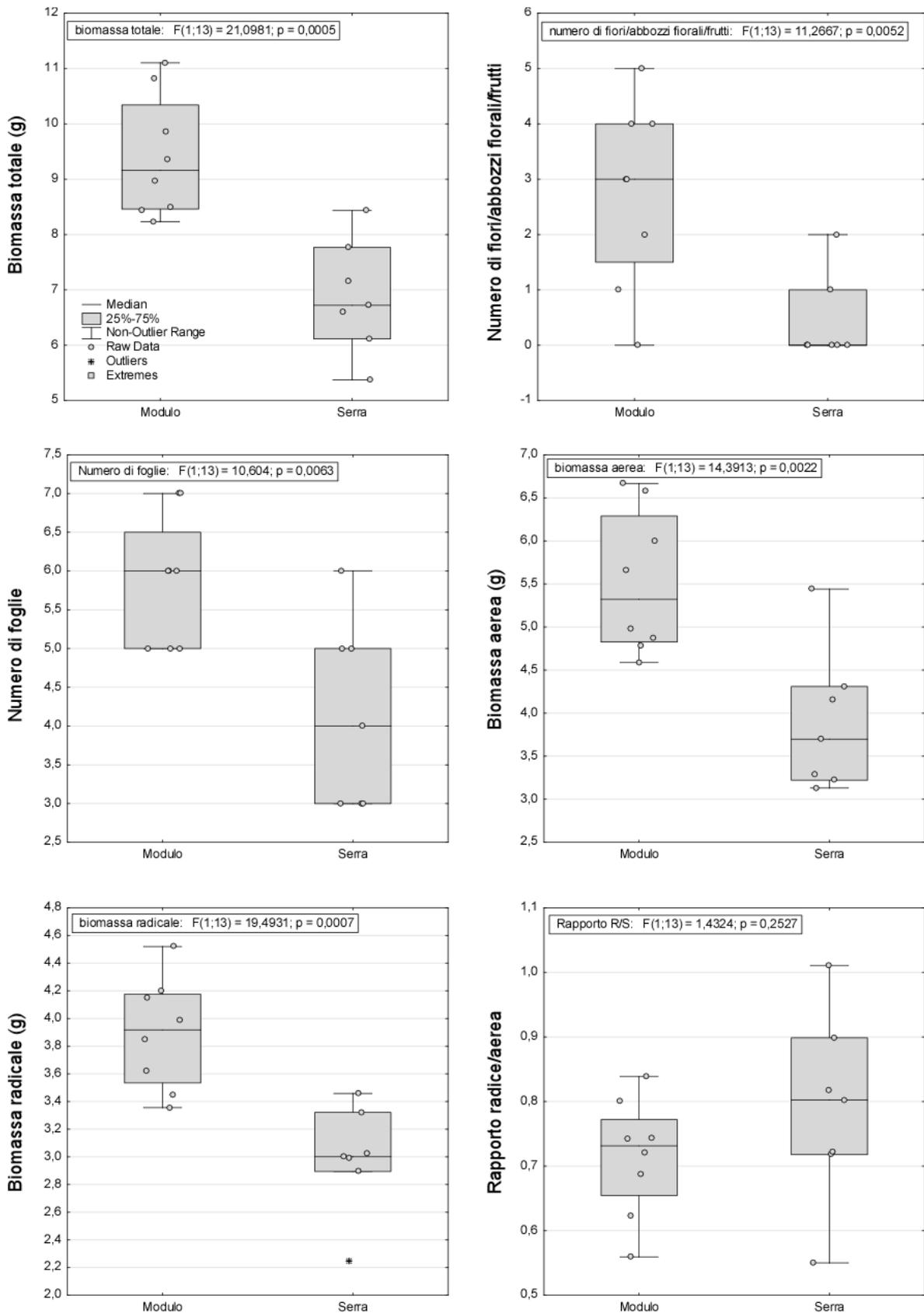


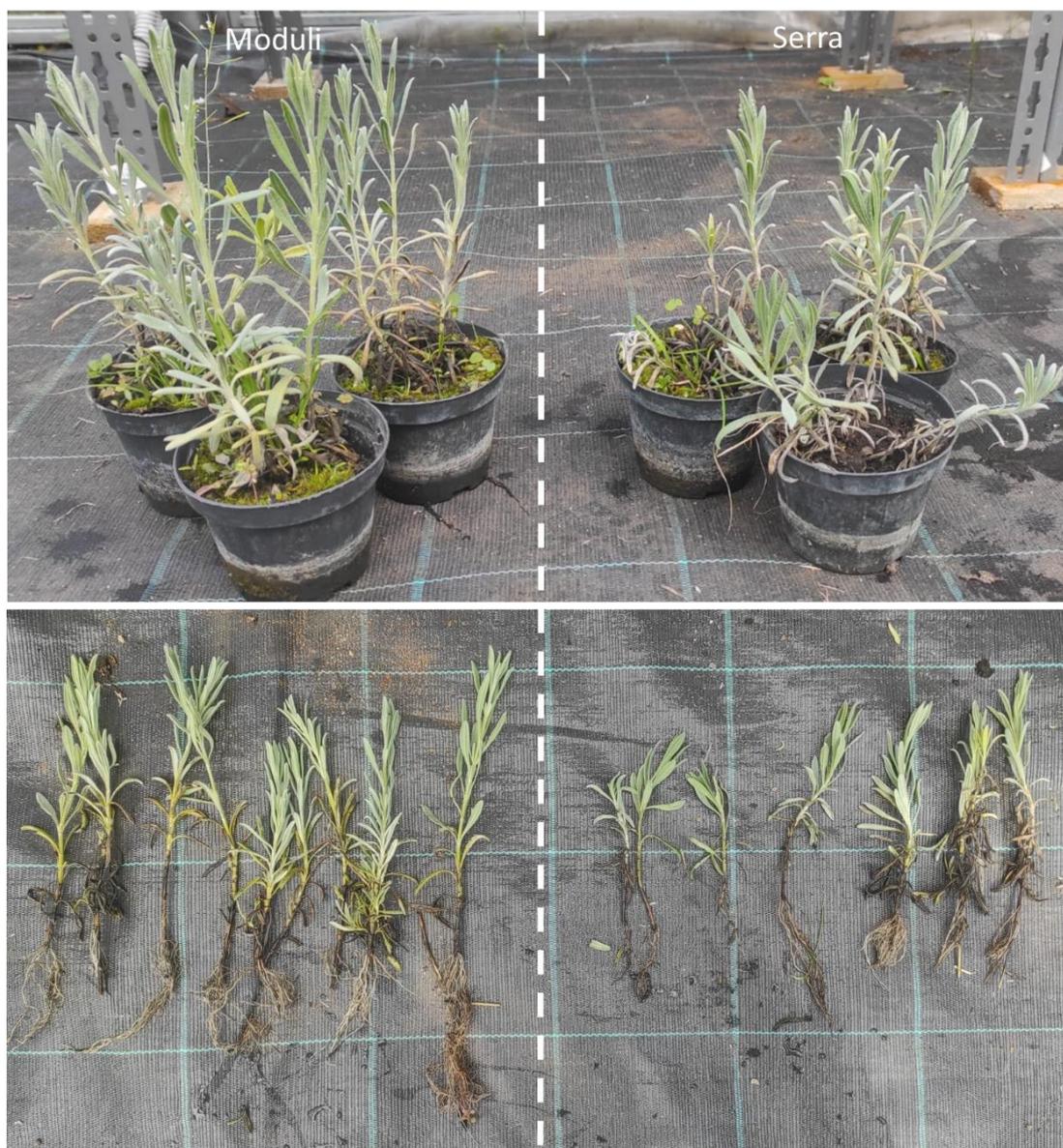
Figura 43 Diagrammi a scatola e baffi sui valori di crescita e produttività di *Fragaria x ananassa* sotto moduli... Ed in condizioni di serra normale

### *Sperimentazione su propagazione e taleggio*

Al lato delle produzioni agroalimentari, si è testato per l'applicazione della tecnologia come sistema per favorire la propagazione delle specie ornamentali e soprattutto tramite taleggio che è un processo che richiede condizioni luminose non eccessive e basse fluttuazioni climatiche in termini di temperatura e umidità. Per testare l'effetto dei moduli è stata comparata la capacità di propagazione e crescita un talee di *Lavandula angustifolia* (lavanda) in qualità di importante specie ornamentale utilizzata in giardinaggio e per la funzione estetica, ma anche impiegata come specie per la produzione di sostanze aromatiche (Figura 44). A settembre 2021 materiale vegetale di propagazione è stato prelevato da piante sane di *L. angustifolia* nell'Orto Botanico della Reggia di Portici. Il materiale consisteva nelle porzioni di rami prodotti nell'anno stesso con consistenza semi-legnosa. Il materiale iniziale, prelevato ad una lunghezza tra i 5 e gli 8 cm, è stato poi ridimensionato per ottenere materiale di propagazione con qualità tecniche idonee al processo di propagazione vegetativa. In dettaglio, per ogni talea di lavanda, le foglie in prossimità delle ultime 3 gemme ascellari sono state rimosse con l'ausilio di cesoie previamente sterilizzate con alcool etilico, la parte rimanente "nuda" consisteva di 3 porzioni di internodo mentre la porzione distale della talea era composta da ulteriori 3 gemme ascellari e relative foglie e 2 internodi. Le foglie rimanenti sono state tagliate nella porzione apicale per favorire proliferazione cellulare nelle porzioni basali. Le talee risultanti consistevano quindi in materiale di propagazione con una lunghezza di 5 cm circa ed un peso per talea che oscillava da 2,4 ai 2,9 g. Il materiale di propagazione è stato quindi sottoposto a lavaggio in soluzione a bassa concentrazione di ipoclorito di sodio (NaOH) (4% per litro w/w) per eliminare eventuali patogeni e successivi 4 lavaggi in acqua distillata e sterilizzata. Le talee una volta asciutte sono state impiantate in numero di 3 per vaso con diametro da 12 cm. I vasi sono stati previamente riempiti da un misto di suolo organico e sabbia (proporzione 2:1) sterilizzati in autoclave a 121°C per 15 minuti. Prima dell'inserimento delle talee nel substrato, la zona degli internodi basali è stata trattata con un preparato commerciale noto come ormone radicante a base di acido indol-3-butirrico (IBA). Le talee sono state in seguito lasciate vegetare in serra per un periodo di 4 mesi. Le talee che mostravano segni di marciume, o andavano incontro a disseccamento per mancato attecchimento sono state rimosse. Alla fine del periodo sperimentale le talee sono state rimosse dai vasi e gli apparati radicali messi a bagno in acqua per facilitarne la rimozione del suolo. misure biometriche indirizzate a fornire una stima dell'efficienza di attecchimento e crescita sono state ottenute. Nel dettaglio le variabili misurate sono state:

- Numero di radici primarie per talea
- Lunghezza delle radici primarie
- Lunghezza radicale totale
- Biomassa radicale
- Biomassa iniziale di tutta la talea
- Biomassa finale di tutta la talea
- Differenza tra biomassa iniziale e finale

I dati sono stati mostrati in diagrammi a scatole e baffi che mostrano nella linea le mediane, nelle scatole la distribuzione del dato dal 25° al 75° percentile e l'intervallo dei dati validi (non out-layer range). I dati sono stati accompagnati da test di significatività dei dati (ANOVA, analisi della varianza) con significatività fissata per valori di p-value inferiori a 0.05.



**Figura 44** Talee di *Lavandula angustifolia* propagate sotto moduli fotovoltaici (sinistra) ed in normali condizioni di serra (a destra). In basso le stesse talee in cui è stato visualizzato lo sviluppo dell'apparato radicale dopo un periodo di propagazione di 4 mesi.

I dati sperimentali per le talee di *L. angustifolia* hanno mostrato uno stato di accrescimento maggiore sotto moduli rispetto a condizioni di serra normali. Si è osservato un maggior numero medio di radici primarie nelle talee sotto moduli seppure non sufficiente a raggiungere valori significativi. Nonostante non ci sia cambiamento un cambiamento consistente per il numero di radici i valori di lunghezza sono invece più grandi e significativi sotto modulo ( $F=10.09$ ,  $p\text{-value}=0.007$ ), mentre è ai limiti della significatività per la lunghezza totale degli apparati radicali ( $F=4.35$ ,  $p\text{-value}=0.057$ ). il generalizzato incremento della crescita radicale ha portato anche a un aumento significativo della biomassa radicale che si attesta mediamente intorno ai 1.6 g sotto modulo rispetto a 0.7 g in serra ( $F=8.85$ ,  $p\text{-value}=0.01$ ). alla luce delle biomasse iniziali delle talee che non mostravano significative differenze, si osserva che sotto moduli c'è un maggiore incremento di peso dall'inizio alla fine dell'esperimento con una capacità totale di produrre 1.8 g di nuova biomassa contro i 0.8 sotto serra ( $F=9.96$ ,  $p\text{-value}=0.007$ ). In generale la sperimentazione ha evidenziato che sotto i moduli fotovoltaici la capacità delle talee di produrre biomassa è significativamente più alta rispetto alle stesse sotto serra convenzionale ( $F=8.11$ ,  $p\text{-value}=0.01$ ) (Figura 45).

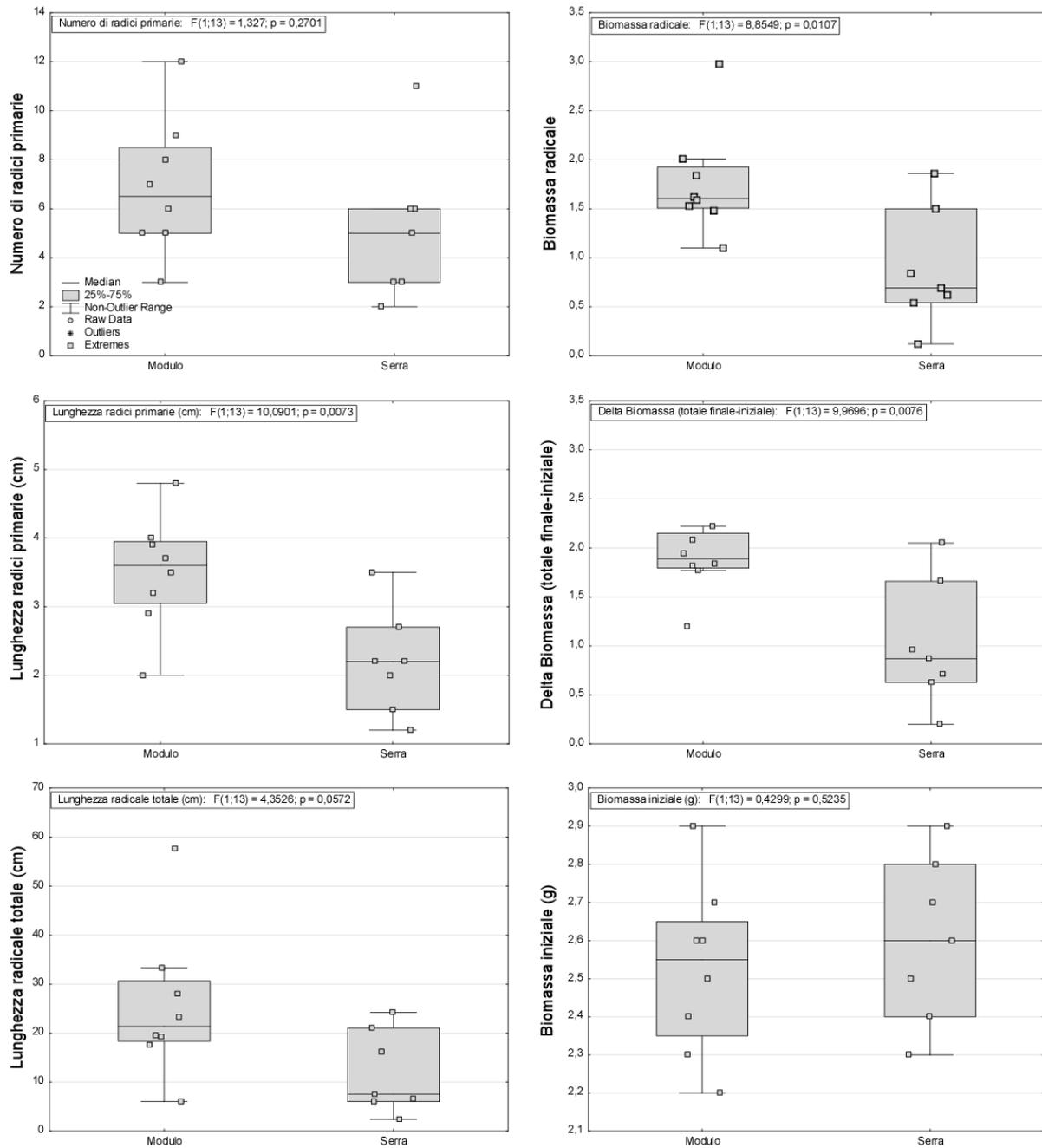
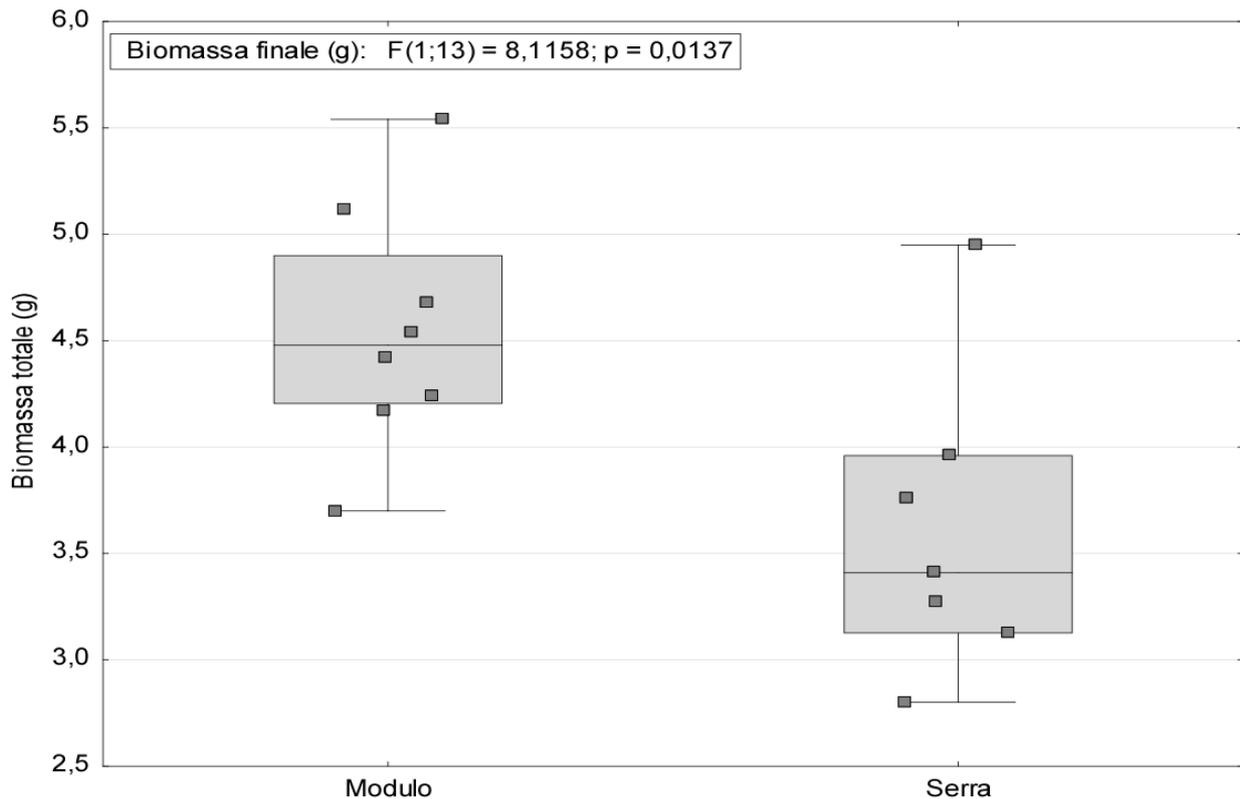


Figura 45 Diagrammi a scatola e baffi dei parametri di crescita e attecchimento di talee di *Lavandula angustifolia* sotto moduli fotovoltaici E in condizioni di crescita in serra



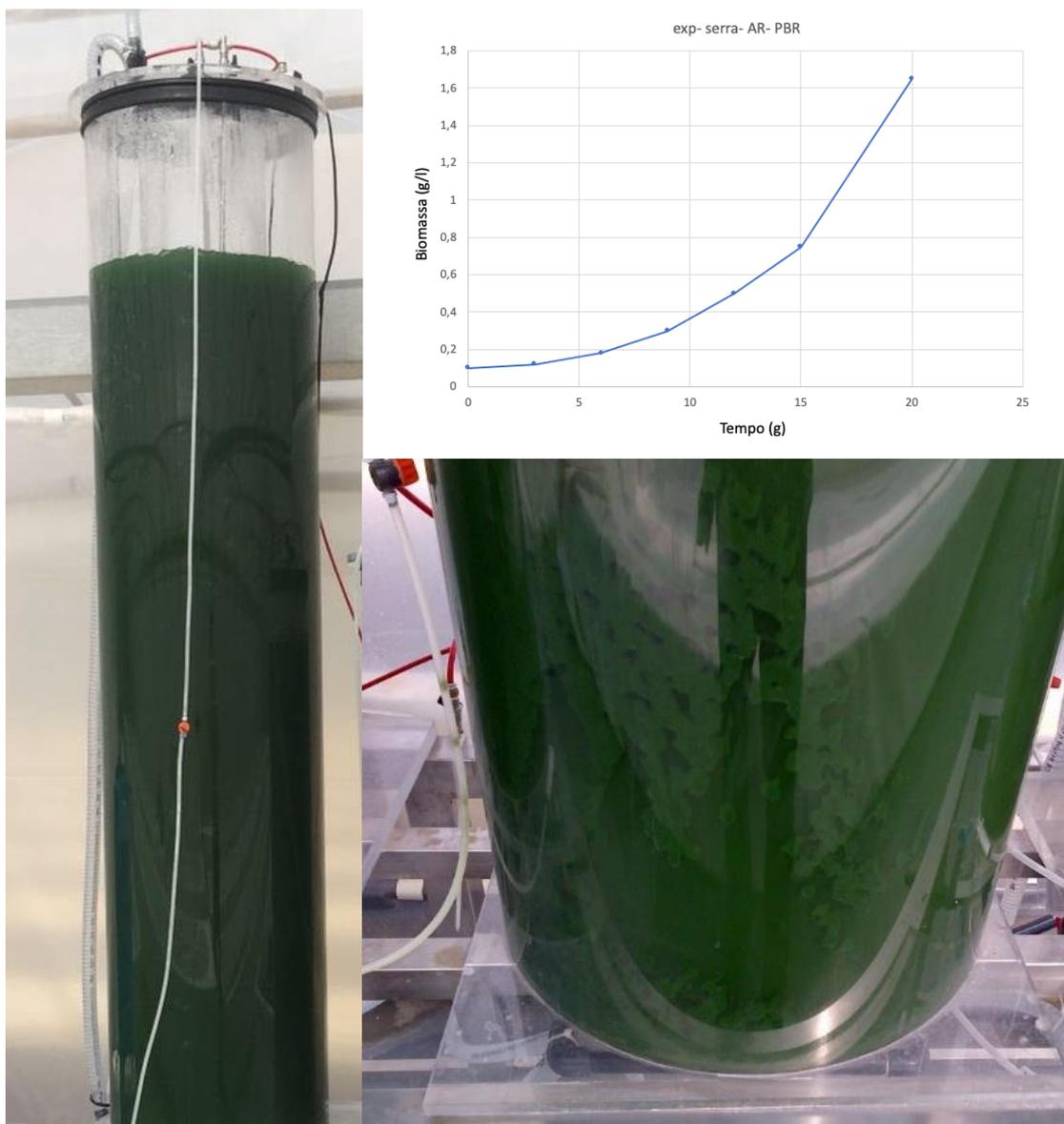
**Figura 46** diagrammi a scatola e baffi della biomassa finale di talee di *Lavandula angustifolia* sotto moduli fotovoltaici ed in condizioni di crescita in serra dopo tre mesi di propagazione

#### 2.2.4 Sperimentazione su microalghe in bioreattore.

Alla luce della sperimentazione su microalghe svolta su piccola scala ed in luce naturale, e per verificare la correttezza delle stime di produzione, si è optato per una prova finalizzata a valutare la conciliabilità tra i due sistemi di produzione basati sull'utilizzo della radiazione solare e le specie con migliore foto-adattamento che ottimizzano la loro crescita in ambienti con illuminazione non eccessiva. La coltivazione su larga scala delle microalghe può avvenire principalmente in due modi, tramite Raceway ponds, sistemi di coltivazione aperti a ricircolo continuo, dotati di paddle wheels per il ricircolo della coltura, e Fotobioreattori, sistemi chiusi costruiti in materiale trasparente, con geometrie e dettagli che ottimizzano esposizione solare della coltura e ricircolo forzato.

Per le condizioni osservate nella serra per la sperimentazione su media scala sita nel palmeto dell'orto botanico di Portici, è stata effettuata una sperimentazione su media scala in fotobioreattore da 150 litri locando l'apparato al di sotto dei moduli BIPV. La valutazione della crescita delle popolazioni microalgali in fotobioreattore è stata svolta utilizzando microalghe del genere *Arthrospira*.

La sperimentazione ha dimostrato che le condizioni di ombreggiamento collegate allo svolgimento di una coltivazione algale nell'ambiente sottostante a dei pannelli fotovoltaici sono favorevoli ad una ottimizzazione della produzione algale, riducendone il foto-danno e favorendo un ambiente luminoso intermedio adatto alle specie algali di interesse nel campo alimentare. La produttività del fotobioreattore è stata sotto BIPV molto buona, con crescite fino a 1,65 gr/lit in 20gg, senza fenomeni di foto-limitazione e foto-inibizione, sono state effettuate inoltre anche dei prelievi di biomassa per controllarne crescita, pigmenti, stato cellulare e la crescita è in linea con buona qualità in pigmentazione, proteine e contenuto cellulare, con buone produzioni. Anche in questo caso, l'effetto del taglio della radiazione luminosa nel momento di radiazione massima da parte dei pannelli BIPV del sistema fotovoltaico ha permesso di proteggere da elevate irradiazioni con un ottimo compromesso produzione PV /produzione microalghe (Figura 47).



**Figura 47** A destra Fotobioreattore a pareti trasparenti adattato per la crescita specifica di microalghe, in alto tendenze di Biomassa nell’arco di tempo di 20 gg, in basso accumulo di biomassa di *Arthrospira* sul fondo del reattore, si noti la consistenza più densa del mezzo di coltura liquido dovuto alla presenza di microalghe.

## 2.3 Simulazione della risposta fotosintetica di piante in condizione di luce dinamica

### 2.3.1 Descrizione del modello e degli esperimenti per la sua calibrazione

Basandosi su lavoro pregresso effettuato dal gruppo di ricerca, è stato adattato un modello di fotosintesi dinamica originariamente sviluppato per riprodurre la risposta di piante di soia esposte a condizioni di luce variabile nel tempo [2]. Tale modello, originariamente concepito per simulare piante cresciute in condizioni controllate (camera di crescita) è stato, nell’ambito delle attività del progetto, adattato a riprodurre le dinamiche fotosintetiche di piante esposte a luce naturale e condizioni ambientali non controllate.

Il modello qui utilizzato rappresenta i processi principali coinvolti nella regolazione della fotosintesi di piante C3 esposte a rapidi cambiamenti di intensità luminosa. Per semplicità, il modello considera le dinamiche occorrenti in un singolo cloroplasto come rappresentativo dell’intero apparato fogliare. Quando la luce eccita il fotosistema 2 (PSII), molti pigmenti (principalmente i pigmenti antenna clorofilla a e b) raccolgono l’energia e la veicolano ai centri di reazione. Il numero di pigmenti è variabile in funzione della specie e determina la capacità del fotosistema di trasferire l’energia acquisita dalla luce. Il PSII ossida l’acqua

in O<sub>2</sub> rilasciando protoni all'interno del lume tilacoidale. Gli elettroni sono poi trasferiti al citocromo b6f che a sua volta li trasferisce al fotosistema I (PSI) trasportando ulteriori protoni nel lume. Il pompaggio di protoni dallo stroma al lume crea un gradiente elettrochimico utilizzato dalla ATP sintetasi per produrre ATP con il conseguente trasporto di protoni dal lume allo stroma. Gli elettroni trasportati in parallelo sono utilizzati per ridurre l'accettore finale da NADP<sup>+</sup> a NADPH. L'energia chimica così prodotta (ATP e NADPH) viene utilizzata nel ciclo di Calvin per fissare la CO<sub>2</sub> con la conseguente produzione di glucosio. La fissazione della CO<sub>2</sub> nel ciclo di Calvin è principalmente veicolata dall'enzima Rubisco, la cui attivazione e disattivazione è esplicitamente simulata. Quando c'è eccesso energetico, parte di questa energia viene dissipata attraverso diversi processi, collettivamente definiti Non-Photochemical Quenching (NPQ). L'attivazione di tali processi è fondamentale per la rappresentazione della fotosintesi in condizioni di luce altamente variabili dato che determina la capacità della pianta di adattarsi a improvvisi cambiamenti senza subire gli effetti negativi causati, per esempio, dalla produzione di specie reattive dell'ossigeno (ROS).

Il modello, nello specifico, rappresenta la dinamica nel tempo di sei variabili di stato: l'energia assorbita dal PSII, il livello di attivazione delle proteine connesse al processo di NPQ, il flusso di energia attraverso tali complessi proteici, le dinamiche di produzione di NADP<sup>+</sup> e NADPH e il livello di attivazione della Rubisco.

Al fine di calibrare il modello precedentemente sviluppato su piante di due varietà di soia [2], sono stati effettuati degli esperimenti in camera di crescita su piante di lattuga (*Lactuca sativa var. canasta*). Venti piante di lattuga sono state cresciute in vasi di 12 cm di diametro per 4 settimane in camera di crescita in condizioni di luce costante e luce fluttuante. La luce è stata accesa dalle 5:00 alle 19:00 e l'intensità è stata impostata per riprodurre l'andamento giornaliero della luce solare fino a raggiungere la massima intensità a 650 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup> nelle condizioni di luce non fluttuante, mentre nelle condizioni di luce fluttuante, l'intensità è stata variata del +20% e -20% a intervalli regolari di un minuto. In questo modo la quantità totale di luce tra i due trattamenti risulta essere la stessa. Alla fine di questo periodo di crescita sono state selezionate casualmente 3 piante per trattamento (luce fluttuante e non fluttuante) da cui sono state selezionate delle foglie giovani e completamente sviluppate per caratterizzare il processo fotosintetico con analisi di fluorescenza combinate con analisi di scambi gassosi usando un LI-6800 (Licor Biosciences, Nebraska, United States) equipaggiato con analizzatore di gas a infrarosso. In particolare, sono state effettuate misure del tasso di assimilazione di carbonio (A), tasso di trasporto degli elettroni (ETR) e non-photochemical quenching (NPQ).

Per effettuare queste misure è stato utilizzato il seguente protocollo: tutte le piante sono state adattate al buio durante la notte e poi la luce è stata accesa per 60 minuti in due condizioni, luce costante (PPFD di 650 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>) o luce fluttuante con intensità di luce che varia ogni minuto tra 780 e 520 μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>. Le condizioni di CO<sub>2</sub> sono state mantenute costanti a 400ppm e la temperatura dell'aria a 25 °C. L'assimilazione di carbonio (A in μmol m<sup>-2</sup> s<sup>-1</sup>) è stata calcolata come segue:

$$A = \frac{\mu_0 \left( c_0 - c_a \left( \frac{1 - w_0}{1 - w_a} \right) \right)}{s}$$

dove  $\mu_0$  è il flusso di aria entrante la camera fogliare (μmol s<sup>-1</sup>),  $s$  è la superficie fogliare (m<sup>2</sup>),  $c_0$  e  $w_0$  sono le concentrazioni di CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O (in μmol e mmol rispettivamente) in ingresso e  $c_a$  e  $w_a$  sono le concentrazioni di CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O in uscita dalla camera.

L'NPQ è stato calcolato con l'equazione di [3], basata sul metodo Stern-Volmer come riportato di seguito:

$$NPQ = \frac{(F'_m - F'_m)}{F'_m}$$

dove  $F'_m$  e  $F_m$  sono le misure di fluorescenza massima in luce e buio rispettivamente.

Infine, l'ETR è stato calcolato seguendo il metodo in [4], come segue:

$$ETR = I \cdot \alpha \cdot fraction_{PSII} \cdot \Phi_{PSII}$$

dove  $I$  è la luce incidente,  $fraction_{PSII}$  è la frazione di luce assorbita dal PSII e di solito impostato a 0.5 [5],  $\alpha$  è il coefficiente di assorbanza, e  $\Phi_{PSII}$  è l'efficienza operativa del PSII, calcolata come segue:

$$\Phi_{PSII} = \frac{(F'_m - F_s)}{F'_m}$$

dove  $F_s$  è il valore di fluorescenza a stato stazionario.

Al fine di adattare il modello a condizioni ambientali non controllate, specificamente temperatura e concentrazione di CO<sub>2</sub> che hanno un effetto importante sulla risposta fotosintetica, sono state inserite due ulteriori funzioni. Tali funzioni rappresentano la risposta (in %) del flusso di fissazione del carbonio ( $A$ ) al variare dei due parametri ambientali. In particolare, la risposta alla temperatura  $T$  è formulata come segue:

$$RC_T = \frac{2 \cdot (T - PS_{tmin})^{\alpha_{PS}} \cdot (PS_{topt} - PS_{tmin})^{\alpha_{PS}} - (T - PS_{tmin})^{2 \cdot \alpha_{PS}}}{(PS_{topt} - PS_{tmin})^{2 \cdot \alpha_{PS}}}$$

con

$$\alpha_{PS} = \frac{\log(2)}{\log\left(\frac{PS_{tmax} - PS_{tmin}}{PS_{topt} - PS_{tmin}}\right)}$$

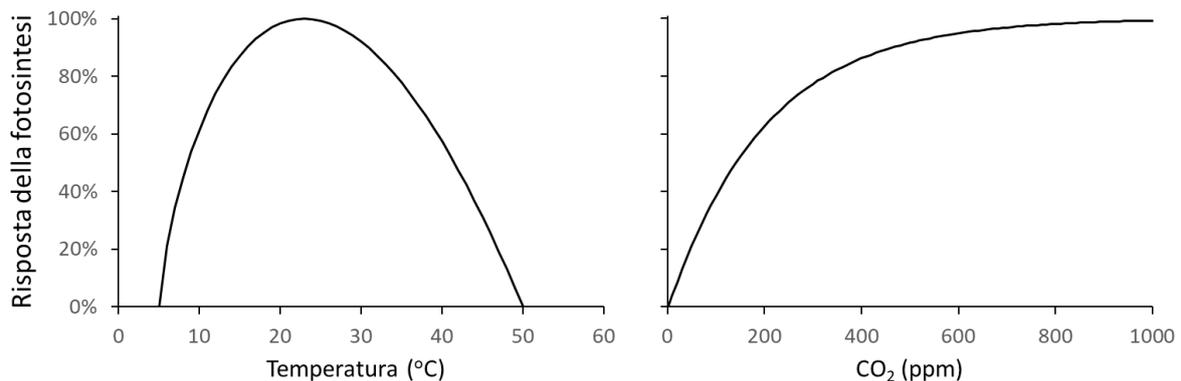
dove  $PS_{tmin}$ ,  $PS_{topt}$ ,  $PS_{tmax}$  sono parametri di calibrazione che rappresentano i valori di temperatura minima, ottimale e massima, rispettivamente.

La risposta alla concentrazione ambientale di CO<sub>2</sub> è formulata come segue:

$$RC_{CO_2} = p_1 \left( 1 - \left( 1 - \frac{p_3}{p_1} \right)^{\left( 1 - \frac{CO_2}{p_2} \right)} \right)$$

dove  $p_1$ ,  $p_2$  e  $p_3$  sono parametri di calibrazione.

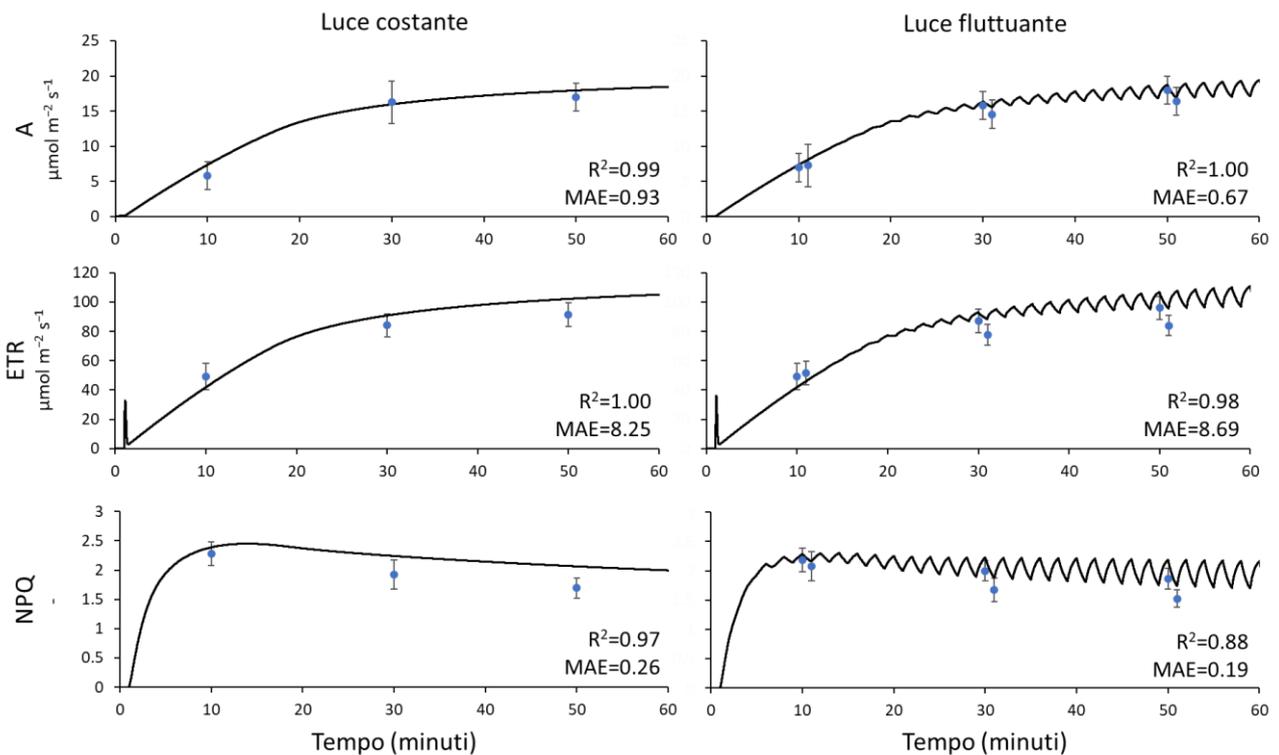
Per la stima dei parametri di queste due risposte ci si è basati su [6] e [7], rispettivamente per la risposta alla temperatura e alla CO<sub>2</sub> (Figura 48).



**Figura 48** Risposte funzionali della fotosintesi di *Lactuca sativa* a temperatura dell'aria e concentrazione di CO<sub>2</sub>.

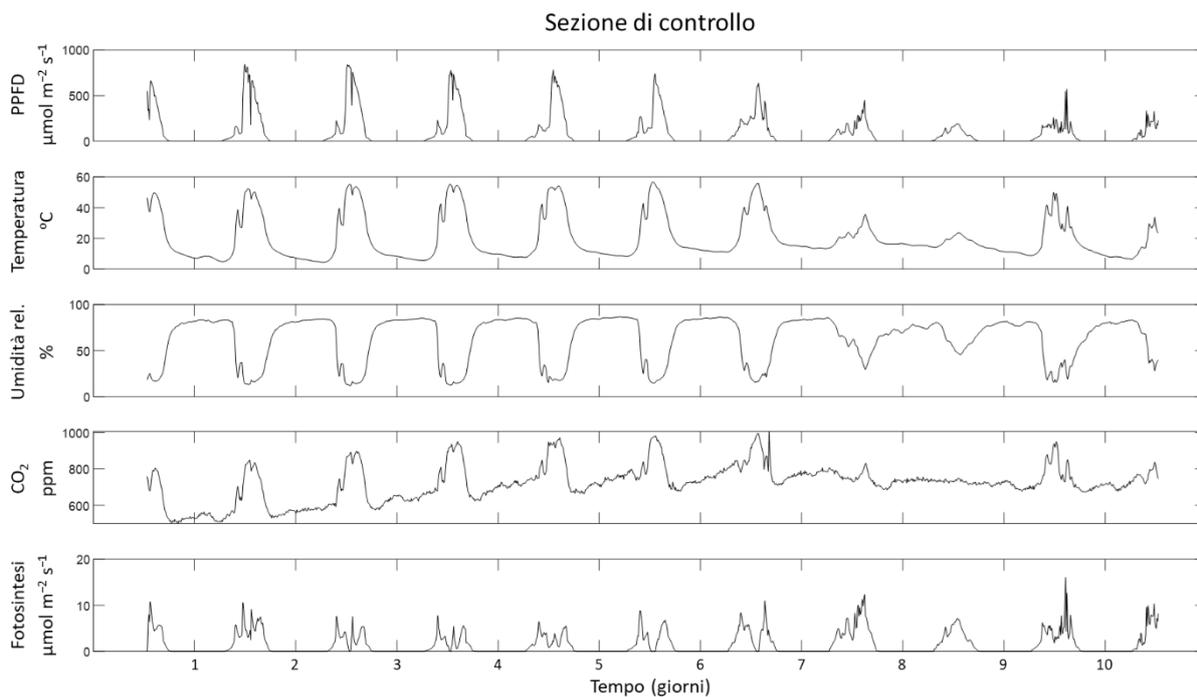
### 2.3.2 Risultati

In Figura 49 sono riportati i risultati delle simulazioni del modello a valle della calibrazione dei parametri per riprodurre il comportamento di lattuga cresciuta in camera di crescita con due regimi di luce differenti, costante e fluttuante. In particolare, vengono visualizzati il flusso di assimilazione del carbonio  $A$ , il flusso della catena di trasporto degli elettroni  $ETR$ , e l'intensità del non-photochemical quenching  $NPQ$ . Come si può vedere dalla figura, i flussi simulati presentano alta corrispondenza con quelli misurati, dimostrando la bontà delle prestazioni del modello nel riprodurre la fotosintesi di lattuga, in particolare l'adattamento dei flussi che avviene in circa 30 minuti del passaggio dalla fase di buio (minuto 0) alla fase di luce costante o fluttuante (dal minuto 1 in poi).

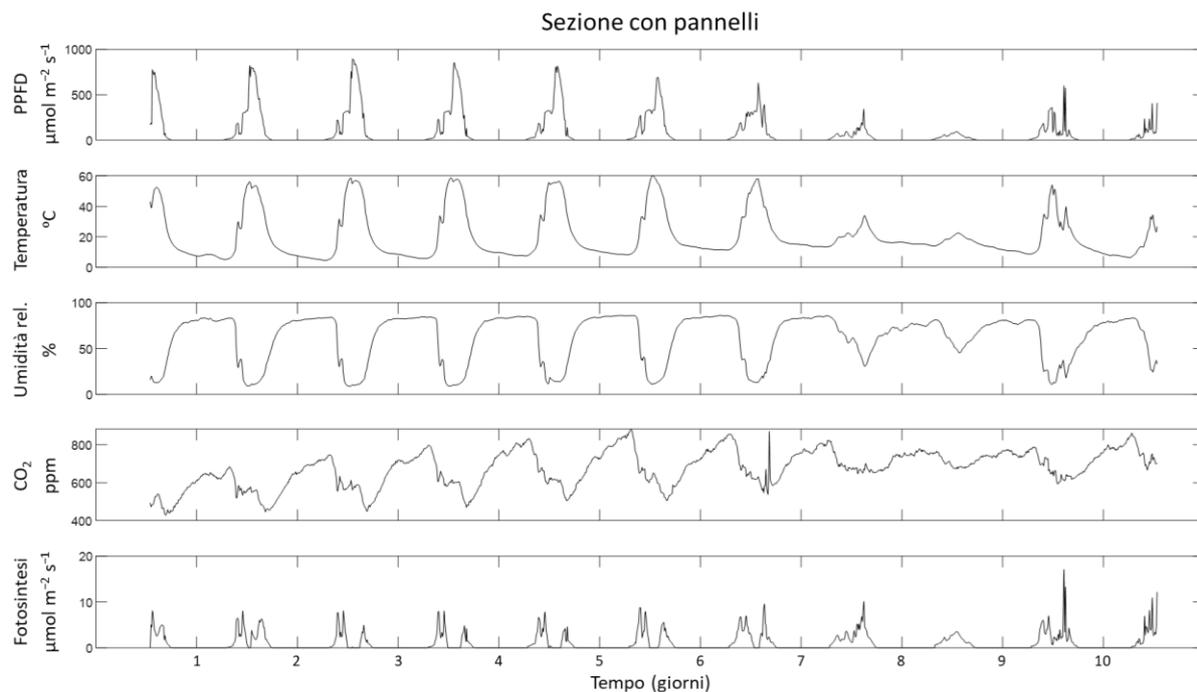


**Figura 49** Simulazione della fotosintesi di *Lactuca sativa* in camera di crescita con due regimi di illuminazione. Le linee continue rappresentano i valori simulati di A, ETR e NPQ, mentre i punti blu rappresentano i valori misurati e relative deviazioni standard.

A valle del processo di calibrazione che ha prodotto i risultati sopra riportati, il modello è stato testato utilizzando i dati raccolti in tempo reale dalla rete di sensori IoT con cui è stata equipaggiata la serra prototipale di media scala. In Figura 50 e Figura 51 si riportano i valori registrati delle variabili ambientali nelle due sezioni della serra e i risultati delle simulazioni che stimano i flussi fotosintetici in una serie temporale di 10 giorni. È interessante notare come nei primi 5 giorni si siano verificate condizioni di temperatura molto alte all'interno della serra con il conseguente abbassamento della capacità fotosintetica nelle ore centrali del giorno. Negli ultimi 4 giorni, invece, sono stati giorni piovosi dove sono state registrate temperature più basse e intensità luminose minori in entrambe le sezioni. Come facilmente prevedibile, si può osservare inoltre che la luce incidente all'interno della serra sia quasi sempre inferiore nella sezione con copertura fotovoltaica rispetto a quella registrata nella sezione di controllo. Questa differenza di luce, però, non ha comportato una sostanziale riduzione dei flussi fotosintetici in quelle giornate dove l'intensità luminosa era alta, mentre ha comportato una leggera riduzione della fotosintesi nelle ultime giornate caratterizzate da pioggia e cielo coperto. In quest'ultimo caso, infatti, la luce a disposizione iniziava ad essere limitante, riducendo di conseguenza la capacità della pianta di assimilare CO<sub>2</sub>.



**Figura 50** Stima del flusso fotosintetico di piante di *Lactuca sativa* nella sezione di controllo della serra fotovoltaica (scala media). I grafici riportano, dall'alto verso il basso, le variabili ambientali misurate dai sensori: intensità luminosa in termini di densità del flusso di fotoni fotosinteticamente attivi (PPFD), temperatura dell'aria, umidità relativa, concentrazione di CO<sub>2</sub> nell'aria; e il flusso fotosintetico simulato dal modello.



**Figura 51** Stima del flusso fotosintetico di piante di *Lactuca sativa* nella sezione con pannelli della serra fotovoltaica (scala media). I grafici riportano, dall'alto verso il basso, le variabili ambientali misurate dai sensori: intensità luminosa in termini di densità del flusso di fotoni fotosinteticamente attivi (PPFD), temperatura dell'aria, umidità relativa, concentrazione di CO<sub>2</sub> nell'aria; e il flusso fotosintetico simulato dal modello.

## 2.4 Studio preliminare per la realizzazione di serra fotovoltaica su larga scala

Le attività del progetto prevedevano inoltre l'allestimento di sperimentazioni su larga scala, implicando l'utilizzo di strutture per coltivazione in ambienti protetti al quale abbinare le tecnologie sviluppate nel progetto e quindi un sistema agri-voltaico. In particolare, si è voluto scegliere tra le strutture in uso nel Dipartimento di Agraria dell'Università di Napoli Federico II una serra sul quale si potessero applicare BIPV e che permettessero l'autosufficienza del sistema, in termini energetici, e la possibilità di effettuare sperimentazioni scientifiche su organismi fotosintetici. Nelle prime fasi dell'attuazione dell'attività si è proceduto a visionare le strutture presenti nel Dipartimento, valutando la fattibilità dell'operazione anche in base alle dimensioni delle strutture, l'esposizione e la possibilità di poter integrare tutte le attrezzature accessorie al funzionamento del sistema in ottica di applicazione delle tecnologie in essere al progetto. La scelta è ricaduta sulla serra denominata di "ex-patologia" in quanto struttura che necessitava ristrutturazione, con dimensioni relativamente ridotte, provvista di una buona esposizione delle falde, ma anche provvista di uno stato delle strutture basali e portanti accettabile, rispetto ai tempi di disuso. Inoltre, ad avvalorare la scelta della serra di ex-patologia, è stata la vicinanza rispetto all'orto botanico, la presenza assidua di personale delle serre di patologia vegetale che potesse monitorare la struttura, e fornire sostegno nel processo di sperimentazione in materia di scienze agrarie e forestali. L'ubicazione del sito è riportata in Figura 52 dalla quale si evince la posizione rispetto alla sede del Dipartimento di Agraria di Portici e rispetto all'orto botanico afferente al centro MUSA.

La serra storica di Ex-Patologia consiste in una struttura risalente al progetto dell'orto patologico del 1921, e finalizzata nel 1927, destinata a colture di isolamento e quarantena e ricerca sperimentale, composta da totale copertura a vetro, con una superficie totale di circa 240 m<sup>2</sup>. Sul computo totale della metratura la planimetria della struttura (non mostrata) è suddivisa in 5 aree. Nella porzione centrale si osserva un corridoio centrale della larghezza di 1,5 m circa che funge da area di passaggio tra i vari ambienti e che si sviluppa longitudinalmente per tutta la lunghezza della serra al di sotto di questo si osserva una vasca di drenaggio della larghezza di un metro e profondità di 50 cm, per lo scolo delle acque irrigue. Il corridoio centrale costituisce la porzione più alta della struttura che sviluppa di circa 80 cm oltre le falde ad est ed ovest con la funzione di camino di areazione per permettere il riciclo dell'aria calda sviluppata nella struttura e quindi regolazione della temperatura. Il camino centrale è composto da finestre in vetro fissate su infissi in ferro ed una passerella superiore per poterle aprire. Trasversalmente, la struttura è suddivisa in due porzioni, che a sua volta è divisa in due aree per porzione, suddivise da vetrate fissate su infissi in alluminio, probabilmente messi in sito da parziali operazioni di restauro pregresse. La porzione orientata a sud (la prima dall'entrata in Figura 53) consiste di due ambienti separati poggiati su di un basamento in calcestruzzo dell'altezza di 20 cm rispetto alla superficie del piazzale adiacente. Tali ambienti erano adibiti alla sperimentazione in vaso data la presenza di bancali fissi costruiti su sostegni in ferro e mattoni forati. Nella seconda parte, posta sul lato nord della serra, si riscontravano due aree destinate alla sperimentazione diretta in suolo, contornate da cordoli di cemento dell'altezza di 20 cm, che al momento del sopralluogo era occupata da una piantagione fissa di Kiwi, che veniva periodicamente ridotta per evitare ulteriori danni alla struttura della serra. L'area in suolo risultava quasi interamente scoperta per il deterioramento e rottura delle coperture vetrate soprastanti. In generale, la serra è stata usata fino agli anni 2000 dove poi le attività sono diminuite sempre più per essere svolte nelle nuove serre adiacenti di Patologia vegetale. Le attività sperimentali nel sito sono state completamente abbandonate dopo che un evento meteorico del giugno 2013 ha provocato la rottura di buona parte della vetratura rendendo la struttura totalmente inagibile.

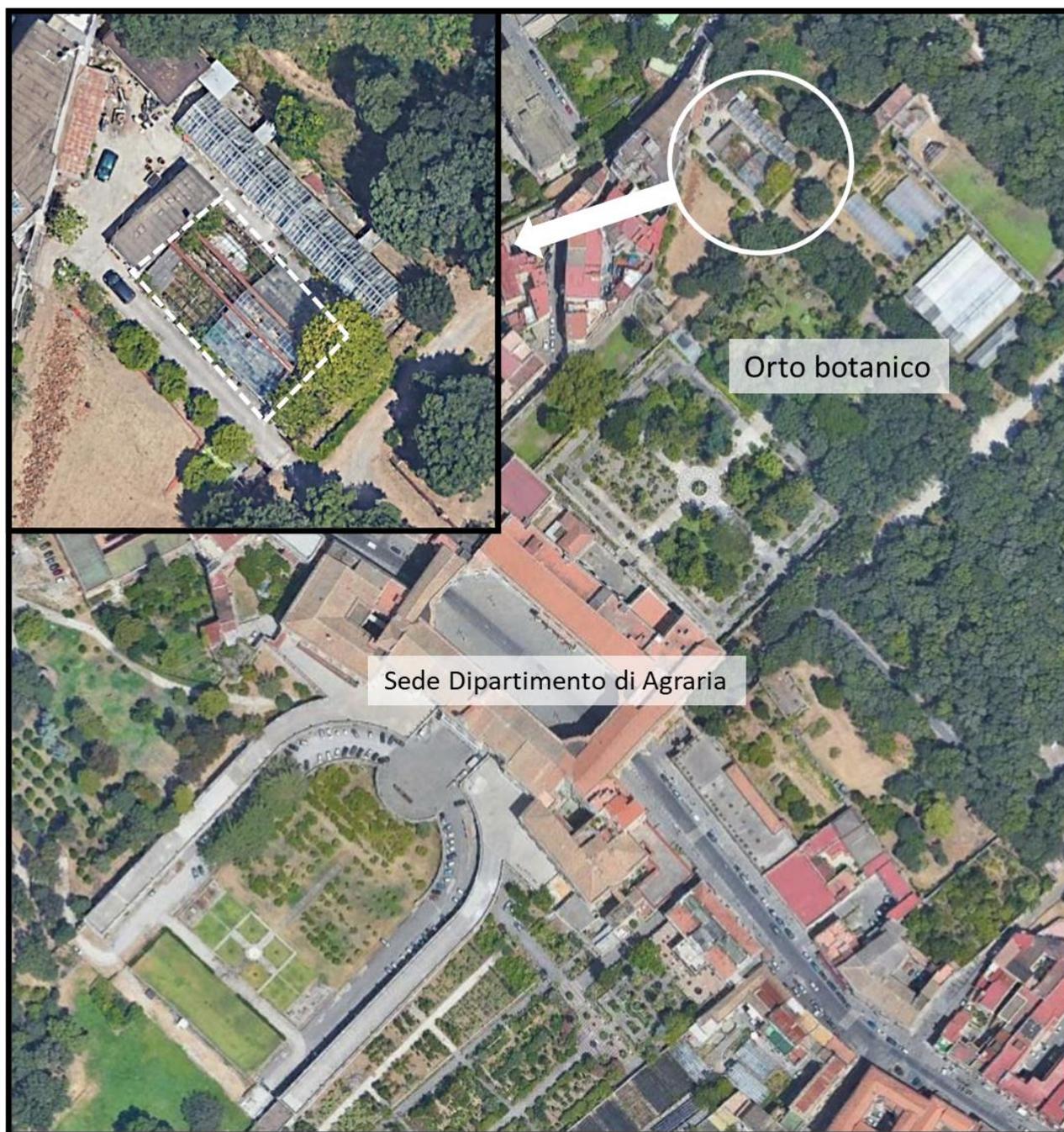


Figura 52 Veduta satellitare della sede del Dipartimento di Agraria dell'Università degli studi di Napoli "Federico II" a Portici. In alto a sinistra dettaglio della serra storica individuata per essere ristrutturata.



**Figura 53, Veduta dell'entrata della serra di "ex-Patologia", si nota lo stato di abbandono della stessa ed il danneggiamento della copertura vetrata in seguito ad eventi metereologici avversi.**

### 3 Conclusioni

I risultati di questa linea di attività alle diverse scale mostrano un ottimo potenziale per l'integrazione di colture vegetali in un sistema agri-voltaico. Sia alla scala di laboratorio che alla scala media in serra prototipale, le piante testate hanno mostrato una ottima risposta di crescita anche in presenza di limitazione della luce trasmessa dei moduli BIPV. Chiaramente, la scelta delle specie coltivabili deve necessariamente ricadere su essenze più tolleranti all'ombreggiamento, con un minore fabbisogno luminoso. Anzi, per colture sensibili alla luce, il sistema integrato permette un'ottimale protezione dalle eccessive radiazioni luminose che possono essere nocive. La pratica della propagazione del materiale vegetale è un processo molto delicato, che include un elevato dispendio di energie e materiali per la regolazione dei parametri ambientali rispetto a sistemi colturali ai fini produttivi. Il presente sistema della serra a scala media oltre a costituire una valida struttura sperimentale per il sistema di produzione integrata pianta-energia, si è rivelato un ottimo prototipo di un prodotto che può essere utilizzato nel settore vivaistico. Ciò nonostante, ulteriori prove devono essere svolte per quantificarne l'applicabilità su più specie. Un esempio può essere quello delle specie forestali o le affini piante micorrizzate, destinate alla tartuficoltura che hanno un elevato valore commerciale ma che necessitano di ombreggiamento continuo ed un supplemento di energia elettrica per il controllo delle temperature troppo rigide e irrigazione continua per favorire l'espansione dei simbionti fungini nel suolo. Anche su microalghe le sperimentazioni a piccola scala e in fotobioreattore hanno confermato quanto osservato sulle piante, e cioè che la tecnologia presente nei sistemi agri-voltaici bene si concilia con la produzione di grandi quantità di microalghe destinate al consumo umano aprendo ancora di più lo scenario di applicabilità dei moduli BIPV semitrasparenti.

## 4 Riferimenti bibliografici

- 1 L. Fang. "The relationships between optical density, cell number, and biomass of four microalgae". *Acta Ecologica Sinica*. (2014).
- 2 N. Salvatori, F. Carteni, F. Giannino, G. Alberti, S. Mazzoleni, A. Peressotti. "A System Dynamics Approach to Model Photosynthesis at Leaf Level Under Fluctuating Light". *Frontiers in Plant Science* 12 (2021), 787877-787877.
- 3 W. Bilger, O. Björkman. "Role of the xanthophyll cycle in photoprotection elucidated by measurements of light-induced absorbance changes, fluorescence and photosynthesis in leaves of *Hedera canariensis*". *Photosynthesis research* 25 (1990), 173-185.
- 4 J. P. Krall, G. E. Edwards. "Relationship between photosystem II activity and CO<sub>2</sub> fixation in leaves". *Physiologia Plantarum* 86 (1992), 180-187.
- 5 N. R. Baker. "Chlorophyll fluorescence: a probe of photosynthesis in vivo". *Annu. Rev. Plant Biol.* 59 (2008), 89-113.
- 6 J. Zhou, P. Li, J. Wang. "Effects of Light Intensity and Temperature on the Photosynthesis Characteristics and Yield of Lettuce". *Horticulturae* 8 (2022), 178.
- 7 M. Kirschbaum, M. Küppers, H. Schneider, C. Giersch, S. Noe. "Modelling photosynthesis in fluctuating light with inclusion of stomatal conductance, biochemical activation and pools of key photosynthetic intermediates". *Planta* 204 (1997), 16-26.

## 5 Abbreviazioni ed acronimi

ANOVA: Analisi della Varianza  
AP: Arthrospira  
BIPV: Building Integrated PhotoVoltaic  
CO<sub>2</sub>: Anidride carbonica  
CP: Chlorella  
ESC: Easy sense and connect  
ETR: Trasporto di elettroni  
IBA: Acido indol-3-Butirrico  
IoT: Internet of things  
LED: Light emitting diode  
MDS: Master data services  
MTOW: Maximum take-off weight (drone)  
MUSA: Museo delle scienze agrarie  
NADP<sup>+</sup> e NADPH: Nicotinammide adenina dinucleotide fosfato  
NPQ: Non photochemical quenching  
PAR: Radiazione fotosinteticamente attiva  
PPFD: Densità del flusso di fotoni fotosintetici  
PSII: Foto-sistema 2  
R/S: Rapporto tra radice e fusto  
RC: Risposta fotosintetica  
RF: Radio-frequenza  
ROS: Specie reattive dell'ossigeno  
SCx: Sensori a cablaggio  
SPAD: Soil plant analysis development  
SRx: Sensori a radiofrequenza

## 6 Allegati

### *Allegato 1 - Curriculum del gruppo di lavoro*

Il gruppo di lavoro autore del report fa parte del dipartimento di Agraria di Portici dell'Università degli studi di Napoli "Federico II". Il gruppo scientifico vanta lunghe esperienze nel contesto dell'ecologia del fuoco, scienze delle piante sia agrarie che forestali, interazione pianta-suolo, ecologia delle comunità microbiche del suolo, biologia della conservazione e modellizzazione ecologica ed agronomica. Il gruppo di ricerca è caratterizzato da alti livelli di interdisciplinarietà come anche evidenziato dalle numerose pubblicazioni nel contesto della modellizzazione delle dinamiche di sistema con applicazione in diversi campi come:

- Modellizzazione delle dinamiche del fuoco.
- Modellizzazione dei processi di formazione dei pattern vegetali.
- Software tools e aspetti teorici.
- Sistemi di support decisionali.

A seguire il biosketch degli autori del report:

#### ***Fabrizio Carteni***

Ricercatore a tempo determinato di tipo A, dottorato di ricerca in scienze agrarie ed agro alimentari presso il Dipartimento di Agraria dell'Università degli studi di Napoli Federico II. I maggiori interessi scientifici sono nel campo dell'eco-fisiologia e processi di sviluppo vegetale partecipando come autore e co-autore di più di 30 lavori scientifici in riviste "peer-reviewed" internazionali e diversi progetti a carattere nazionale e internazionale. Buona parte della sua produzione scientifica ed applicata si sviluppa sulla base di approcci con diversi sistemi di simulazione come System Dynamics, Individual-Based Models e sistemi Reaction-Diffusion. Il suo vasto interesse per la ricerca include anche lo studio dei meccanismi ecologici e biologici che regolano i processi di interazione tra pianta e suolo, i processi di sviluppo fenologici nei pattern spaziali di vegetazione, l'inibizione da self-DNA, la xilogenesi in ambienti mediterranei e boreali, dinamiche di crescita di popolazioni cellulari ed il ciclo cellulare e metabolismo dei lieviti.

#### ***Maurizio Zotti***

Assegnista di ricerca presso il centro MUSA del Dipartimento di Agraria dell'Università degli studi di Napoli Federico II. Dottorato di ricerca nello stesso dipartimento, Micologo riconosciuto dal ministero della salute italiana. I suoi maggiori interessi sono nel campo dell'ecologia microbica, micologia ed interazione tra pianta e funghi saprotrofi, simbionti e patogeni ed ecologia generale. Ha un forte interesse multidisciplinare verso lo studio delle scienze biologiche e l'ecologia che lo hanno portato a essere autore e coautore di oltre 30 articoli scientifici pubblicati in riviste scientifiche peer-reviewed internazionali. Nel corso della sua formazione scientifica ha sviluppato forte interesse per le metodiche di analisi dati sulle comunità microbiologiche e di metabolomica ambientale tramite tecniche di analisi multivariata che vanno dagli agroecosistemi, agli ecosistemi naturali a base suolo e a base acqua sia in contesto marino che di acqua dolce.

#### ***Francesco Giannino***

Professore Associato di Analisi Numerica presso il Dipartimento di Agraria dell'Università degli studi di Napoli Federico II. Dottorato di ricerca nello stesso dipartimento. I suoi interessi di ricerca vertono verso il disegno, sviluppo e analisi di modelli applicati alle scienze ambientali, alla biologia e all'agricoltura. Gli aspetti metodologici e computazionali delle sue attività di ricerca si concentrano su:

- Applicazione di sistemi matematici a scale teoriche e pratiche usando differenti tipologie di linguaggi di programmazione e software.
- Disegno di modelli, implementazione ed analisi in sistemi complessi usando diversi approcci per simulare processi biologici ed ecologici.

Collabora attivamente a svariati progetti di ricerca del quale è anche responsabile sia in contesto internazionale che nazionale e vanta diverse collaborazioni con gruppi di ricerca internazionali.

**Giuliano Bonanomi**

Professore Associato di Patologia Vegetale presso il Dipartimento di Agraria dell'Università degli studi di Napoli Federico II. Dottorato presso l'Università di Ancona, i suoi maggiori interessi di ricerca risiedono nello studio delle interazioni tra pianta e microbi, interazioni pianta-suolo, interazioni pianta-pianta in ambienti alpini e mediterranei. Altri interessi di ricerca importanti sono nella decomposizione della lettiera vegetale e gli effetti sulle dinamiche delle popolazioni vegetali, cicli di materia organica ed azoto. Nello studio degli agroecosistemi ha un forte interesse nel contesto della qualità del suolo, stanchezza dei suoli in coltivazioni intensive, soppressione delle fitopatologie con metodiche environmental-friendly e tramite l'uso di microbi benefici ed ammendanti organici come compost e biochar. Autore e co autore di più di 150 articoli scientifici su riviste "peer-reviewed" internazionali.

**Riccardo Motti**

Professore Associato di Botanica Sistemica presso il Dipartimento di Agraria dell'Università degli studi di Napoli Federico II. È stato direttore dell'orto botanico del dipartimento e i suoi interessi di ricerca si sviluppano sullo studio della commestibilità ed usi medici delle piante in contesto di etnobotanica, ha inoltre un interesse nello studio delle piante bio-deteriogene nelle comunità vegetali dei siti archeologici e di interesse storico. Autore di differenti studi sulle dinamiche di popolazioni di piante aliene nel contesto geografico della regione Campania, ha un curriculum scientifico che include più di 40 lavori in riviste scientifiche internazionali "Peer-reviewed" ed ha un'intensa attività di divulgatore scientifico nel contesto della botanica.

**Stefano Mazzoleni**

Professore Ordinario di Botanica Applicata presso il Dipartimento di Agraria dell'Università degli studi di Napoli Federico II. Dottorato di ricerca presso l'Università di Aberdeen. Studioso di modelli dinamici dei sistemi con applicazioni in svariati campi di interesse ambientale, ma anche industriale. Autore e coautore di più di 160 articoli scientifici in riviste "peer reviewed" internazionali, ha sviluppato esperienza nel contesto dello studio della tossicità della materia organica. Direttore del centro "Musa" musei delle scienze agrarie della stessa università. Coordinatore di diversi progetti scientifici sia nazionali che internazionali che avevano come maggiore interesse lo studio e l'applicazione di modellistica dei sistemi biologici e dinamiche ecologiche. Dal 2017 è membro della Commissione nazionale per la previsione e la prevenzione dei grandi rischi della Presidenza del Consiglio dei Ministri della Repubblica Italiana.

*Allegato 2 – Report Sensoristica IoT*

MONITORAGGIO SERRE ESC-FLYSENSE-V1.00.pdf