



**DIPARTIMENTO DI SCIENZE AGRARIE E FORESTALI  
(DAFNE)**

**Corso di Dottorato di Ricerca in  
Scienze e tecnologie per la gestione forestale ed ambientale –XXVIII Ciclo**

***Tecnologie innovative di pre-coltivazione di specie forestali  
basate su fonti luminose LED  
(s.s.d. AGR/05)***

**Tesi di dottorato di:**

Dott. ssa Tatiana Marras

**Coordinatore del corso**

Prof. Bartolomeo Schirone

**Tutore**

Prof. Bartolomeo Schirone

**27 Giugno 2016**

Ad Andrea...

"All that is wrong in my world

You can make right"

(Prince - Forever in my life, 1987)

# INDICE

|                                                                       |           |
|-----------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1. Introduzione</b>                                                | <b>1</b>  |
| <b>1.1. La vivaistica forestale</b>                                   | <b>1</b>  |
| <b>1.1.1. Nascita e storia della vivaistica forestale</b>             | <b>1</b>  |
| <b>1.1.1.1. USA</b>                                                   | <b>4</b>  |
| <b>1.1.1.2. Asia e Africa</b>                                         | <b>5</b>  |
| <b>1.1.2. Tipologie di vivaio e tecniche vivaistiche</b>              | <b>6</b>  |
| <b>1.1.3. I vivai di avanguardia</b>                                  | <b>16</b> |
| <b>1.1.3.1. Fonti luminose artificiali</b>                            | <b>25</b> |
| <b>1.1.3.1.1. Coltivazioni in ambiente controllato sotto luci LED</b> | <b>29</b> |
| <b>1.1.3.2. Prototipi di coltivazione indoor di specie forestali</b>  | <b>30</b> |
| <b>1.2. Habitat della zona temperata</b>                              | <b>36</b> |
| <b>1.3. Cenni di fotobiologia</b>                                     | <b>38</b> |
| <b>1.3.1. Definizione di luce</b>                                     | <b>38</b> |
| <b>1.3.2. Grandezze caratteristiche delle onde elettromagnetiche</b>  | <b>39</b> |
| <b>1.3.3. Lo spettro solare</b>                                       | <b>41</b> |
| <b>1.3.3.1. Lo spettro visibile</b>                                   | <b>43</b> |
| <b>1.3.4. Il senso della vista nelle piante</b>                       | <b>45</b> |
| <b>1.3.4.1. Fotorecettori principali</b>                              | <b>46</b> |
| <b>2. Materiali e metodi</b>                                          | <b>51</b> |
| <b>2.1. Il progetto Zephyr</b>                                        | <b>51</b> |
| <b>2.1.1. Finalità del progetto</b>                                   | <b>51</b> |
| <b>2.1.2. Organizzazione del progetto</b>                             | <b>56</b> |
| <b>2.1.3. Descrizione delle singole componenti</b>                    | <b>59</b> |
| <b>2.1.3.1. Container</b>                                             | <b>59</b> |
| <b>2.1.3.2. Pannelli fotovoltaici</b>                                 | <b>60</b> |
| <b>2.1.3.3. Sistema di condizionamento dell'aria</b>                  | <b>60</b> |
| <b>2.1.3.4. Tamburo rotante</b>                                       | <b>61</b> |
| <b>2.1.3.5. Sistema di irrigazione</b>                                | <b>62</b> |
| <b>2.1.3.6. Braccio robotico</b>                                      | <b>63</b> |
| <b>2.1.3.7. Sensori sottosuolo</b>                                    | <b>64</b> |
| <b>2.1.3.8. Sensori ottici</b>                                        | <b>65</b> |
| <b>2.1.4. Specie considerate</b>                                      | <b>68</b> |

|                                                                                                                                |            |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>2.1.5. Attività svolte presso l'UNITUS</b>                                                                                  | <b>69</b>  |
| <b>2.1.5.1. Definizione di protocolli di coltivazione indoor</b>                                                               | <b>69</b>  |
| <b>2.1.5.1.1. Selezione delle fonti luminose</b>                                                                               | <b>69</b>  |
| <b>2.1.5.1.1.1. Proprietà degli spettri selezionati</b>                                                                        | <b>71</b>  |
| <b>2.1.5.1.2. Selezione del substrato</b>                                                                                      | <b>72</b>  |
| <b>2.1.5.1.2.1. Il substrato Jiffy Preforma</b>                                                                                | <b>72</b>  |
| <b>2.1.5.1.2.2. Analisi delle proprietà idrauliche del substrato, sotto lampade LED e a fluorescenza, in assenza di piante</b> | <b>74</b>  |
| <b>2.1.5.1.2.3. Selezione del sistema di irrigazione</b>                                                                       | <b>75</b>  |
| <b>2.1.5.1.2.4. Definizione del tempo minimo di immersione dei vassoi in acqua</b>                                             | <b>76</b>  |
| <b>2.1.5.1.2.5. Valutazione di substrati alternativi</b>                                                                       | <b>76</b>  |
| <b>2.1.5.1.3. Selezione del contenitore</b>                                                                                    | <b>77</b>  |
| <b>2.1.5.2. Specie oggetto di studio durante il dottorato</b>                                                                  | <b>78</b>  |
| <b>2.1.5.2.1. Approvvigionamento dei semi</b>                                                                                  | <b>95</b>  |
| <b>2.1.5.2.2. Test di vitalità</b>                                                                                             | <b>96</b>  |
| <b>2.1.5.2.3. Pretrattamenti di rottura della dormienza</b>                                                                    | <b>96</b>  |
| <b>2.1.5.2.3.1. Analisi bibliografica</b>                                                                                      | <b>96</b>  |
| <b>2.1.5.2.3.2. Pretrattamenti di rottura effettuati</b>                                                                       | <b>101</b> |
| <b>2.1.5.2.3.3. Allestimento delle vernalizzazioni</b>                                                                         | <b>103</b> |
| <b>2.1.5.2.3.4. Preparazione della soluzione di GA3</b>                                                                        | <b>104</b> |
| <b>2.1.5.3. Impostazione dei nuovi protocolli di coltivazione indoor</b>                                                       | <b>104</b> |
| <b>2.1.5.3.1. Analisi dei semenzali</b>                                                                                        | <b>105</b> |
| <b>2.1.5.3.1.1. Metodi di analisi</b>                                                                                          | <b>107</b> |
| <b>2.1.5.4. Trasferimento in serra</b>                                                                                         | <b>108</b> |
| <b>2.1.5.4.1. Analisi dei semenzali</b>                                                                                        | <b>109</b> |
| <b>2.1.5.5. Impianto in campo aperto</b>                                                                                       | <b>109</b> |
| <b>2.1.5.6. Studi quali-quantitativi della luce in foreste naturali</b>                                                        | <b>110</b> |
| <b>2.1.5.6.1. Il plataneto della valle dell'Anapo</b>                                                                          | <b>111</b> |
| <b>2.1.5.6.1.1. Analisi della luce</b>                                                                                         | <b>112</b> |
| <b>2.1.5.6.2. La sughereta di Tuscania</b>                                                                                     | <b>112</b> |
| <b>2.1.5.6.2.1. Analisi della luce</b>                                                                                         | <b>114</b> |
| <b>2.1.5.6.2.2. Analisi dei semenzali</b>                                                                                      | <b>115</b> |

|                                                                                                                                       |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.1.5.6.2.2.1. Percentuale di germinazione ed emergenza                                                                               | 115 |
| 2.1.5.6.2.2.2. Misure dei semenzali                                                                                                   | 116 |
| 2.1.5.6.2.3. Analisi della fenologia dei semenzali di sughera                                                                         | 117 |
| 2.1.5.6.2.4. Confronto morfometrico tra semenzali<br>cresciuti in bosco, serra e camera di crescita                                   | 119 |
| 2.2. Analisi statistica dei dati                                                                                                      | 119 |
| 3. Risultati                                                                                                                          | 120 |
| 3.1. Attività svolte presso l'UNITUS                                                                                                  | 120 |
| 3.1.1. Substrato Jiffy: analisi delle proprietà idrauliche del substrato,<br>sotto lampade LED e a fluorescenza, in assenza di piante | 120 |
| 3.1.2. Irrigazione: definizione del tempo minimo di immersione dei<br>vassei in acqua                                                 | 122 |
| 3.1.3. Valutazione di substrati alternativi                                                                                           | 123 |
| 3.1.4. Specie oggetto di studio durante il dottorato                                                                                  | 124 |
| 3.1.4.1. Test di vitalità                                                                                                             | 124 |
| 3.1.4.2. Percentuali di germinazione in seguito a pretrattamenti                                                                      | 126 |
| 3.1.4.3. Coltivazione indoor: analisi dei semenzali                                                                                   | 131 |
| 3.1.4.4. Trasferimento in serra: analisi dei semenzali                                                                                | 155 |
| 3.1.4.5. Impianto in campo aperto                                                                                                     | 167 |
| 3.1.5. Studi quali-quantitativi della luce in foreste naturali                                                                        | 172 |
| 3.1.5.1. Il plataneto della Valle dell'Anapo                                                                                          | 172 |
| 3.1.5.1.1. Analisi della luce                                                                                                         | 172 |
| 3.1.5.2. La sughereta di Tuscania                                                                                                     | 178 |
| 3.1.5.2.1. Analisi della luce                                                                                                         | 178 |
| 3.1.5.2.2. Analisi dei semenzali                                                                                                      | 184 |
| 3.1.5.2.3. Analisi della fenologia dei semenzali di sughera                                                                           | 187 |
| 3.1.5.2.4. Confronto morfometrico tra semenzali cresciuti in<br>bosco e camera di crescita                                            | 191 |
| 4. Discussione                                                                                                                        | 195 |
| 5. Conclusioni                                                                                                                        | 226 |
| 6. Bibliografia                                                                                                                       | 230 |

## 1. Introduzione

### 1.1. La vivaistica forestale



**Figura 1. Panoramica dall'alto di un vivaio forestale**

La definizione classica di vivaistica forestale (Fig. 1) è quella che la identifica come settore che *si occupa dei problemi attinenti alla produzione delle sementi e delle piantine destinate al rimboschimento* (Magini, 1977).

Nel corso dei decenni tale definizione è stata recepita e ampliata, come dimostra la Legge Regionale 4/2009 art.5 del Piemonte, nella quale compare la seguente definizione:

*“per vivaistica forestale si intende la raccolta a scopo di produzione vivaistica, la produzione, la cessione a qualsiasi titolo e la commercializzazione di materiale di moltiplicazione o di propagazione forestale destinato al rimboschimento, all'imboschimento, all'arboricoltura da legno, alla rinaturalizzazione e alla sistemazione del territorio.”*

Altro esempio è la definizione che ne dà la Regione Molise: *“la vivaistica forestale è una branca della vivaistica che ha come scopo principale quello di produrre piante che per caratteristiche genetiche, morfologiche, fisiologiche e sanitarie siano in grado di offrire le maggiori garanzie d'adattabilità e quindi d'attecchimento e di successo dell'impianto di nuovi soprassuoli forestali”*.

#### 1.1.1. Nascita e storia della vivaistica forestale

La coltivazione di alberi, a partire da seme o talea, affonda le sue radici in epoche bibliche, ma la costituzione del primo vivaio forestale viene datata attorno al 1460. In tale periodo storico, William Blair, cellario dell'Abbazia di Coupar Angus in Scozia, iniziò a coltivare alberi da piantare nella foresta di Ferter. Dopo la dissoluzione dei monasteri, molti proprietari terrieri arricchitisi in Scozia e Inghilterra, iniziarono a ritenere vantaggioso un investimento a lungo termine in piantagioni artificiali su terreni impoveriti. John Evelyn, un cortigiano sotto il Regno

di Carlo II, pubblicò addirittura un testo intitolato *Sylva* (1664), in cui esortava i britannici a creare nuove piantagioni.

L'Inghilterra è da considerarsi inoltre la patria natia degli orti botanici o giardini dei semplici, luoghi in cui venivano coltivate le piante officinali alla base dell'insegnamento dell'arte curativa nelle scuole di medicina, nonché delle prime serre temperate, introdotte a partire dal 1600, per sopperire alla necessità di coltivare in Europa specie di importazione transoceanica dal Nuovo Continente. Soltanto con la costruzione di serre fu difatti possibile consentire la sopravvivenza in cattività, lo studio e la riproduzione di tali specie, precedentemente ignote. Nel 1800, grazie all'avanzamento tecnologico, l'Inghilterra si dotava di imponenti serre in ghisa e ferro.

Con l'avvento nel XIX secolo del Romanticismo, movimento associato alla esaltazione del sentimento e della fantasia e alla rivalutazione del rapporto uomo-natura, il concetto di giardino fu rivisitato in tutto il continente. Si passò dai giardini all'italiana, basati su schemi classici, ai giardini all'inglese, ispirati dai giardini orientali in cui veniva esaltata la libertà della vegetazione. Si diede il via dunque alla creazione di viali di alberi ombrosi, ruscelli e laghetti suggestivi, prati e colline artificiali.

L'espansione dei vivai forestali nel resto d'Europa è da considerarsi un evento piuttosto recente, databile tra il XVIII e il XIX secolo (Rajkovic *et al.*, 2013; Andersson, 2005)

Prima di allora non si era difatti sviluppata una presa di coscienza tale da ritenere la coltivazione delle specie forestali una priorità per la salvaguardia delle foreste, ampiamente sfruttate per la produzione di legname. Piuttosto erano i boschi stessi a rappresentare siti di coltivazione per differenti specie agrarie (*landwirtschaftlichen Nährwald*, ovvero boschi coltivati a scopi agricoli per produrre nutrimento).

Le nazioni che videro per prime lo sviluppo di vivai forestali furono Germania, culla delle scienze forestali, Francia, Olanda e Italia.

I primi vivai forestali in Italia furono impiantati nel 1873, su iniziativa di Adolfo di Bèrenger, direttore dell'Istituto forestale di Vallombrosa (Fig. 2). Si trattava essenzialmente di due orti, uno con sede a Vallombrosa l'altro a Paterno, due località nei pressi di Firenze, con una superficie complessiva di poco più di 2 ettari, in grado di produrre inizialmente qualche centinaio di migliaia di piantine, sia autoctone che esotiche.



**Figura 2. Cartolina storica del convento di Vallombrosa con piantagione arborea in primo piano**

L'elemento positivo di tali installazioni fu l'effetto sensibilizzante nei confronti dei selvicoltori, abituati ormai agli insuccessi dei rimboschimenti basati sull'utilizzo di selvaggioni nati da rinnovazione naturale (in particolare per pino, abete e faggio). I vivai forestali si mostrarono necessari per effettuare con successo rimboschimenti su larga scala e tale presa di coscienza portò alla loro espansione. La quasi totalità di piantine a scopo di rimboschimento è stata prodotta nel corso dei decenni soprattutto dal Corpo forestale dello Stato, in quanto il numero di vivai forestali privati risultava essere assai esiguo. Difatti, la produzione vivaistica italiana è sempre stata maggiormente orientata alla produzione di specie ornamentali e la scarsità di postime forestale è stata anche causa di un errore compiuto in passato dal Corpo forestale, ovvero l'utilizzo, a scopo di rimboschimento, oltre alle piantine prodotte nei propri vivai, anche di materiale proveniente dagli attrezzati vivai industriali della Foresta Nera (Hannover e Amburgo) così come dalla Francia o da Paesi est europei. Tale pratica, oggi vietata dalla legislazione sul materiale di propagazione, determinò danni di carattere ecologico ma anche sociale, limitando la spinta alla creazione di vivai sul territorio nazionale.

I primi vivai forestali si presentavano generalmente sotto forma di terrazze sostenute da muri, ciglioni, erbate, scarpate, spesso lungo pendii montani oppure come piccoli pianori suddivisi in riquadri da un intreccio di stradine di servizio. Nei primi decenni del XX secolo infatti, la montagna era ancora popolata e le problematiche di trasporto legate alla precaria viabilità non consentivano il posizionamento di vivai a grandi distanze dai siti da rimboschire.

Un rallentamento della produzione italiana, che caratterizzò la vivaistica in tutto il mondo, fu causato dalla II Guerra mondiale.

Nel decennio successivo, l'espansione dei vivai forestali italiani raggiunse il suo apice, toccando i 642 ettari con una produzione di 100 milioni di piantine. Le regioni con il maggior numero nonché la maggiore estensione di vivai forestali in tale periodo risultavano essere Toscana e Veneto, disponendo di circa 35 vivai ciascuna su un'area di 70-80 ettari (Voce, 1961).

In contemporanea, i vivai forestali europei, in particolare nella parte occidentale del continente, ricominciarono a prendere contatto tra di loro come già accaduto prima della guerra, per affrontare congiuntamente la problematica dell'approvvigionamento dei semi e delle barriere commerciali. Grazie al Trattato di Roma tali barriere furono ridotte ma le nuove leggi europee iniziarono ad influenzare l'attività vivaistica. Vivaisti provenienti da Germania, Francia, Olanda, Italia e Belgio iniziarono a riunirsi annualmente in maniera informale per poi giungere alla costituzione ufficiale di una Commissione che avesse il compito di rappresentare il punto di vista delle aziende private di fronte alla Commissione Europea. La Commissione dei vivai forestali europei (ENFA) fu costituita formalmente a Colonia nel 1962 con D. Robert Rahte come Presidente e M. Streitberger come segretario.

Nel corso dei successivi anni '70 si verificò in Italia una diminuzione degli interventi di rimboschimento per motivi principalmente politici legati a conflitti di competenza tra Stato, Regioni e nuovi Enti impegnati nelle problematiche selvicolturali. Di conseguenza, anche il numero dei vivai forestali iniziò a diminuire e i pochi residui videro diminuire sensibilmente la produzione, fatta eccezione per alcuni vivai che vennero invece migliorati e meccanizzati.

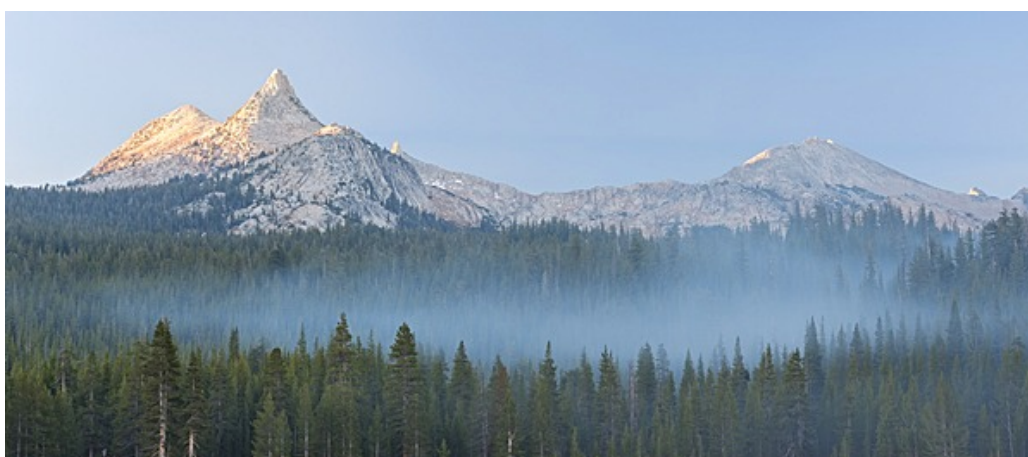
Il maggior problema, sia a livello italiano sia europeo, nella gestione dei vivai forestali, fu rappresentato dalla carenza di manodopera. Ciò condusse ad una necessaria diminuzione delle superfici dei vivai, con maggiore concentrazione delle colture. La motorizzazione, soprattutto nei trasporti, favorì l'evoluzione del vivaio da azienda legata ad una economia locale e chiusa ad una di stampo più industriale.

#### **1.1.1.1. USA**

La storia della vivaistica forestale negli USA ha seguito lo stesso percorso di quella europea. Nel 1905, con forte incoraggiamento da parte del Presidente Theodore Roosevelt, venne creato il Servizio forestale degli Stati Uniti (Forest Service) che con il Weeks Act del 1911 e il successivo Clark-McNary Act del 1924, fu autorizzato ad assistere gli Stati federali nella protezione delle foreste dal fuoco e nella creazione di piantagioni.

Durante la grande depressione degli anni '30, si diede il via ad un piano di rimboschimento coordinato dal *Civilian conservacion crop* (CCC), corpo dell'U.S. Forest Service. La crescente

domanda di piantine per i rimboschimenti condusse allo sviluppo di vivai sotto forma di singole aziende autonome. Elemento innovativo dei vivai statunitensi fu la creazione di magazzini condizionati per la conservazione delle piantine, il che consentì di sviluppare vivai anche in zone lontane dai siti di rimboschimento, a quote dunque inferiori, che si dimostrarono anche vantaggiose in termini di qualità del materiale propagato grazie al periodo di vegetazione più lungo rispetto alle quote superiori della medesima fascia climatica. Il CCC continuò a gestire tale fase di espansione della vivaistica fino al 1942. La mobilitazione totale di risorse da parte degli USA per la prima e seconda guerra mondiale e la caduta dei consumi, ridusse le richieste di materiale forestale. Tale fase di crisi venne superata, come precedentemente descritto per l'Europa, negli anni '50, quando la richiesta di prodotti forestali tornò a salire. A partire dagli anni '70 la produzione di alberi non fu più finalizzata essenzialmente all'approvvigionamento di legname ma ad opere di intensa riforestazione, per ripristinare ben 1.3 milioni di ettari di foreste distrutte dallo sfruttamento non sostenibile (Burch, 2005).



**Figura 3. Foreste di conifere nello Yosemite National Park (USA)**

Va sottolineato che la produzione di specie forestali sia in Europa sia in America, fu incentrata inizialmente sulle conifere (Fig. 3) e che, nei primi decenni del '900, i semenzali prodotti in America avevano costi più elevati di quelli europei, tale che la gran parte delle foreste americane fu rimboschita con postime proveniente da Germania, Francia e Olanda, in particolare per quanto concerne la specie *Pinus strobus* (Benedict, 1981).

#### **1.1.1.2. Asia e Africa**

Per quanto concerne lo sviluppo della vivaistica forestale nella regione asiatica ed africana, è bene citare il caso di Israele e del Maghreb che, negli anni '40, congiuntamente con Italia, Spagna e Grecia, iniziarono a recuperare una vasta superficie di terreni sfruttati a scopo agricolo, ricostituendo le foreste originarie per limitare il rischio di dissesto idrogeologico.



**Figura 4. Operai all'opera in un vivaio forestale cinese**

In Cina, dove un tempo le foreste occupavano il 30% della superficie del Paese, secoli di sfruttamento agricolo e pastorale nonché frequenti incendi hanno portato ad una loro riduzione fino al 7% della superficie territoriale. I programmi di riforestazione mediante installazione di piantagioni sono stati condotti in maniera intensiva a partire dagli anni '50. Basti pensare che soltanto tra 1950 e 1957 furono ripiantati circa 15.8 milioni di ettari di foreste (Fig. 4).

#### **1.1.2. Tipologie di vivaio e tecniche vivaistiche**

Con il termine *vivaio forestale* si identifica un appezzamento di terreno in cui vengano allevate piantine destinate al rimboschimento.

Esistono due principali tipologie di vivaio forestale:

- **Vivaio provvisorio (o volante)**
- **Vivaio permanente (o stabile)**

I **vivai provvisori** vengono installati allo scopo di funzionare soltanto per un numero limitato di anni, al fine di fornire materiale necessario ad un certo rimboschimento. Vengono impiantati entro il perimetro destinato al rimboschimento o nelle immediate vicinanze. Principali vantaggi risultano essere quello di evitare alterazioni dell'attività vegetativa della specie causate da differenze climatiche presenti tra luogo di allevamento e luogo d'impiego nonché la possibilità di ridurre al minimo i danni da trasporto del materiale dal vivaio al sito di rimboschimento. Principale svantaggio, che nel corso dei decenni ne ha fortemente limitato l'utilizzo, è invece rappresentato dai costi elevati di gestione. Inoltre è da sottolineare che i vantaggi sopradescritti hanno perso valore con l'introduzione di celle refrigerate, che consentono la conservazione del postime in condizioni di quiescenza evitando o riducendo lo stress da acclimatazione e grazie a

miglioramenti apportati nella preparazione dei colli che minimizzano il rischio di danni durante il trasporto.

I **vivai permanenti** restano invece operativi per un numero indefinito di anni, producendo materiale destinato a località anche molto distanti dal sito di allevamento.

Qualora il rimboschimento si basi su piantagione, si fa ricorso ai seguenti materiali: **selvaggioni**, **talee** o **postime di vivaio**.

Per **selvaggioni** si intendono piantine nate spontaneamente in bosco. Tale materiale è stato largamente utilizzato nel passato, soprattutto fino al XIX secolo, in caso di specie poco fittonanti o totalmente non fittonanti (es. *Abies alba*, *Fagus sylvatica*, *Picea abies*). Si tratta infatti di una tecnica sconsigliabile in caso di specie fittonanti. Nello specifico, per assicurarsi risultati migliori, venivano prelevati semenzali robusti e giovani, preferibilmente lungo i margini piuttosto che all'interno dei boschi, di dimensioni pari a circa 20-40 cm in altezza. Lo shock da trapianto in fase di messa a dimora era generalmente evitato mantenendo i semenzali in vivaio per un anno. Tale fase di acclimatazione risultava favorire in particolare lo sviluppo di un articolato apparato radicale. I selvaggioni venivano a volte preferiti all'allevamento in vivaio di piantine da seme qualora vi fossero difficoltà di reperimento del seme (ad esempio legata a lunghi intervalli tra fruttificazioni abbondanti o a difficoltà di conservazione).

La **talea** (o astone, in caso di notevoli dimensioni) rappresenta parte di una pianta, generalmente un ramo provvisto di almeno una gemma, in grado di emettere radici e generare un nuovo individuo. Si tratta dunque di una forma di moltiplicazione vegetativa, più frequente in ambito ortofrutticolo che forestale. Nei vivai forestali esse vengono utilizzate in situazioni particolari, per un numero limitato di specie caratterizzate da facile radicazione, eccezionale nel caso di conifere (es. *Cryptomeria japonica* e *Picea abies*) e più frequente per le specie latifoglie (es. pioppo nero e bianco, salici, platani, con l'eccezione del *Platanus orientalis*, maggiociondolo, pittosporo, mioporo, *Lagunaria patersoni*, eleagno). La lunghezza delle talee deve necessariamente essere di almeno 20-30 cm con presenza di alcune gemme ben formate. Si consiglia generalmente di prelevarle da rami di piante madri tra 1 e 3 anni, possibilmente nel periodo di riposo (per specie decidue) o di scarsa attività (per specie sempreverdi). La talea radicata prende il nome di barbatella (o piantone, qualora essa presenti dimensioni ragguardevoli) e la porzione di vivaio in cui esse vengono poste a radicare è detto dunque barbatellaio. L'utilizzo di talee rappresenta una forma di allevamento speciale in quanto, soprattutto nel caso di specie con radicazione difficile delle talee, si rende necessario o l'utilizzo

del *mist* o l'applicazione di un riscaldamento basale (il mezzo in cui le talee sono poste a radicare viene mantenuto ad una temperatura di circa 20°C, Hartmann *et al.*, 2002) o di fitoregolatori quali l'acido indolbutirrico, naftalacetico, indolacetico. Insieme agli ormoni risulta spesso necessario applicare fungicidi a causa dei frequenti attacchi parassitari.

Per **postime di vivaio** si intendono le piantine prodotte nei vivai forestali, a partire da seme. La provenienza del seme è un parametro essenziale. Risulta difatti prioritario comparare le caratteristiche ambientali della zona d'origine con quelle della stazione da imboschire. La disponibilità sul mercato di sementi a basso costo, di provenienza sconosciuta e spesso riferibile anche a Paesi extracomunitari, rappresenta un pericolo crescente in quanto l'introduzione incontrollata di simile materiale di propagazione può essere alla base di insuccessi nelle opere di rimboschimento. Il rischio aggiuntivo è quello di un mescolamento genetico derivante dagli inevitabili incroci naturali fra ecotipi locali ed altre entità subspecifiche estranee all'ambiente. Nell'ambito della stessa specie è possibile difatti distinguere numerose razze geografiche, che è fondamentale riconoscere in ambito selvicolturale, in quanto dotate di differenze in termini di caratteristiche fisiologiche (resistenza al freddo, alla siccità, a particolari parassiti, ritmi fenologici e adattamenti al fotoperiodo). Le diverse razze sono conseguenza di una lunga selezione naturale che ha portato le popolazioni geografiche a sviluppare caratteristiche idonee al proprio habitat. Pertanto nell'ambito dei rimboschimenti è bene selezionare la provenienza idonea del seme. Dal momento che esiste una forte variabilità genetica anche tra individui della stessa popolazione, ovvero variazioni individuali tra albero e albero trasmissibili alla progenie, è bene selezionare in maniera ottimale anche le piante portasemi oltre a considerare la provenienza geografica. Le caratteristiche colturali dei semi derivano invece dalla percentuale di purezza, dalla loro capacità germinativa e abilità nel produrre piantine vigorose. La problematica della provvista di seme ha richiamato per anni l'attenzione di molti studiosi, conducendo in vari Paesi all'emanazione di appositi atti legislativi che regolano la raccolta e il commercio di semi forestali così come l'istituzione di speciali organi per il riscontro delle sementi di produzione interna o di importazione. I primi Paesi ad emanare simili provvedimenti furono Svezia, Austria, Ungheria e Olanda. In Italia il problema era già noto nel XIX secolo ma un vero e proprio atto legislativo disciplinante la produzione e il commercio del materiale forestale di moltiplicazione, è stato emanato soltanto nel 1973 (Legge 22 maggio 1973 n. 269, ispirata a due direttive CEE rispettivamente del 1966 e 1971).

La produzione del postime avviene in due zone in cui viene ripartito il vivaio: il semenzaio, ovvero le aiuole destinate alla semina e all'allevamento dei semenzali e il piantonaio, adibito alla coltivazione dei semenzali trapiantati (Fig. 5).



**Figura 5. Zona del semenzaio (sinistra) e piantonaio (destra) di un vivaio forestale**

Prima della semina, a seconda della specie trattata, il seme può necessitare di trattamenti di rottura della dormienza, atti a stimolarne la germinazione e trattamenti chimici per proteggerli da animali mangiasemi e attacchi parassitari.

La semina in semenzaio avviene generalmente in autunno per semi a maturazione autunnale e di difficile conservazione (come quelli di querce, castagno, abete bianco ed aceri). La semina autunnale è indispensabile per semi a dormienza profonda qualora non siano previsti pretrattamenti artificiali (stratificazione a freddo), come nel caso del faggio, frassino, tiglio, carpino o pino cembro. Invece la semina in primavera-estate è caratteristica dei semi di pioppo, salice o olmo, da effettuarsi subito dopo la raccolta, a causa di difficoltà di conservazione. Se il seme non mostra problemi di conservazione né dormienza profonda, la semina primaverile viene preferita a quella autunnale. In aree laddove gli inverni siano miti e le estati molto calde, al posto della semina primaverile viene adottata una semina di fine estate o inizio autunno, così da avere in primavera piantine già notevolmente sviluppate.

Soprattutto nelle zone più aride, allo scopo di mantenere la superficie del terreno umida durante tutto il periodo germinativo, le semine vengono coperte con materiali diversi (lettiere, frasche, paglia, segatura, teli, stuoie, reti di plastica). Tali protezioni vanno tolte non appena inizi la fase di levata dei semenzali.

I semenzali ben sviluppati (mai più di due anni) vengono dunque trasferiti nella zona del piantonaio. Tale fase di trapianto ha lo scopo di fornire maggiore spazio alle singole piantine per svilupparsi sia a livello di chioma che di radice. Il trapianto si esegue generalmente in autunno e primavera. Per la maggior parte delle specie si sceglie il momento compreso tra la cessazione dell'accrescimento epigeo con concomitante sviluppo delle gemme ibernanti e la riapertura primaverile di queste ultime. Durante questo periodo infatti è possibile estrarre e trapiantare le piantine senza causare stress eccessivi. Poiché spesso il numero di trapianti da effettuare risulta notevole e il tempo a disposizione breve, il momento di estrazione e quello di trapianto non coincidono, le piante estratte vengono generalmente conservate al sicuro (in tagliola o cella refrigerata) finché non si verifichino condizioni favorevoli al posizionamento in piantonaio. Le piante restano in piantonaio circa 2 anni, anche 3 anni nel caso di specie ad accrescimento molto lento (es. abete bianco).

Il tipo di vivaio prima sommariamente descritto è quello organizzato per la produzione di piantine a radice nuda. In realtà, vi sono due principali sistemi d'allevamento (Fig. 6):

- **a radice nuda**
- **in contenitore**



**Figura 6. Piantine a radice nuda (sinistra) e in contenitore (destra)**

Il terreno per l'allevamento di piante **a radice nuda** deve essere profondo, fresco, senza pietre, di facile drenaggio, di medio impasto e ricco di sostanza organica, per ottenere piante con apparato radicale più espanso, meglio conformato e con buona dotazione di radici secondarie. Il pH del terreno deve essere vicino alla neutralità così da consentire la produzione sia di conifere, generalmente acidofile, che latifoglie. In passato si riteneva che il terreno destinato al vivaio forestale dovesse essere poco fertile al fine di conferire alle piante

maggiori capacità d'adattamento alle differenti e più severe caratteristiche pedologiche delle stazioni d'impianto. Questa convinzione si è poi dimostrata infondata nella realtà operativa, avendo ormai appurato che le maggiori possibilità di successo delle piantagioni sono assicurate dall'impiego di postime robusto e vigoroso. Questo è ottenibile soltanto in un substrato fertile e chimicamente bilanciato. Il metodo di coltivazione a radice nuda consente notevoli risparmi sia sui costi unitari di produzione in vivaio, sia sulla movimentazione ed il trasporto delle piantine.

L'allevamento **in contenitore** è una tecnica vivaistica in forte espansione in tutto il mondo. La semina può avvenire direttamente nel contenitore o essere effettuata prima in aiuola o cassone, seguita poi da trapianto dei semenzali in contenitore. Il primo metodo è da prediligere fatta eccezione per specie dai semi molto piccoli, con scarsa germinabilità, alto grado di impurità o alta percentuale di semi vani. In tali casi è conveniente porre nei contenitori piantine già nate da seme. A differenza delle piante ornamentali, la cui coltivazione in contenitore risale agli albori della civilizzazione dell'uomo (viene difatti attribuita agli indiani d'America), la coltivazione in contenitore nell'ambito della vivaistica forestale risulta essere una innovazione piuttosto recente. Essa è apparsa risolutiva soprattutto in ambienti aridi, laddove effettuare una piantagione con materiale allevato a radice nuda si rende particolarmente difficile a causa di un rapido disseccamento del terreno durante e dopo l'esecuzione della piantagione. Il pane di terra contenuto nel contenitore presenta difatti il vantaggio di conservare un grado di umidità elevato sia durante il trasporto sia per un breve periodo dopo l'impianto a dimora, proteggendo così le radici dal disseccamento. Inoltre, qualora il panetto non venga disfatto ma interrato tal quale, si evita il danneggiamento degli apici radicali, facilitando così l'espansione radicale della piantina qualora le condizioni idriche del suolo siano ottimali. Il pane di terra può anche essere utilizzato quale veicolo di funghi micorrizici della località d'impianto, inoculandolo preventivamente con i ceppi idonei (Goor e Barney, 1968). Ne consegue che le piantine allevate con pane di terra mostrino generalmente sopravvivenza e attecchimento più elevati rispetto alle piante a radice nuda, perlomeno in ambienti aridi. Al di là delle zone aride, tale tecnica si è espansa nei paesi del Nord Europa dunque in Paesi a clima freddo, grazie alla possibilità di prolungare il periodo utile alla piantagione. In Italia l'allevamento con pane di terra è stato introdotto per rimboschimenti in ambiente mediterraneo basati su specie fittonanti, in quelle stazioni meno adatte alla semina diretta. Nel corso del tempo tale pratica si è estesa anche nelle zone montane.

La possibilità di meccanizzare il ciclo di produzione rende tale tecnica favorevole anche dal punto di vista economico (fenomeno evidente nei Paesi del Nord Europa).

Il primo utilizzo su vasta scala di contenitori per la produzione di semenzali risale agli anni '30 del XX secolo. Inizialmente furono utilizzati segmenti di canna, barattoli di metallo, cassetture di legno Bitterlich o vasi di terracotta, seguiti poi negli anni '50 dai sacchetti di plastica (anche detti fitocelle o fitosacchi), disponibili in varie tipologie differenti tra loro per qualità, resistenza della plastica e dimensioni (Fig. 7).



**Figura 7. Esempi di contenitore: fitocella (sinistra) e paperpot (destra)**

Nel corso degli anni '60 e '70, tra USA e Canada vi fu un proliferare di nuove tipologie di contenitore, alcune delle quali sono ancora popolari oggi. Nel contempo anche in Giappone venivano introdotti contenitori innovativi, cosiddetti *japanese paperpot*, utilizzati in particolare dai Paesi Scandinavi e successivamente esportati in America. I contenitori attualmente più popolari sono fatti in plastica dura. Esistono sia contenitori singoli sia aggregati. In quest'ultimo caso ogni contenitore viene definito alloggiamento (*cell*) mentre l'insieme degli alloggiamenti prende il nome di vassoio (*tray*, *block* o *rack*) (Fig. 8).



**Figura 8. Contenitore ad alloggiamento singolo (*cell*, sinistra) e multiplo (*tray*, destra)**

Il limite maggiore dei primi contenitori fu rappresentato dalla presenza di un fondo non forato, causa di una frequente deformazione dell'apparato radicale indotta dalla struttura del contenitore stesso. Il fittone tende difatti ad attorcigliarsi su se stesso una volta raggiunto il fondo, formando una spirale complessa. Tale deformazione risulta essere permanente determinando spesso una scarsa stabilità delle piante dopo vari anni dalla piantagione. I contenitori moderni sono al contrario tutti provvisti di fondo forato per consentire un ottimale drenaggio dell'acqua ed incoraggiare l'*air pruning*, ovvero il fenomeno mediante cui le radici interrompono la loro crescita qualora incontrino uno strato d'aria. In alcuni casi i contenitori, oltre che di un foro sul fondo, sono anche dotati di nervature interne che fanno da guida allo sviluppo delle radici, evitandone la spiralizzazione.

Nonostante l'elevato numero di contenitori introdotti nel corso dei decenni, non è ancora possibile affermare che sia stato mai prodotto il contenitore perfetto e la ricerca di un contenitore ottimale è ancora una delle preoccupazioni primarie dei vivai forestali moderni. C'è da dire che non è possibile ipotizzare la creazione di un unico contenitore ideale per tutti i vivai del mondo, sulla base di differenti tecniche di propagazione, necessità diverse da specie a specie e caratteristiche dei siti d'impianto. La definizione più esplicativa di contenitore ottimale per la vivaistica forestale può essere considerata quella espressa da Landis *et al.* (1990): "*A nursery container could be anything that holds growing media, drains, allows for healthy root development, does not disintegrate before outplanting, and allows for an intact, healthy root system to be removed with a minimum of disturbance to the plant*" (un contenitore da vivaio potrebbe essere qualsiasi cosa in grado di contenere un mezzo di crescita, con un ottimale drenaggio, che comporti un corretto sviluppo dell'apparato radicale, che non si disintegri prima del trapianto in campo e che consenta ad un apparato radicale intatto e in salute di essere rimosso con il minimo stress per la pianta). A differenza infatti delle specie ornamentali, la cui qualità è legata essenzialmente allo sviluppo della porzione epigea (fiori e foglie), la qualità di un semenzale di una specie arborea destinato ad opere di rimboschimento viene valutata in base allo sviluppo del suo apparato radicale, che fin dai primi stadi di sviluppo deve mostrare elevata capacità di rigenerazione di nuove radici (fenomeno noto come RGP o *root growth potential*) e di espansione nel suolo circostante. I contenitori ottimali per la vivaistica forestale devono dunque assicurare un corretto sviluppo dell'apparato radicale e allo stesso tempo fornire ad esso protezione fino alla fase di trapianto. La vigoria del sistema radicale è in ogni caso legata anche allo sviluppo della porzione epigea. Pertanto un contenitore deve assicurare lo sviluppo di un corretto rapporto tra porzione epigea ed ipogea (*shoot/root ratio*) (Landis *et*

al., 1990). La qualità delle piante prodotte, da considerarsi sia sulla base di parametri morfometrici che fisiologici è ad oggi una necessità primaria dei vivai forestali per assicurare la sopravvivenza e l'attecchimento del postime dopo un impianto (Kostopoulou *et al.*, 2011).

I contenitori oggi disponibili sul mercato possono essere classificati in due categorie:

- **con pareti impenetrabili** dalle radici, da rimuoversi prima della piantagione, quali fitocelle e contenitori in materiali rigidi di varie forme e dimensioni;
- **con pareti penetrabili** dalle radici, ad esempio i contenitori in tessuto-non-tessuto.

La maggior parte dei vivai forestali produce un ampio ventaglio di specie, con conseguente necessità di contenitori diversi. La scelta del contenitore dipende infatti dalla morfologia radicale della specie, da criteri economici e dalla finalità per cui la piantina venga prodotta. Generalmente, specie con sistemi radicali fibrosi e superficiali, come accade per molte erbacee, crescono meglio in contenitori più bassi. Al contrario, specie con lunghi fittoni, come molte arboree, crescono meglio in contenitori più alti. Specie caratterizzate da radici grosse e carnose, crescono meglio in contenitori più ampi. Molto spesso è necessario, nel corso delle varie fasi di crescita di un semenzale, un trasferimento di contenitore. I più piccoli, caratterizzati da un numero più elevato di alloggiamenti, sono da prediligere nelle prime fasi di germinazione e levata. Successivamente è bene utilizzare contenitori più ampi. I contenitori in tal senso più utilizzati sono i cosiddetti *miniplug trays*. Questi contenitori ad alloggiamenti multipli risultano vantaggiosi per la produzione di un elevato numero di giovani semenzali da trasferirsi necessariamente in contenitori più grandi in una fase successiva di sviluppo. Risultano molto utili in caso di specie a seme piccolo, in quanto si ha la possibilità di un controllo del numero di semi (e dunque di semenzali) per cella rispetto alla semina a spaglio necessaria in contenitori più grandi. Il limite maggiore è che essi si disidratano molto in fretta dunque necessitano di una irrigazione frequente, più volte al giorno, che può essere resa più agevole installando irrigatori automatici dall'alto o un sistema per subirrigazione.

Per semi più grandi, la densità di semina di un vassoio ad alloggiamenti multipli non è detto che sia la massima consentita. Bisogna difatti valutare le dimensioni della piantina che si originerà nelle prime settimane dopo la germinazione e l'effetto di competizione luminosa che essa potrebbe sviluppare con le piantine adiacenti. Come effetto della diminuzione nella disponibilità di luce, piante che crescano ravvicinate tendono infatti a crescere

maggiormente in altezza con diametri del fusto inferiori rispetto a quelle che crescono ad una certa distanza l'una dall'altra, Le latifoglie, in particolare, necessitano di densità di semina minori per vassoio, così da avere abbastanza spazio per espandere la superficie fogliare limitando effetti negativi sulle piante circostanti.

In base alla resistenza, si possono distinguere due tipologie di contenitori: i **riciclabili** e i **non riciclabili**. Alla prima categoria appartengono contenitori in plastica dotati di filtri anti UV, che appositamente sterilizzati possono essere riutilizzati anche per decine di cicli di crescita. Alla seconda categoria appartengono i contenitori biodegradabili, come i *paperpot* o alcuni innovativi prodotti composti da fibre naturali, come i pellets della ditta olandese Jiffy®, che si presentano come panetti di torba e fibra di cocco pressate, che possono essere trapiantati in campo aperto assieme alla pianta stessa. Quest'ultima categoria ben si adatta soprattutto alla coltivazione di specie a rapido accrescimento in quanto spesso, col passare del tempo, tendono o a sfaldarsi o a ricoprirsi di muschi.

Al di là delle dimensioni, forma e materiale del contenitore, è bene selezionare attentamente il substrato di allevamento, in quanto esso influisce sulla buona qualità delle piante in coltivazione. La composizione deve infatti essere studiata caso per caso, in funzione delle necessità ecologiche della specie ma anche del contenitore. Se infatti si utilizzano contenitori che prevedano l'estrazione del pane di terra, è importante che questo abbia una struttura tale da reggere in tale fase. La torba è stato l'ingrediente più utilizzato come componente principale o unica di terricci. Si tratta infatti di un substrato di coltura ideale in virtù delle sue proprietà fisiche (leggerezza, forte porosità e capacità di ritenzione idrica) e chimiche (elevato scambio cationico). Altre caratteristiche vantaggiose sono il pH acido, la quasi totale sterilità e le capacità ammendanti nei confronti di terreni sciolti o compatti (Delran *et al.*, 1975; Hellum, 1975). Inoltre la carenza di elementi nutritivi unita al lento rilascio di azoto derivante dalla sua decomposizione evita eventuali interferenze con la fertilizzazione. Il lento rilascio di nutrienti somministrati con le concimazioni ne evita eccessive perdite per dilavamento e favorisce lo sviluppo della microflora batterica. La torba più utilizzata è quella di sfagno, detta anche torba marrone. Alla torba, secondo le possibilità di approvvigionamento e la convenienza economica, vengono generalmente aggiunte pomice, agriperlite, vermiculite, argilla espansa ed eventuali sostanze organiche compostate (Fig. 9).



**Figura 9. Esempi di substrato: torba, pomice e perlite**

### **1.1.3. I vivai d'avanguardia**

Il progresso tecnologico dei vivai ha attraversato 4 fasi:

- la *motorizzazione*, ovvero la sostituzione della trazione animale con la trazione di un motore;
- la *meccanizzazione*, che ha consentito la movimentazione meccanica di utensili e il sollevamento dell'uomo dalla specifica operazione;
- l'*automazione*, ovvero l'introduzione di componenti automatici che effettuano azioni attive e logiche di controllo, riducendo così la richiesta mentale umana;
- la *robotizzazione*, ovvero l'introduzione di robot in sostituzione o supporto del lavoro umano, che rappresenta il nuovo orizzonte che sta muovendo i primi passi (Fig. 10).



**Figura 10. Esempi di automazione e robotizzazione in un vivaio forestale**

In particolare, il settore ortoflorovivaistico ha mostrato una tendenza all'innovazione anticipata rispetto a quello forestale, che solo da pochi anni ha iniziato a caratterizzarsi per una crescente

applicazione di tecnologie innovative, dalle macchine per la potatura e spuntatura delle piante a sistemi di automazione delle varie fasi di produzione:

1. preparazione e stoccaggio del substrato: il substrato può essere composto da molteplici componenti o da un singolo componente, per esempio torba.
2. Creazione di panetti di suolo (*soil blocking system*).
3. Riempimento dei contenitori (*tray fillers*): per ottenere una crescita ottimale del sistema radicale di una pianta è necessario che il vassoio sia riempito con la corretta densità di substrato. Tali macchine sono disponibili sottoforma di unità singole modulari, assemblabili a comporre una completa linea di produzione. Nei vivai più tecnologici questi macchinari sono connessi ad ulteriori moduli per la semina o il taleaggio.
4. Semina (*seeders*): i sistemi automatizzati per la semina dei vassoi sono caratterizzati da alta precisione, consentendo di evitare di seminare più di un seme per cella e di evitare celle vuote. In virtù della variabilità delle tipologie di seme, esistono molteplici tipologie di macchinari per la semina.
5. Trapianto (*transplanters*): la fase di trapianto è tra le più delicate in una filiera di produzione vivaistica. I sistemi automatizzati di trapianto devono dunque essere ad alta precisione per evitare danneggiamenti delle piante ed esistono tipologie idonee per trapianto in vassoi multipot così come in singoli vasi. Alcuni sistemi arrivano a capacità di trapianto pari a 45.000 piante per ora.
6. Irrigazione: quando si parla di metodi irrigui (o sistemi di irrigazione) si intende la modalità con cui viene distribuita l'acqua nel terreno. La scelta di un metodo piuttosto che un altro dipende da tantissimi fattori, quali la disponibilità idrica, la morfologia e la giacitura del terreno, il clima, la fonte di approvvigionamento idrico, il tipo di coltura, il grado di meccanizzazione della coltura, etc. Si distinguono i seguenti metodi irrigui:
  - metodo per sommersione, che prevede la permanenza sul terreno per periodi più o meno lunghi di uno strato di acqua di spessore variabile;
  - metodo per scorrimento, che prevede invece un velo d'acqua costante durante tutto l'adacquamento che poi lungo il suo corso si va ad infiltrare sul terreno;

- metodo per asperzione o a pioggia, che prevede l'erogazione di acqua simulando una pioggia grazie all'uso di idonee apparecchiature. Tali apparecchiature consistono in irrigatori di media o lunga gittata e di medio-grande portata disposti con avanzamento a triangolo, a quadrato o a rettangolo a seconda del grado di sovrapposizione che si vuole ottenere. Gli irrigatori infatti possono, in base alla pressione di esercizio, provocare una irrigazione nebulizzata con effetto climatizzante più che umettante. Indubbiamente uno dei fattori limitanti per il sistema a pioggia è rappresentato dal vento che condiziona le traiettorie degli irrigatori stessi; in questi casi è sempre opportuno avvicinare gli irrigatori tra di loro e scegliere irrigatori a bassa gittata;
- metodo per microportate o a goccia, viene anche chiamato microirrigazione in quanto l'acqua viene erogata attraverso erogatori denominati gocciolatori in microportate e a basse pressioni. I gocciolatori vengono distinti in gocciolatori *on line* e gocciolatori *in line*. I primi sono degli erogatori che vengono inseriti su tubi posti sul terreno o ad una certa altezza lungo la fila delle piante. Questi erogatori possono essere a bottone o a sigaro ed avere una portata da 2 a 16 l/h. I gocciolatori *in line* invece sono degli erogatori coestrusi all'interno di tubi in polietilene, autopulenti grazie alla presenza di piccoli filtri in ingresso al gocciolatore stesso. Sia nei gocciolatori *on line* che in quelli *in line* esiste la possibilità di avere erogatori autocompensanti che all'aumentare della pressione mantengono la portata costante. Il metodo di irrigazione a goccia costituisce ad oggi il metodo più utilizzato in frutticoltura, in orticoltura, nelle serre e nei vivai per i quali è fondamentale il risparmio idrico, il risparmio di manodopera e di costi per la sistemazione del terreno. Di contro il sistema richiede, trattandosi di erogatori aventi dimensioni molto limitate, di sistemi di filtraggio più o meno spinti e variabili dai più comuni filtri a rete e a dischi (ideali per acque da pozzo) ai più sofisticati filtri a sabbia (ideali per acqua da lago o canali a cielo aperto);
- metodo per subirrigazione, che costituisce invece il sistema irriguo più moderno in assoluto. I sistemi più efficaci richiedono l'uso di ali gocciolanti (gocciolatori *in line*) interrate in numero e con distanze variabili in funzione del tipo di coltura e delle condizioni morfologiche del terreno. Ovviamente il sistema consente di ottenere un buon risparmio idrico in quanto rispetto a un normale sistema a goccia

non comporta perdite per evaporazione del terreno. La subirrigazione costituisce un sistema efficacissimo per fornire acqua alle colture anche in condizioni di scarsa disponibilità idrica; un limite è rappresentato dalla sua mancata fattibilità su terreni ricchi di scheletro o dove si effettuano lavorazioni troppo profonde. Un altro limite è rappresentato dall'intrusione sia da parte delle radici che da parte delle particelle di terra circostanti il gocciolatore.

7. Monitoraggio: i sistemi di monitoraggio basati su riconoscimento dell'immagine sono costituiti da una serie di videocamere digitali. L'analisi dell'accrescimento delle piante può essere basato su molteplici criteri come il volume, l'altezza, il colore, il numero dei fiori etc.
8. Fasi di sollevamento e spostamento dei vassoi: spesso vengono svolte con molteplici sistemi, semiautomatici guidati dall'uomo o totalmente automatizzati (carrelli elevatori, nastri trasportatori, tappeti di accumulo, robot di estrazione, prelievo e posizionamento etc.). I robot, in combinazione con sistemi logistici, consentono un grande risparmio di manodopera e sono in grado di gestire piante sia piccole che grandi.
9. Impacchettamento (*packaging machines*): esistono molteplici esempi di macchine impacchettatrici, inscatolatrici, imballatrici, incartatrici o etichettatrici.

Sempre più frequente è l'utilizzo di serre dotate di installazioni per il controllo delle condizioni climatiche e di illuminazione, quali sistemi integrati per il riscaldamento invernale, per la gestione motorizzata delle aperture per la ventilazione e il controllo climatico nel periodo estivo. Analogamente, l'automazione ha trovato applicazione nei sistemi di controllo dell'irrigazione, della fertirrigazione e dei sistemi colturali fuori suolo.

Uno dei limiti, soprattutto a livello nazionale italiano, è che l'automazione sia spesso limitata all'effettuazione di una sola operazione (riempimento e spostamento dei contenitori, semina, taleaggio etc.) mancando invece di sistemi automatizzati di filiera nelle aziende, sull'esempio di altri Paesi più evoluti tecnologicamente nel settore vivaistico, quali i paesi del nord Europa. In tali aziende d'avanguardia tutte le fasi della filiera vivaistica precedentemente descritte vengono integrate con i sistemi ICT, ovvero con i sistemi tecnologici informativi che sottointendono ai processi di tracciabilità di prodotto ed agli aspetti commerciali e di pianificazione della produzione.

In tali vivai d'avanguardia, sviluppatisi nei Paesi del Nord Europa e del Nord degli USA, le serre sono dotate generalmente di *supplemental lighting*, ovvero dell'utilizzo di luce artificiale come supplemento della luce solare (Fig. 11). Tale pratica risulta vantaggiosa in aree che ricevano meno di 4.5 ore medie di luce al giorno, come accade appunto in tali regioni in inverno, come risultante di una combinazione di fotoperiodo breve (legato alla latitudine) e di alta copertura nuvolosa. Il quantitativo di radiazione solare che raggiunge le coltivazioni in serra risulta quindi non essere sufficiente per il loro accrescimento con la risultante di una cessazione nello sviluppo, la formazione di gemme terminali e il mancato raggiungimento dell'altezza idonea per un semenzale per poter essere messo a dimora (Tinus, 1995; Lopez e Runkle, 2008).



**Figura 11. Serre dotate di *supplemental lights***

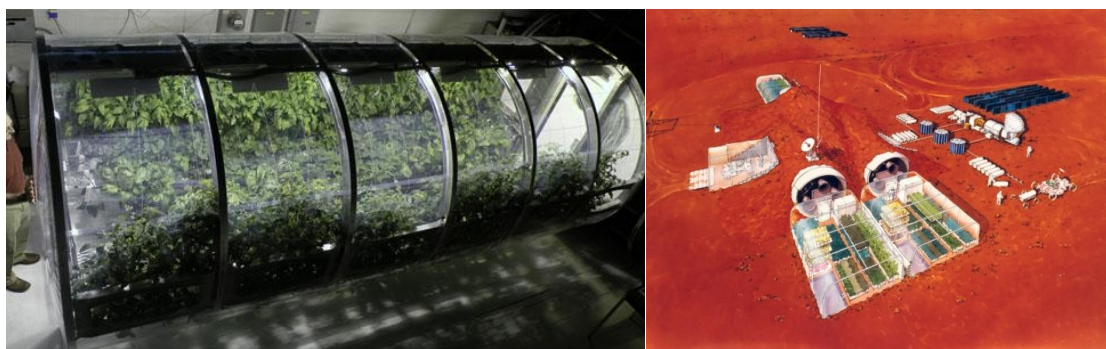
Una seconda tipologia di lampade è detta *photoperiod lighting*, con la funzione di stimolare o influenzare le risposte fotoperiodo dipendenti delle piante quali la fioritura o la crescita vegetativa.

Nell'ultimo decennio è anche fiorita una branca che è quella delle coltivazioni indoor di semenzali forestali, grazie all'utilizzo del *replacement lighting* ovvero di fonti luminose artificiali in sostituzione completa della luce solare (Fig. 12).



**Figura 12. Utilizzo di *replacement lights* per coltivazioni indoor**

Le tecnologie di coltivazione indoor di specie agrarie, inizialmente sviluppate presso la NASA per fornire agli astronauti nello spazio la possibilità di ottenimento di cibo fresco nel corso delle spedizioni, sono dotate di sistemi di controllo informatici per monitorare e fornire alle piante i nutrienti necessari, per aggiustare il pH, la temperatura, il contenuto di ossigeno delle soluzioni nutrienti e controllare la crescita delle piante, con lo scopo di incrementare la produzione di cibo per una popolazione in crescita (Fig. 13).



**Figura 13. Prototipi di coltivazione indoor della NASA: Lunar greenhouse (sinistra) e Mars greenhouse (destra)**

Tali tecnologie sono alla base della cosiddetta *controlled environment agriculture* (CEA) ovvero agricoltura in ambiente controllato.

Le installazioni all'interno delle quali viene condotta la coltivazione artificiale delle specie prendono il nome di *indoor farms*. L'evoluzione delle *indoor farms* ha condotto, prima in Giappone per poi espandersi dall'Asia fino in Europa, alla creazione delle *vertical farms* (Fig. 14).



**Figura 14. Vertical farms**

Le *vertical farms* sono la risultante evolutiva delle iniziali serre monopiano destinate alla coltivazione indoor. Esse appaiono infatti come torri costituite da serre impilate (Despommier, 2013). Dopo aver testato a lungo il loro funzionamento negli Stati Uniti, queste realtà potrebbero trovare spazio in India e Cina, soprattutto grazie al recupero di vecchi edifici e capannoni già presenti sul territorio, per incentivare l'agricoltura locale senza occupare nuovi suoli.

Le *vertical farms* sono dei centri di autoproduzione di cibo, in quanto sono edifici che mirano a ricreare le situazioni ambientali adatte alla crescita di varie tipologie di piante e ortaggi. Possono essere grattacieli adibiti esclusivamente alla produzione di cibo e alla coltura o possono essere anche piccoli edifici o situazioni ibride dove l'edificio è utilizzato sia per viverci, sia per produrre. L'ideatore del concetto di *vertical farm* è Dickson Despommier professore alla Columbia University, dove attualmente insegna Scienza della Salute ambientale. (<http://www.verticalfarm.com/blog>).

A Singapore, nel 2012 è stata costruita la prima *vertical farm* al mondo, la Sky Greens Farm. Singapore, con il suo elevatissimo numero di abitanti, ha un ritmo di vita e necessità totalmente fuori sintonia con il ritmo di cicizzazione e di riposo del quale hanno bisogno le campagne e i sistemi naturali; quindi, la progettazione di una *vertical farm* in questo contesto ha il fine di cercare di rendere autosufficienti dal punto di vista produttivo alcune aree della metropoli, fatto che implica una serie di conseguenze sociologiche e politiche di rilevante spessore e complessità.



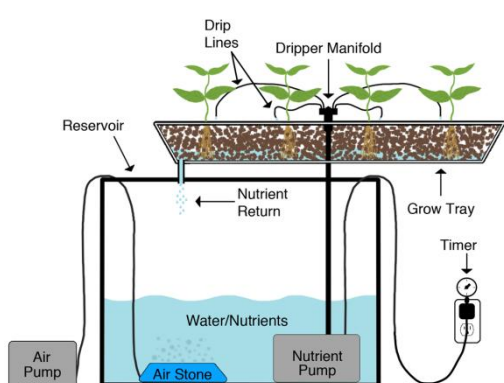
**Figura 15. Vertical Farm presentata dall'ENEA a EXPO 2015**

All'EXPO 2015 di Milano è stata inaugurata la prima *vertical farm* italiana (Fig. 15). Realizzata dall'ENEA, l'Agenzia per le nuove tecnologie, l'energia e lo sviluppo economico sostenibile, è una serra verticale alta quasi 5 metri nella quale si sperimenta l'agricoltura del futuro, ovvero l'agricoltura 3.0: zero pesticidi, zero km, zero consumo di suolo. Le piante (lattuga e basilico) sono coltivate su più strati, in cubetti di torba pressata immersi in acqua con soluzioni nutritive a

riciclo continuo (sistema idroponico), l'illuminazione è basata su LED ad alta efficienza che riproducono il ciclo della fotosintesi clorofilliana. La produzione è praticamente doppia rispetto alle colture tradizionali: per l'insalata, ad esempio, si passa da 6 a 14 cicli di raccolta/anno per ogni piano, con un risparmio del 95% di acqua (2 soli litri per un 1 kg di lattuga contro i 40-45 litri/kg in un campo tradizionale).

L'agricoltura in ambiente controllato mostra una serie di vantaggi rispetto alle tecniche tradizionali di coltivazione in terra. In primo luogo non vi è produzione di reflui; inoltre consente una produzione continua 12 mesi l'anno; vi è un risparmio idrico stimato tra il 70-80%; i sistemi sono totalmente indipendenti dalle condizioni meteorologiche esterne e non vengono interessati da eventi estremi quali alluvioni, stagioni siccitose o tornado. Elemento importante è che esse possono essere installate ovunque, in quanto non necessitano di suolo per le coltivazioni. Le coltivazioni in terra sono poi soggette ad attacchi microbici o di insetti dannosi, che determinano ingenti perdite di raccolto annuale, il che consente di minimizzare se non eliminare possibili perdite senza l'utilizzo di pesticidi tossici.

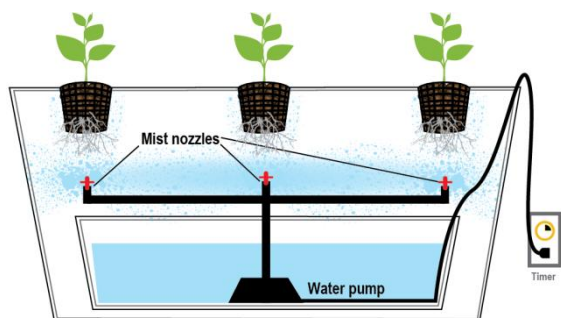
Esistono principalmente due tipologie di coltivazione indoor: l'idroponica e l'acquaponica.



**Figura 16. Schema di un sistema idroponico**

Nell'idroponica (Fig. 16) la terra è sostituita da piccolissime quantità di un substrato inerte (argilla espansa, perlite, fibra di cocco, lana di roccia, ecc.) collocate in tubi o colonne entro cui, grazie a una pompa, scorre l'acqua (totalmente riciclata) cui si aggiungono i nutrienti necessari ad apportare tutti gli elementi indispensabili alla crescita della pianta (detta soluzione nutriente).

Nelle formule più avanzate le pompe sono collegate a pannelli solari ed il sistema è totalmente controllato tramite computer.



**Figura 17. Schema di un sistema di acquaponico**

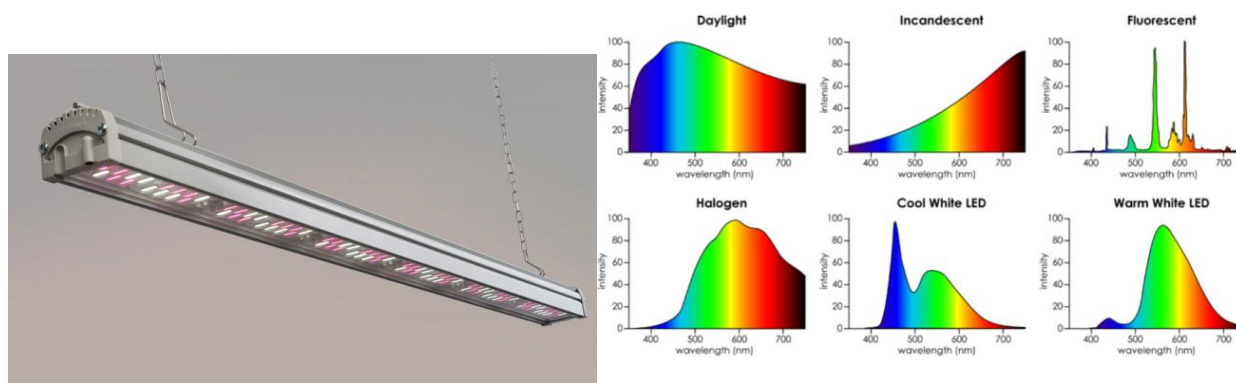
Nella formula più articolata dell'acquaponica (Fig. 17), non c'è bisogno di apportare i nutrienti esterni alle piante in quanto viene creata una simbiosi tra piante e animali: le coltivazioni sono collegate a vasche dedicate all'allevamento di pesci; i nutrienti

per le piante derivano dagli escrementi dei pesci e l'acqua viene purificata dalle piante stesse per essere riutilizzata. Una tecnica in realtà antichissima, che risale agli antichi Aztechi e che è già praticata su piccola scala in molti paesi da oltre 20 anni. Poiché però è più complessa da gestire dell'idroponica per il delicato equilibrio batterico che richiede, risulta essere meno adatta alla produzione su vasta scala.

I risultati di questi metodi di coltivazione sono stupefacenti: 500% di produttività in più rispetto alle colture in terra, 90% in meno di consumo di acqua, 50% di crescita più rapida, 40% di lavoro in meno, 30% in meno di energia richiesta. Un centro d'avanguardia in Italia è la Ferrari Farm, azienda agricola in provincia di Rieti, che ha sviluppato coltivazioni idroponiche in serre ermetiche sterili di nuovissima generazione, totalmente autoprodotte e computerizzate. Un altro esempio, di dimensioni decisamente superiori, è la serra del gruppo giapponese Mirai, installata presso la prefettura di Miyagi (Giappone), nello stabile che ospitava una fabbrica della Sony prima dell'incidente di Fukushima, con una estensione di 2500 metri quadrati.

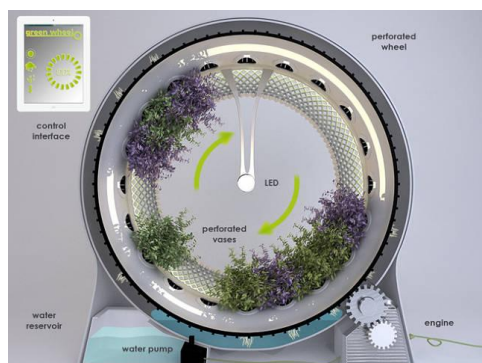
Il posizionamento di simili strutture di coltivazione in vicinanza dei centri abitati consente la riduzione dei costi di trasporto e l'acquisto di cibo prodotto localmente, ultra fresco e senza patogeni né pesticidi. Le tecnologie CEA, consentendo di creare condizioni ambientali artificiali ottimali in base alle esigenze, sono anche state estese all'allevamento di pesci e crostacei e di recente all'allevamento di specie forestali. Come descritto precedentemente, la coltivazione indoor è consentita dalla sostituzione della luce naturale del Sole con luce artificiale (*replacement lighting*).

I LED, in particolare, hanno dato il via ad un processo evolutivo della vivaistica senza pari nel corso dell'ultimo decennio, caratterizzato dalla proliferazione di lampade di nuova generazione, in grado di emettere spettri luminosi continui, sempre più vicini allo spettro solare (Fig. 18).



**Figura 18. LED di nuova generazione a spettro continuo**

L'efficacia di tali spettri nell'assicurare una rapida crescita di molteplici specie vegetali (la lista delle specie testate, sia in campo agrario sia forestale, è in continua espansione) ha condotto alla



**Figura 19. La Green Wheel**

creazione di prototipi di differenti dimensioni, basati sui principi di risparmio di spazio ed energia.

I prototipi più piccoli disponibili sul mercato sono finalizzati all'utilizzo domestico, come la Green Wheel (Fig. 19), una ruota che coltiva le piante in idroponica e risparmia energia, ottimale per far crescere le piante in

modo rigoglioso anche quando non si hanno a disposizione dei giardini o dei piccoli appezzamenti di terreno. Si tratta, in pratica, di uno speciale dispositivo di giardinaggio per interni a forma di ruota, in cui le piante vengono coltivate in idroponica e ruotano attorno ad una fonte luminosa posta al centro della circonferenza. Un altro esempio è rappresentato dalle Grow boxes, tende da coltivazione, con la funzione di creare un ambiente ideale per la crescita delle piante.

I prototipi di maggiori dimensioni sono invece finalizzati alla sostituzione delle serre dei vivai tradizionali con sistemi di produzione ad alta tecnologia. Essi sono spesso il prodotto di progetti di ricerca nazionali o internazionali, che vedono la partecipazione di partner afferenti a molteplici settori, dalla biologia all'agricoltura o alle scienze forestali, dall'ingegneria informatica a quella elettronica, meccanica ed energetica.

#### **1.1.3.1. Fonti luminose artificiali**

Ad oggi sono molteplici le lampade in commercio sviluppate per fornire luce supplementare alle colture in serra, al fine di controllare lo sviluppo delle piante e manipolarne la qualità. La limitazione maggiore che accomuna tutte le lampade è che nessuna di esse sia in grado di fornire uno spettro luminoso che si avvicini significativamente a quello reale del Sole, sia in termini qualitativi che quantitativi.

Convenzionalmente è possibile raggrupparle in 4 categorie (Fig. 20):

- Lampade a incandescenza
- Lampade a fluorescenza
- Lampade a scarica ad alta pressione

- Lampade LED



**Figura 20. Fonti luminose: a incandescenza, fluorescenza, a scarica ad alta pressione e LED**

**Lampade a incandescenza:** tipicamente emettono luce in seguito al surriscaldamento di un filamento di tungsteno a  $2500^{\circ}\text{C}$ . A tale temperatura lo spettro di emissione comprende una vasta parte dello spettro visibile. Soltanto il 15% dell'energia emessa è rappresentata dalla PAR (*photosynthetically active radiation*, 400-700 nm). Il 75% è rappresentato da radiazioni infrarosse (850-2700 nm) e il restante 10% viene dissipato sotto forma di calore ( $> 2700$  nm). Essendo dotate di scarsa efficienza e di una emivita piuttosto limitata, le lampade a incandescenza non risultano vantaggiose come supporto alla fotosintesi. Ma in ogni caso esse sono utilizzate come *photoperiod lighting*, in quanto sono economiche da installare, possono essere spente e riaccese di frequente e hanno alte percentuali di luce rossa e infrarossa. L'applicazione più comune di tali lampade è il *night break*, ovvero l'interruzione della notte che viene dunque suddivisa in due o più brevi cicli di buio, simulando una maggiore durata del giorno e inducendo risposte fisiologiche nella pianta. Tale pratica favorisce la fioritura nelle specie longidiurne o posticipa la fioritura delle brevidiurne.

**Lampade a fluorescenza:** emettono luce come conseguenza dell'eccitazione di vapore di mercurio a bassa pressione in una miscela di gas inerti. Un alto voltaggio applicato agli elettrodi ai due lati del tubo luminoso, crea una scarica elettrica nella miscela di gas che induce l'eccitazione degli ioni di mercurio, che a loro volta emettono delle radiazioni a basse lunghezze d'onda (principalmente UV) nel decadimento allo stato basale. Rivestimenti speciali fluorescenti delle pareti di vetro della lampada vengono attivati dalle radiazioni emesse dal mercurio, producendo a loro volta uno spettro visibile. Alterando la composizione del rivestimento fluorescente è possibile ottenere variazioni nello spettro. Le lampade a fluorescenza sono da

considerarsi più efficienti di quelle a incandescenza e possiedono anche una durata maggiore. Inoltre emettono minor calore ed un quantitativo di radiazione nel range della PAR più elevato.

Le luci a fluorescenza sono utilizzate generalmente per le fasi germinative ma non come luci supplementari in serra in quanto determinano fisicamente un ombreggiamento eccessivo delle colture.

**Lampade a scarica ad alta pressione (HID):** si tratta di lampade simili a quelle a fluorescenza in quanto alla base dell'emissione luminosa vi è la generazione di una scarica elettrica in una miscela elementare di gas. Lo spettro risultante dipende dalle caratteristiche dei gas presenti. La differenza rispetto alle lampade a fluorescenza è rappresentata dall'assenza di polveri fluorescenti di rivestimento nonché dai più elevati valori di pressione di vapore e temperatura cui vengono sottoposti i gas. Tali lampade mostrano una efficienza e una intensità superiore alle lampade a fluorescenza. Le tipologie più utilizzate in orticoltura sono le lampade ad alogenuri metallici (*metal-halide*) e quelle ai vapori di sodio ad alta pressione (HPS).

Le lampade ad alogenuri metallici forniscono un ottimale spettro luminoso continuo ma la regione della PAR è rappresentata soprattutto da lunghezze rosse e gialle.

Le lampade HPS sono divenute le più famose a livello commerciale per la coltivazione delle piante. Gran parte dello spettro di emissione è rappresentato da lunghezze d'onda nel range della PAR, soprattutto tra 500 e 650 nm (giallo-arancio-rosso) mentre la percentuale di blu è molto bassa. Qualora vogliano essere utilizzate come *replacement light*, esse necessitano dell'associazione con altre lampade (fluorescenti, a vapori di mercurio etc..) che abbiano alte emissioni nella banda della luce blu. Come luci supplementari nelle serre invece appaiono idonee, in quanto negli ambienti naturali il quantitativo di luce blu disponibile è già sufficiente a sostenere le risposte morfogeniche delle piante blu-dipendenti.

**Luci LED:** LED è un acronimo per *Light-Emitting Diode* (diodo ad emissione di luce). Il primo LED è stato sviluppato da Nick Holonyak Jr. nel 1962.

Un LED è per definizione un diodo che emette luce. Un diodo è un dispositivo elettronico a due terminali che consente il passaggio di corrente elettrica in una sola direzione, con l'entità della corrente che dipende dalla differenza di potenziale ai capi del dispositivo. Dal punto di vista fisico, un LED è un chip di materiale semiconduttore impregnato o drogato con impurità per formare una giunzione positivo-negativo (P-N): il polo positivo di tale giunzione è chiamato anodo, quello negativo catodo (Bisegna *et al.*, 2010).

I LED sono formati da GaAs (arseniuro di gallio), GaP (fosfuro di gallio), GaAsP (fosfuro arseniuro di gallio), SiC (carburo di silicio) e GaInN (nitruro di gallio e indio). L'esatta scelta dei semiconduttori determina la lunghezza d'onda dell'emissione di picco dei fotoni, l'efficienza nella conversione elettro-ottica e quindi l'intensità luminosa in uscita.

I LED convenzionali sono composti da vari materiali inorganici che producono i seguenti colori:

- AlGaAs - rosso ed infrarosso
- GaAlP - verde
- GaAsP - rosso, rosso-arancione, arancione, e giallo
- GaN - verde e blu
- GaP - rosso, giallo e verde
- ZnSe - blu
- InGaN - blu-verde, blu
- InGaAlP - rosso-arancione, arancione, giallo e verde
- SiC come substrato - blu
- Diamante (C) - ultravioletto
- Silicio (Si) come substrato - blu (in sviluppo)
- Zaffiro ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) come substrato – blu

L'illuminazione a LED si è molto sviluppata negli ultimi anni grazie agli innumerevoli vantaggi che presenta rispetto al classico sistema di illuminazione con lampade fluorescenti:

- durata di funzionamento (i LED ad alta emissione arrivano a circa 50.000 ore)
- assenza di costi di manutenzione • elevato rendimento (se paragonato a lampade ad incandescenza e alogene)
- luce pulita perché priva di componenti IR e UV
- facilità di realizzazione di ottiche efficienti in plastica
- colori saturi
- possibilità di un forte effetto spot (sorgente quasi puntiforme)
- funzionamento in sicurezza perché a bassissima tensione (normalmente tra i 3 e i 24 Vdc)
- accensione a freddo (fino a  $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ ) senza problemi
- insensibilità a umidità e vibrazioni
- flessibilità di installazione del punto luce

- assenza di mercurio
- durata non influenzata dal numero di accensioni/spegnimenti

#### **1.1.3.1.1. Coltivazioni in ambiente controllato sotto luci LED**

La possibilità di coltivare le piante sotto luci artificiali ha affascinato l'uomo fin dall'inizio del XX secolo. Basti pensare che già nel 1922 venivano pubblicati articoli inerenti tale argomento, come *Growth of plants in Artificial lights*, scritto da Harvey nel 1922, in cui l'autore afferma che "la produzione di piante sotto lampade artificiali è una possibilità di grande interesse economico in Minnesota ed in località simili, laddove le giornate risultano essere così brevi e la luce del sole di così bassa intensità nel corso dell'inverno, che risulta difficile coltivare piante in serra" (Harvey, 1922).

Nel corso del '900, vi sono stati molteplici casi di vivai in cui le luci artificiali siano state utilizzate per modificare la durata del giorno, fornire luce supplementare in inverno o per sostituire la luce solare, nel caso di camere di crescita. Ma i limiti delle fonti luminose tradizionali, in particolare il forte dispendio energetico ed il calore sviluppato, hanno impedito una espansione su vasta scala di tali applicazioni.

L'introduzione dei LED ha segnato un punto di svolta, in virtù dei minori consumi energetici e della minore produzione di calore (Yeh e Chung, 2009). Al di là della convenienza economica, i LED si sono mostrati più performanti delle lampade HPS anche in termini di effetto sulla crescita dei semenzali, sia su conifere che latifoglie (Apostol *et al.*, 2015; Tennessen *et al.*, 1994; Yeh e Chung, 2009, Astolfi *et al.*, 2012).

I maggiori studi sull'analisi della crescita delle piante sotto luci LED sono stati inizialmente intrapresi dai laboratori della NASA, data l'esigenza, nel corso di lunghe missioni nello spazio, di disporre di cibo fresco (Massa *et al.*, 2006). Una delle ricerche in corso è quella finalizzata allo sviluppo di metodiche di coltivazione su Marte (missione prevista per il 2030). Nel corso di prolungate missioni spaziali o in ambienti extraterrestri, le piante possono avere l'ulteriore vantaggio di produrre ossigeno, consentire la purificazione dell'acqua e il riciclaggio dei rifiuti (Yorio *et al.*, 2001).

Essendo i LED monocromatici, inizialmente sono state utilizzate combinazioni di led rossi e blu, con picchi vicini ai massimi di assorbimento delle clorofilla, così da favorire la fotosintesi. Ma numerosi studi hanno dimostrato la necessità di introdurre ulteriori lunghezze d'onda per assicurare un corretto sviluppo delle piante.

L'introduzione supplementare di LED verdi si è rivelata in tal senso vantaggiosa (Mickens e Wheeler, 2012) ma l'obiettivo fondamentale per ottenere piante sane e robuste è quello di mettere a punto una lampada in grado di emettere uno spettro continuo *ad hoc* per la crescita delle piante. La qualità spettrale dei LED può infatti determinare effetti drammatici a livello di anatomia e morfologia così come nell'uptake di nutrienti e nella produzione di nutrienti (Massa *et al.*, 2008). La possibilità di combinare LED monocromatici a costituire lampade complesse ha condotto alla possibilità di generare spettri continui di qualità differente, studiati sulla base delle esigenze luminose delle piante. Una delle aziende più attive nella ricerca dello spettro ideale per la coltivazione delle piante è la Valoya (Helsinki). L'unicità dei LED della Valoya è quello di emettere spettri continui, combinando tra loro un elevato numero di LED monocromatici. Se confrontati con lo spettro naturale del Sole, tali spettri artificiali mostrano alcune aree sopresse ed altre enfatizzate, in funzione dei picchi di assorbimento dei fotorecettori delle piante. Inoltre ogni spettro differisce dagli altri per la posizione e l'entità dei picchi, in funzione degli obiettivi che ci si prefigge (favorire un incremento della biomassa, dell'altezza, della produzione di pigmenti secondari etc.). L'evoluzione di questi spettri si basa su una continua ricerca che vede come parte attiva clienti privati, Università ed Enti di ricerca che, utilizzando tali spettri prototipali per la coltivazione delle proprie piante, forniscono di ritorno i propri dati ai biologi Valoya, così da introdurre delle modifiche nella composizione dello spettro volte a migliorarne le prestazioni in termini di qualità delle piante prodotte.

#### **1.1.3.2. Prototipi di coltivazione indoor di specie forestali**

L'interesse per la produzione indoor di specie agrarie è in continuo aumento, soprattutto in virtù della necessità di un incremento della produzione agricola previsto per i prossimi decenni, così come rilevato dal rapporto congiunto Fao-Ocse del 2015. Tutto questo si rende necessario per far fronte alla crescente domanda di prodotti alimentari, determinata non solo dall'aumento della popolazione ma anche da redditi pro-capite più alti, da una crescente urbanizzazione e da un maggiore fabbisogno di materie prime alimentari per l'industria dei combustibili.

Al contrario, l'interesse nei confronti delle specie forestali risulta essere molto più limitato, nonostante il fatto che le foreste rappresentino il più importante serbatoio di biodiversità, garantiscano la protezione del suolo, la qualità dell'aria e delle acque, forniscano importanti beni e servizi. Esse sono inoltre in grado di mitigare gli effetti dei cambiamenti climatici, funzionando come serbatoi di assorbimento del carbonio e fornendo una protezione naturale contro gli effetti del dissesto idrogeologico. Secondo dati FAO (Marzo 2014) l'area forestale mondiale è diminuita di circa 5,3 milioni di ettari l'anno, corrispondenti, nel periodo 1990-2010, ad una

perdita netta pari a quasi 4 volte le dimensioni di un paese come l'Italia. I risultati, aggiornati con il sondaggio globale di rilevamento a distanza, mostrano che nel 2010 l'area totale di superficie forestale era di 3.890 milioni di ettari, il 30% della superficie totale della terra.

Per quanto concerne l'Europa, la sensibilità nei confronti del problema forestale è cresciuta nell'ultimo decennio. Ad oggi circa il 90% dei fondi dell'UE per le foreste provengono dal Fondo europeo agricolo per lo sviluppo rurale (FEASR). Sono previsti vari tipi di aiuto a favore degli investimenti forestali. Tale misura copre gli investimenti nello sviluppo delle aree forestali e nel miglioramento della redditività delle foreste: forestazione e imboschimento, allestimento di sistemi agroforestali, prevenzione e ripristino delle foreste danneggiate da incendi, calamità naturali ed eventi catastrofici, investimenti diretti ad accrescere la resilienza e il pregio ambientale degli ecosistemi forestali nonché investimenti in tecnologie silvicole e nella trasformazione, mobilitazione e commercializzazione dei prodotti delle foreste. L'UE dedica inoltre fondi alla ricerca forestale, in particolare nell'ambito del programma Horizon 2020.

È grazie ai finanziamenti dell'UE nell'ambito di tale programma che è stato possibile condurre i maggiori progetti di creazione di prototipi innovativi di coltivazione indoor di specie forestali.

Tali progetti sono stati condotti dal dipartimento DAFNE dell'Università della Tuscia, in consorzio con numerosi partner nazionali e stranieri, a partire dal 2007.

Il progetto **Pre-forest** è stato coordinato dall'azienda Vivai Torsanlorenzo dal 2006 al 2009, ed ha visto la partecipazione di 6 partner provenienti da 3 Paesi europei (Vivai Torsanlorenzo e Università della Tuscia per l'Italia, QS Odlingssystem e Dalarna University per la Svezia, Dytikomakedonika Fytoria e National Agricultural Research Foundation NAGREF per la Grecia).

Obiettivo del progetto è stata la creazione di una tecnologia innovativa con la funzione di sostenere un breve periodo di pre-coltivazione del materiale di propagazione forestale in mini-plugs fino a densità pari a 3500 semenzali/m<sup>2</sup>, seguita da trapianto meccanizzato in altri contenitori di maggiori dimensioni o direttamente in campo aperto in vivaio (Fig. 21). Per le specie forestali le prime 5 settimane di crescita in seguito alla germinazione del seme risultano difatti essere le più delicate e decisive per l'ottenimento di un numero elevato di semenzali di qualità.



**Figura 21. Prototipo del progetto Pre-Forest**

Il compatto sistema di pre-coltivazione multipiano, sviluppato nel corso del progetto, può essere monitorato e regolato tramite computer, sia per quanto concerne le condizioni ambientali del sistema sia per controllare la germinazione delle specie. Il costante movimento dei ripiani consente, in uno spazio limitato, la coltivazione ad alta densità di piantine, limitando allo stesso tempo i consumi energetici e rendendo omogenee le condizioni ambientali per tutti i semenzali. Dal momento che tale sistema risulta chiuso e indipendente dalle condizioni ambientali esterne, non è necessario l'utilizzo di pesticidi e l'acqua e i nutrienti possono essere riciclati, riducendo il consumo idrico. Si tratta dunque di una soluzione ottimale per l'ottenimento di alte percentuali di germinazione e ottima qualità dei semenzali di molteplici specie forestali, che può presentarsi come supporto alla politica forestale europea basata sul principio di gestione sostenibile. L'unità di produzione si presta a molteplici utilizzi: per la produzione commerciale di una serie di colture, per la propagazione di specie a rischio di estinzione con bassa percentuale di germinazione o come strumento di ricerca scientifica. La possibilità di garantire un ambiente quasi completamente sterile rende tale sistema idoneo anche alle metodologiche di propagazione mediante embriogenesi somatica. Nel corso del progetto sono state svolte numerose prove sperimentali, in ambiente controllato e in ambiente naturale, per mettere a punto i protocolli di coltivazione indoor (nello specifico sono state testate molteplici fonti luminose: lampade a ioduri metallici, al sodio ad alta pressione, LED monocromatici blu e rossi) di molteplici specie tra cui *Picea abies*, *Pinus sylvestris*, *Robinia pseudoacacia*, *Cupressus sempervirens*, *Pinus brutia*, *Myrtus communis*, *Arbutus unedo*, *Pinus pinea*. Al termine di tali studi si è optato per l'utilizzo di lampade convenzionali a fluorescenza.

La tecnologia si è dimostrata, sia in termini economici sia biologici, vantaggiosa rispetto allo stato dell'arte del settore. Unico limite appare rappresentato dalla scarsa mobilità del sistema, progettato per un utilizzo stazionario in una precisa località, imponendo limitazioni nell'uso della medesima unità in più vivai forestali o direttamente su un sito da riforestare.

Il progetto **Fully Automated Growth Chamber** è stato finanziato al dipartimento D.A.F. dell'Università degli Studi della Tuscia dalla finanziaria della Regione Lazio (FILAS 2009-2011). Finalità del progetto è stata la realizzazione e sperimentazione di una camera di crescita di nuova concezione, da utilizzarsi sia come strumento per applicazioni di ricerca scientifica, sia come unità di produzione vivaistica con particolare riferimento al settore agroalimentare. Tale sistema, totalmente robotizzato ed ottimizzato dal punto di vista dei consumi energetici, prende il nome di *BioLogicBox* (Fig. 22).



**Figura 22. Prototipo del progetto Fully Automated Growth Chamber**

Così come per il prototipo messo a punto nel corso del progetto Pre-Forest, anche tale sistema appare caratterizzato dalla flessibilità di installazione. Con tale espressione si vuole definire l'eliminazione dell'obbligo di disporre di un vivaio (terreno, acqua, licenze, ecc.) e possibilità di produrre 24 ore su 24. Il *BioLogicBox* è stato realizzato di dimensioni tali da poter essere installato in container, così da poter essere trasportato da un sito ad un altro, consentendo di intervenire rapidamente e *in situ* per la conservazione di specie rare, minacciate o a rischio di estinzione. La mobilità del sistema ne rende potenzialmente possibile sia l'acquisto sia il

noleggio, aprendo così il mercato anche a quei Clienti impossibilitati a far fronte ad investimenti significativi.

Al di fuori del contesto forestale ed, in particolare, nel settore agroalimentare e fitosanitario unità mobili di allevamento come tale prototipo potrebbero essere impiegate in condizioni che rendano complesse le tradizionali metodiche di coltivazione di prodotti orto-frutticoli, per motivazioni climatiche (es. zone aride) o geopolitiche. Inoltre sistemi mobili ad elevata tecnologia potrebbero essere alla base di futuri progetti di produzione di specie edibili utilizzabili da parte degli astronauti su stazioni lunari o su altri pianeti.

Nel corso di tale progetto sono state testate le seguenti specie: *Arbutus unedo*, *Myrtus communis*, *Pinus pinea*, *Quercus ilex*, *Fagus sylvatica* e *Carpinus betulus*, tutte specie della dendroflora italiana ed in particolare laziale, di grande importanza ambientale e commerciale. Si tratta infatti di specie propagate in significative quantità nei vivai regionali e nazionali, sia per sostenere i vari programmi di rimboschimento sia per scopi ornamentali.

Per valutare l'efficienza della sorgente luminosa proposta nell'ambito del progetto sono state messe a confronto le performances di germinazione e di crescita delle specie considerate sia sotto lampade tradizionali a fluorescenza sia utilizzando differenti fonti LED, concludendo che quest'ultima fonte presenti molteplici vantaggi, quali efficienza energetica, spettro di emissione stabile, maggiore sicurezza, bassa emissione di calore, durata più lunga e piccole dimensioni.

Il progetto **Regen forest** (*Sustainable production of forest regeneration materials for protection against climate change*) è stato finanziato dalla Commissione europea (Seventh Framework Programme for Research, FP7) ed è stato coordinato dal dipartimento DAFNE nella figura della Prof.ssa Rosanna Bellarosa, dal 2011 al 2013 ed ha coinvolto molteplici partner di 4 Paesi europei: Università degli Studi della Tuscia, Amcota e Vivai Torsanlorenzo (Italia), Valoya (Finlandia), Dalarna University e Holmen Skog (Svezia), Egnatia, Alphatec e National Agricultural Research Foundation (Grecia). Obiettivo del progetto, così come per i precedenti progetti trattati, è stata la creazione di una camera di crescita per la coltivazione di semenzali di specie forestali, basata sull'utilizzo di lampade LED di nuova generazione a spettro continuo (Valoya) in sostituzione dei LED monocromatici rossi e blu testati nel progetto Pre-Forest (Fig. 23).



**Figura 23. Prototipo del progetto Regen Forest**

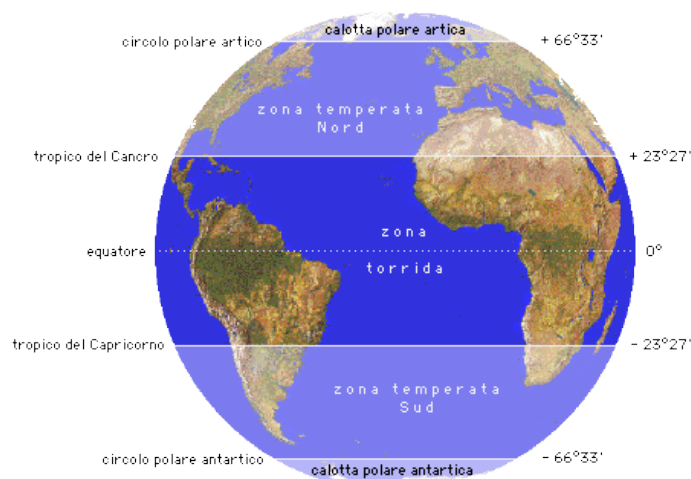
Un'ulteriore caratteristica innovativa del prototipo è la presenza di 10 ripiani rotanti che consentono di raggiungere una produzione di piantine, in un solo ciclo colturale (da 30 a 55 giorni), che varia in base al tipo di specie e alla densità dei contenitori alveolati e può arrivare sino ad un massimo di 17 mila piantine pari ad una superficie di 5 metri quadri. La creazione di tale sistema rotante consente di ridurre il numero di fonti luminose da utilizzare per la coltivazione di un così alto numero di semenzali, posizionando semplicemente 3 lampade LED nella parte apicale del prototipo.

Il sistema rotante consente di rendere omogenee in ogni punto della camera sia la temperatura sia l'umidità dell'aria. Il regime di luce pulsata derivante dalla rotazione inoltre risulta essere molto più vicino al naturale comportamento dei raggi luminosi all'interno di un bosco rispetto alle lampade ad illuminazione fissa, oltre a determinare un vantaggio in termini di ridotti consumi energetici. I cicli di irrigazione tramite gocciolatoio, le condizioni di temperatura e umidità sono gestite da un sistema di controllo automatizzato programmabile. In termini di risparmio di spazio ed energia, il prototipo risulta essere 5 volte più efficiente dei modelli convenzionali di camera di crescita. Le dimensioni ed il peso contenuto del prototipo ne consentono un'agevole rilocalizzazione. Nel corso del progetto sono state prodotte piantine di faggio, mirto, leccio, sughera, roverella, abete rosso e di altre specie forestali ma il sistema ben si presta alla coltivazione, da seme o talea, anche di specie utili nel campo agronomico e florovivaistico.

**Zephyr** (*Zephyr - Zero Impact Innovative Technology in Forest Plant Production*) è al momento l'ultimo progetto europeo, coordinato dal dipartimento DAFNE, condotto sulla tematica della creazione di prototipi sempre più innovativi di pre-coltivazione di specie forestali. Il progetto, della durata di 3 anni (2012-2015) è stato finanziato dalla Commissione europea nell'ambito del

programma Horizon 2020. Sulla scia del progetto Regen Forest, anche il prototipo Zephyr si caratterizza per la presenza di ripiani rotanti ma a tale caratteristica, vantaggiosa per le motivazioni precedentemente descritte, si aggiungono una serie di caratteristiche innovative, quali il monitoraggio e regolazione dei parametri ambientali in remoto tramite una rete di sensori wireless e fotocamere digitali connessi ad una consolle centrale, la possibilità di intervento sempre in remoto grazie alla presenza di un braccio robotico all'interno della camera di crescita, la mobilità del sistema, trasportabile in container come un vivaio volante e l'autonomia energetica consentita dall'aggiunta al sistema di pannelli fotovoltaici che consente dunque il suo utilizzo anche in zone non raggiunte dalla rete elettrica. Tali caratteristiche saranno descritte più in dettaglio nel paragrafo 2.1.

## 1.2. Habitat della zona temperata



**Figura 24. Suddivisione del globo in zone climatiche**

Per zona temperata si intende l'area geografica compresa tra i 30 e i 60 gradi di latitudine, comprendendo dunque nell'emisfero boreale, Europa, Canada Meridionale, Stati Uniti, Cina, Asia Centrale e nell'emisfero Australe, la zona meridionale dell'America Latina, la Patagonia (Argentina), parte del Cile, il Sud Africa, il Sud dell'Australia, la Nuova Zelanda e la Tasmania (Fig. 24).

In un'area talmente vasta come quella temperata, il clima presenta grandi varietà: catene montuose imponenti, grandi pianure, isole, penisole, baie e altopiani contribuiscono a differenziare le condizioni climatiche di queste zone; è possibile, difatti, individuare almeno tre tipi di clima:

- **clima subtropicale umido:** tra il 20° e il 35° parallelo. Inverno fresco e secco, estate calda e umida spesso influenzata dai monsoni. La temperatura scende d'inverno sotto i 10°C e sale d'estate sopra i 40°C;
- **clima mediterraneo:** è caratterizzato da temperature medie elevate in estate ed inverni miti, con precipitazioni concentrate nei mesi invernali. La vegetazione tipica è la macchia mediterranea;
- **clima temperato fresco oceanico:** presente nelle regioni tra il 35° e il 60° parallelo. Sono caratterizzate da inverni miti ed estati fresche con piogge frequenti. La vegetazione è costituita da brughiere e foreste di latifoglie.

Nonostante alcune diversità, esistono tre principali caratteristiche che li accomunano, quali la presenza di quattro stagioni sufficientemente diverse tra loro, temperature moderate che garantiscono la crescita della vegetazione, precipitazioni abbondanti che contribuiscono allo sviluppo vegetale.

Le foreste temperate hanno quasi sempre una specie dominante di alberi decidui (che perdono tutte le foglie nello stesso periodo dell'anno); in alcuni casi, piuttosto rari, ne sono presenti due o tre. Le foreste più estese del mondo sono costituite da conifere. Alle alte quote montane, si trovano foreste con le caratteristiche della taiga.

Sono fondamentalmente presenti quattro tipi di formazioni vegetali spontanee:

- la **foresta mediterranea:** è formata prevalentemente da lecci, con pini, cipressi e sughere. Queste piante mostrano un tipico tratto adattativo all'aridità, detto sclerofillia, osservabile a livello fogliare attraverso una ridotta dimensione delle stesse ed un ispessimento delle pareti esterne che le rende più coriacee. Ciò permette alle piante di non perdere troppa acqua per traspirazione nei periodi caldi. La foresta mediterranea si può trovare in tutte le zone temperate, ma in minima parte in Europa, perché è stata distrutta e sostituita dalle città e dall'agricoltura.

Benché rappresenti una parte modesta delle foreste globali, essa ospita una svariata quantità di specie animali e vegetali che si sono adattate alle estati lunghe, calde e asciutte. Qui troviamo circa il 10% di tutte le specie vegetali conosciute.

La macchia mediterranea è associata alla foresta omonima ed è presente nelle stesse zone della prima. Si compone di piccoli arbusti con fiori profumati e foglie aromatiche.

- La **foresta di latifoglie:** è formata da alberi dal legno duro e la chioma ad ombrello, come castagni, aceri, querce e faggi. Nella bella stagione, le chiome si coprono di foglie, mentre in inverno i rami rimangono scheletrici. Come per la foresta mediterranea, oggi si

trova in tutto il mondo, ma in minima parte in Europa, sostituita dall' agricoltura e dalle città.

- La **prateria temperata**: è un territorio pianeggiante o collinare, coperto da piani erbosi ed erbe perenni. Sono graminacee con ciclo vegetativo di pochi mesi. La vegetazione può essere alta anche un metro e più o meno fitta. La prateria si trova nelle stesse zone della foresta temperata, alla quale si sostituisce nelle zone con poche precipitazioni o terreno troppo permeabile. Si trova nei vasti territori del Nordamerica e nelle steppe russe e siberiane. Oggi non esiste quasi più, perché è stata convertita in terreni agricoli o terreni da pascolo. Ne restano lembi nei parchi nazionali, dove vivono i cavalli selvaggi o i bisonti del Nordamerica.
- La **foresta di conifere**: è formata da aghifoglie come pini, larici e abeti che sopportano le temperature rigide e sono sempreverdi (ad eccezione del larice). In alcune zone troviamo anche latifoglie resistenti al freddo, come le betulle. Questa tipologia di foresta rappresenta la più grande del mondo, più vasta di quella equatoriale: si estende infatti in un territorio di circa 8000 chilometri di lunghezza, che comprende Canada, paesi scandinavi e Siberia e viene interrotta soltanto dall'Oceano Atlantico.

### 1.3. Cenni di fotobiologia

#### 1.3.1. Definizione di luce

Il termine *luce* ha origine dal latino *lux* (gen. *lucis*), dalla radice indoeuropea *leuk-* con il significato di luce, brillantezza, che è la stessa del termine greco *leukòs* (bianco) e che si ritrova in *luna*. Similitudini si riscontrano nel termine tedesco *licht*, l'inglese *light*, il lituano *laukas* (pallido) e addirittura l'ittita *lukezi*. *Fiat lux*, ovvero “sia fatta la luce”, è una famosa espressione della Bibbia nonché un modo di definire l'improvviso chiarirsi di un concetto. La luce è fondamentale per osservare il mondo in cui viviamo. Ma dal punto di vista fisico che cos'è esattamente?

A partire dal 1660 sono state fornite due risposte diverse a tale domanda, da cui si sono sviluppati due modelli rivali: il **modello corpuscolare**, proposto da Isaac Newton e il **modello ondulatorio**, sostenuto da Christiaan Huygens.

Secondo il **modello corpuscolare**, la luce è un flusso di particelle microscopiche (corpuscoli) emesse dalle sorgenti luminose. La teoria corpuscolare, già esposta nella sua essenzialità nel *De rerum natura* di Lucrezio, fu sostenuta nel 1704 da Newton, al quale si deve la dimostrazione

che la luce bianca sia in realtà composta di vari colori e costituita da fasci di particelle corpuscolate.

Secondo il **modello ondulatorio**, proposto da Huygens nel 1690, la luce è un'onda simile alle onde che si propagano nell'acqua e alle onde sonore.

Solo alla fine del diciannovesimo secolo, dopo gli studi di Maxwell sui campi elettromagnetici, si giunse a definire la luce non come semplice onda meccanica ma elettromagnetica. Essa come tale non necessita di alcun mezzo materiale per propagarsi, in quanto la sua trasmissione avviene nel vuoto.

Oggi si ritengono validi entrambi i modelli e la luce viene considerata di duplice natura: corpuscolare e ondulatoria. In certe situazioni essa si comporta come onda, in altre come corpuscolo.

### 1.3.2. Grandezze caratteristiche delle onde elettromagnetiche

Nella definizione dell'energia elettromagnetica sono spesso adoperati due termini: onda e radiazione elettromagnetica. Essi si riferiscono in verità alla stessa cosa.

La parola onda sottolinea l'aspetto ondulatorio e la parola radiazione l'aspetto energetico, in quanto la radiazione corrisponde all'energia trasportata dall'onda.

In termini classici, le onde elettromagnetiche sono costituite da onde di campi elettrici e magnetici che, propagandosi perpendicolarmente tra loro, trasportano energia (Fig. 25).

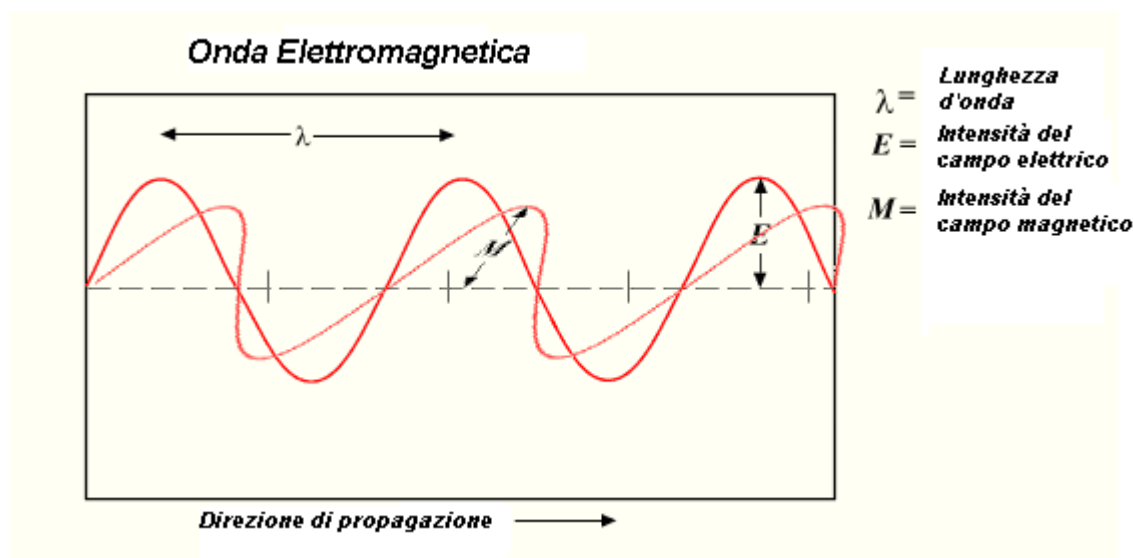


Figura 25. Onda elettromagnetica e sue grandezze

In termini quantistici, la radiazione elettromagnetica rappresenta il flusso di fotoni (cioè i *quanti* di luce) attraverso lo spazio. I fotoni sono pacchetti di energia che si muovono alla velocità della luce. I due concetti sono legati mediante la formula  $E = h \cdot f$ , dove  $E$  risulta essere l'energia di un quanto o fotone,  $f$  la frequenza dell'onda e  $h$  la costante di proporzionalità, anche detta costante di Planck (pari a  $6,624 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ ). In altre parole, onde a frequenze più alte risultano essere anche più energetiche (a parità di intensità).

Dell'onda elettromagnetica possiamo definire alcuni parametri caratteristici:

- la **lunghezza d'onda** ( $\lambda$ ) rappresenta la distanza tra i punti corrispondenti di due onde successive (per esempio la distanza tra due creste successive). La sua unità di misura è il metro (o uno dei suoi sottomultipli).
- L'**ampiezza d'onda** ( $A$ ) è la distanza del massimo della cresta dall'asse di propagazione dell'onda. La sua unità di misura è il metro (o uno dei suoi sottomultipli).
- La **frequenza** ( $\nu$ ) è il numero delle oscillazioni dell'onda in un secondo. La sua unità di misura è l'Hertz (Hz). L'Hertz è l'inverso del secondo  $\text{Hz} = 1/\text{s}$
- La **velocità di propagazione** ( $c$ ) assume valori diversi a seconda del mezzo in cui essa si propaga, a seconda dell'elasticità e della densità del mezzo. Nel caso della luce che si propaga nel vuoto la velocità è approssimata a  $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$  ovvero  $c = 300,000 \text{ Km/s}$ . Tale velocità si indica con  $c$  e si definisce *velocità della luce*. La velocità della luce fu misurata per la prima volta in un esperimento di laboratorio dal fisico francese Armand-Hippolyte-Louis Fizeau, sebbene altre osservazioni astronomiche avessero già permesso di determinarne il valore con una buona approssimazione; tale valore è oggi conosciuto con estrema precisione e corrisponde appunto alla velocità di propagazione nel vuoto di un'onda elettromagnetica (uguale per tutte le frequenze) e pari a  $299.792.458 \text{ m/s}$ .

Lunghezza d'onda, frequenza e velocità di propagazione sono legate tra loro dalla seguente relazione matematica:

$$c = \lambda \cdot \nu$$

Lo spettro elettromagnetico nella sua totalità comprende l'intera gamma delle lunghezze d'onda esistenti in natura, dalle onde lunghissime, poco energetiche, utilizzate per le trasmissioni radio (10.000 Km di lunghezza, 30 Hz di frequenza), alle onde cortissime delle radiazioni cosmiche

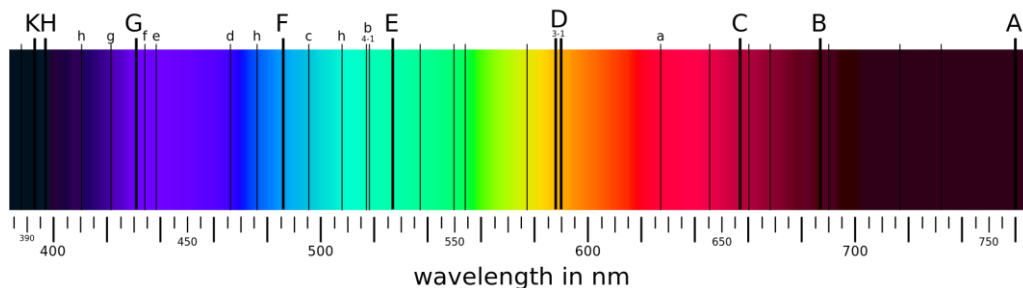
(0,00001 Angström di lunghezza,  $3 \times 10^{23}$  Hz), dotate di straordinaria energia. Tuttavia, la banda di sensibilità degli esseri viventi corrisponde a quella delle radiazioni solari.

### 1.3.3. Lo spettro solare

Il Sole è una stella e come ogni stella è in grado di emettere un proprio spettro elettromagnetico, dipendente nella sua composizione in lunghezze d'onda dalla temperatura dell'astro e dall'atmosfera che lo circonda. Le onde elettromagnetiche emesse dal Sole sono state classificate in base ai valori di lunghezza d'onda e nel loro complesso costituiscono lo spettro solare. L'energia radiante emanata dal Sole e avente origine da reazioni termonucleari, presenta uno spettro di radiazioni elettromagnetiche (REM) caratterizzato da un *continuum* di lunghezze d'onda, che si estende dai raggi X fino alle onde radio. All'interno di tale spettro, solo una piccolissima porzione è rappresentata dal cosiddetto spettro visibile, cioè dall'insieme delle lunghezze d'onda a cui l'occhio umano è sensibile e che sono alla base della percezione dei colori, cui comunemente viene dato il nome di *luce*. In base al loro spettro le stelle vengono classificate in 7 classi spettrali, indicate utilizzando le lettere dell'alfabeto: O, B, A, F, G, K, M. Le stelle con la medesima temperatura fanno parte della stessa classe spettrale. Il Sole fa parte della classe G, dove sono classificate tutte le stelle gialle con una temperatura superficiale di circa 6000K.

I primi studi sullo spettro solare risalgono al 1802, anno in cui il chimico e fisico britannico William Hyde Wollaston (1766-1828) fece passare attraverso una fenditura e successivamente attraverso un prisma, un fascio di luce proveniente dal Sole. In questo modo scompose la luce solare ottenendone lo spettro. Wollaston osservò che, pur essendo continuo, lo spettro del Sole presentava delle righe scure di diversa intensità. Nel 1814 il fisico tedesco Joseph von Fraunhofer (1787-1826) misurò e catalogò le righe scure, che da allora presero il nome di righe di Fraunhofer. L'origine di queste anomalie era attribuibile a due cause: le linee scure potevano essere dovute all'assorbimento di luce da parte di elementi presenti nell'atmosfera del Sole oppure derivavano dall'azione dell'atmosfera terrestre. Nel 1859 Kirchhoff analizzò le righe scure dello spettro solare e vide che coincidevano con gli spettri di emissione a righe di alcuni elementi. Egli concluse dunque che l'assenza di certe lunghezze d'onda, le righe scure, era dovuta all'assorbimento di luce nell'atmosfera solare da parte di atomi di alcuni elementi presenti anche sulla Terra. Il Sole è dunque costituito da materia ordinaria. Lo spettro

continuo si genera dalla superficie solare, detta fotosfera, mentre le righe di Fraunhofer hanno origine prevalentemente nella corona, lo strato più alto dell'atmosfera del Sole, dove gli atomi degli elementi presenti assorbono radiazioni di opportuna lunghezza d'onda, producendo le righe scure. Nello specifico, le righe di Fraunhofer (Fig. 26) corrispondono alla presenza nella corona del Sole di idrogeno, metalli neutri e metalli ionizzati.



**Figura 26. Righe di Fraunhofer**

All'osservazione spettroscopica moderna, lo spettro solare si presenta come uno spettro continuo solcato da un numero elevatissimo di righe spettrali. I fotoni emessi dal sole hanno una frequenza piuttosto eterogenea che comprende la quasi totalità dello spettro elettromagnetico, dalle radioonde fino ai raggi gamma e la maggior parte dei fotoni appare concentrata tra i 200 nm e i 10,000 nm.

Dal punto di vista della ripartizione nelle diverse finestre, la radiazione solare (prima di subire l'assorbimento nell'atmosfera terrestre) consta per il 7% di radiazione ultravioletta, per il 40% di radiazione visibile e per il 53% di radiazione infrarossa (Landi, 2008).

Nell'attraversare l'atmosfera, una frazione dei raggi solari viene assorbita o deviata (*scattering*) a seguito degli urti con le molecole dell'atmosfera stessa (inclusi il vapor acqueo, le nubi e gli aerosol). L'attenuazione interessa tutte le lunghezze d'onda dello spettro ma in maniera differenziata, per cui lo spettro elettromagnetico risultante assume un profilo irregolare. I raggi gamma, X e UV sono fermati direttamente dalla fascia di ozono ad un'altezza di 25 km, mentre i raggi visibili (più della metà del totale), infrarossi e alcuni UV riescono ad attraversarla. La porzione di spettro di emissione solare che arriva sulla superficie terrestre, al netto dell'azione filtrante dell'atmosfera, è comunque variabile ed è influenzato dalle condizioni meteo, dall'altitudine, dalla posizione del Sole (ora, mese e anno) e anche dall'inquinamento (Fig. 27).

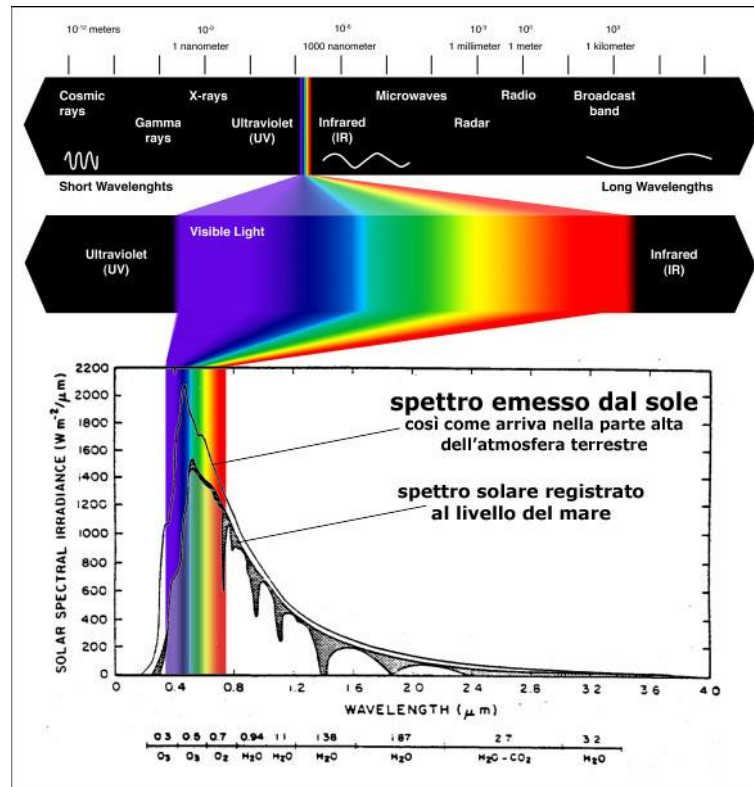


Figura 27. Spettro solare prima e dopo l'attraversamento dell'atmosfera

### 1.3.3.1. Lo spettro visibile

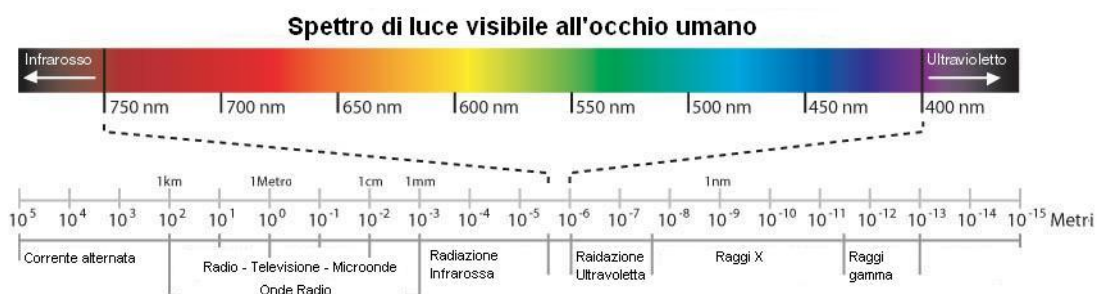


Figura 28. Lo spettro visibile

La quasi totalità degli esseri viventi reagisce al medesimo campo di radiazioni: lo spettro ottico, costituito da radiazioni elettromagnetiche con lunghezza d'onda tra i 100 nm (profondo UV) ed 1 mm (lontano IR), spesso ristretto a 200 nm – 3000 nm per via dell'assorbimento atmosferico al di sotto dei 200 nm e degli effetti trascurabili, per via della bassa energia dei fotoni, nel lontano IR. La parte centrale dello spettro ottico è rappresentata dallo spettro visibile (Fig. 28).

**Radiazioni ultraviolette:** lunghezza d'onda compresa tra 100 e 400 nm. La banda degli ultravioletti è suddivisa in UVA (315-400 nm), UVB (280-315 nm) e UVC (100-280 nm).

**Radiazioni visibili :** lunghezza d'onda compresa tra 380 e 780 nm.

**Radiazioni infrarosse:** lunghezza d'onda compresa tra 780 nm e 1 mm. La regione degli infrarossi è suddivisa in IRA (780-1400 nm), IRB (1400-3000 nm) e IRC (3000 nm-1 – 1 mm).

Con il termine *luce bianca* si intende la presenza contemporanea di tutte le lunghezze d'onda dello spettro visibile; al contrario il *buio* è rappresentato dall'assenza di luce visibile.

L'adattamento degli organismi a tale range di lunghezze d'onda è avvenuto essenzialmente per due motivi: in primo luogo perché radiazioni con frequenza e quindi energia superiore romperebbero i deboli legami idrogeno di cui sono ricche le principali molecole biologiche, mentre radiazioni con energia più bassa non riuscirebbero a innescare le necessarie reazioni biochimiche; inoltre perché la banda dello spettro “scelta” dagli esseri viventi è quella maggiormente disponibile. Le lunghezze d'onda visibili occupano infatti la cosiddetta *finestra ottica*, una regione dello spettro elettromagnetico che può attraversare indisturbata l'atmosfera della Terra (benché come è noto il blu venga diffuso più del rosso, dando al cielo il suo colore caratteristico). Allo stesso modo esistono anche finestre per l'infrarosso vicino (NIR), medio (MIR) e lontano (FIR), il che spiega l'alta percentuale di radiazione infrarossa che costituisce lo spettro solare incidente al suolo.

Il termine *visibile* deriva dal criterio antropocentrico con cui è stata identificata tale porzione dello spettro elettromagnetico che risulta difatti quella percepita come luce bianca dall'occhio umano. In realtà tale aggettivo non è propriamente corretto, in quanto alcune specie animali possono percepire altre regioni dello spettro elettromagnetico. Ad esempio le api utilizzano gli UV per la ricerca del nettare dei fiori, i quali cercheranno quindi di attirare gli insetti mostrandosi "invitanti" proprio a quelle lunghezze d'onda. Dall'altra parte la luce visibile corrisponde praticamente alla cosiddetta regione PAR (*Photosynthetically Active Radiation*), compresa tra 400 e 700 nm. Tali lunghezze d'onda contengono le quantità di energia idonee per i processi biochimici. Gli organismi

vegetali, pur non possedendo occhi *sensu strictu*, presentano difatti recettori in grado di catturare radiazioni nel campo del visibile al fine di utilizzarne l'energia per innescare i processi fotosintetici. Di tutta l'energia utile agli organismi viventi che giunge sulla Terra, solo lo 0.023% della radiazione solare in arrivo è sfruttata per la fotosintesi e viene convertita in sostanza organica.

#### 1.3.4. Il senso della vista nelle piante



**Figura 29. Sensibilità delle piante agli stimoli luminosi**

La vista è uno dei cinque sensi, quello mediante il quale è possibile percepire gli stimoli luminosi e quindi la figura, il colore, le misure e la posizione degli oggetti (Fig. 29).

L'organo deputato alla vista umana è l'occhio che è in grado di percepire le lunghezze d'onda luminose mediante fotorecettori presenti nello strato esterno della retina, detti coni e bastoncelli. Una delle questioni dibattute fin dai tempi della pubblicazione dell'opera di Charles Darwin *On the origin of species*, è se le piante siano dotate di un senso assimilabile a quello della vista. Darwin era rimasto affascinato, ad esempio, dalla capacità delle piante di piegarsi in direzione di una fonte luminosa, fenomeno noto come fototropismo. Un suo contemporaneo, il botanico Tedesco Julius Von Sachs, scoprì per primo che la luce blu fosse la responsabile di tale fenomeno. Ma in che modo le piante sono in grado di catturare specifiche lunghezze d'onda?

Secoli di ricerche, non ancora giunte a conclusione, hanno condotto alla scoperta di molteplici fotorecettori. In particolare, i maggiori progressi sono stati consentiti dall'avvento degli studi di genetica molecolare. A differenza dell'occhio umano, le piante sono dotate di innumerevoli recettori. Sappiamo ad esempio che *Arabidopsis thaliana* ne ha almeno 11, alcuni dei quali informano la pianta del momento idoneo alla

germinazione, altri inducono piegamenti in direzione della luce, altri ancora regolano la fioritura ed i ritmi circadiani.

Di conseguenza, la vista delle piante è da considerarsi molto più complessa di quella umana a livello di percezione del segnale. Ciò è motivato dal fatto che la luce non sia per le piante essenzialmente un segnale ma anche una fonte di nutrimento, in virtù della fotosintesi. Per tal motivo esse devono essere in grado di cercare e trovare le fonti luminose, muovendosi per quanto possibile nella loro direzione. La vista è dunque da considerarsi non solo la capacità di identificare particolari lunghezze d'onda ma anche di rispondere ad esse. Le piante mancano di un sistema nervoso che sappia convertire i segnali luminosi in immagini ma sono in grado di convertire i segnali in indicazioni per la propria crescita (Chamovitz, 2012).

#### **1.3.4.1. Fotorecettori principali**

La fotobiologia è una branca della biologia che studia le interazioni tra luce e organismi viventi. Essa include la fotomedicina, la fotosintesi, la fotobiologia ambientale e la biologia dei fotosensori (Aphalo, 2010).

Le piante mostrano risposte fisiologiche a lunghezze d'onda comprese tra 280 e 800 nm, range che comprende dunque la luce visibile ma anche le adiacenti regioni degli UV-A e B e dell'infrarosso vicino. La luce influenza la fotosintesi ma più in generale lo sviluppo della pianta stessa. Per rispondere agli stimoli luminosi, le piante devono rilevare e analizzare l'intensità e la lunghezza d'onda della luce incidente per mezzo di fotorecettori con differenti spettri d'azione. Dal momento che il fotorecettore non interagisce direttamente col DNA cellulare, è necessaria inoltre una catena di trasduzione del segnale tra i due.

Dal punto di vista chimico, i fotorecettori delle piante appartengono alla categoria dei pigmenti.

I pigmenti sono molecole in grado di assorbire la luce (in un range generalmente compreso tra 320 nm e 760 nm). Attraverso l'assorbimento di fotoni tali molecole passano ad uno stato eccitato e nel ricadere allo stato energetico basale possono riemettere l'energia assorbita sotto forma di luce (luminescenza), calore o trasferirla ad altre molecole, eccitandole a loro volta. Ma la cosa più importante è che l'energia dei

fotoni può avviare trasformazioni chimiche come il trasferimento elettronico, la fosforilazione o cambiamenti conformazionali delle molecole.

I pigmenti possono essere classificati in due gruppi principali:

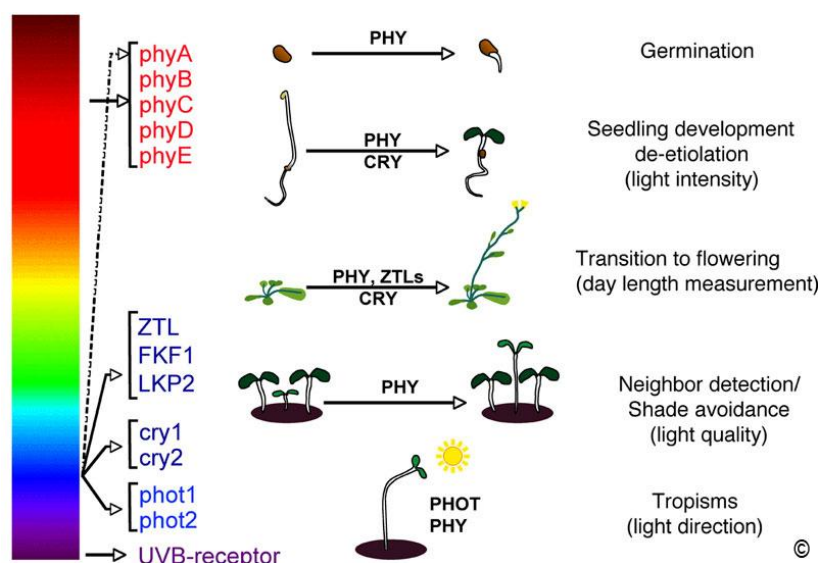
- Pigmenti che assorbono una frazione ingente della quantità di luce incidente. Essi assorbono fotoni che guidano processi metabolici (es. clorofilla), assorbono potenziali fotoni dannosi (es. carotenoidi, antocianine e flavonoidi) o dissipano energia per proteggere componenti cellulari. In alcuni casi, come nei fiori, i pigmenti possono essere alla base di un sistema di segnalazione coinvolto nelle interazioni tra piante e animali (es. per attirare gli impollinatori).
- Pigmenti che assorbono solo una piccola frazione di luce incidente e sono propriamente detti **fotorecettori**. Essi utilizzano la luce come fonte di informazione sull'ambiente circostante e adattano il programma di sviluppo e il comportamento della pianta alle condizioni ambientali. Le risposte indotte nell'organismo vegetale possono essere classificate come segue:
  - **fotomorfogenesi**: i segnali luminosi regolano, in base alla loro qualità e quantità, cambiamenti di forma e struttura, come la germinazione del seme, l'espansione fogliare, l'elongazione dello stelo, l'inizio della fioritura e la sintesi dei pigmenti. Le risposte fotomorfogeniche forniscono un vantaggio in termini di sopravvivenza all'organismo.
  - **Cronobiologia**: le piante e gli animali sono in grado di distinguere il momento del giorno in cui esse si trovano, indipendentemente dalla presenza/assenza di luce esterna. Tale capacità è definita *orologio circadiano*. La luce ha il compito di agire come *zeitgeber* (dal tedesco "che dà il tempo") ovvero di sincronizzatore dei cicli endogeni con il ritmo giorno/notte ambientale. Tale fenomeno è dunque dipendente dalla lunghezza del giorno e della notte, non dalla quantità o qualità della luce. Un ritmo circadiano è sincronizzato quando il suo periodo è uguale a quello del suo stimolo sincronizzatore. Un ritmo sincronizzato mantiene sempre una relazione fissa con il suo *zeitgeber*, la cui caratteristica fondamentale è la capacità, durante il processo di sincronizzazione, di alterare il periodo di *free-running* del ritmo circadiano in oggetto. Se tale periodo è più lungo rispetto a quello dello *zeitgeber*, quest'ultimo lo accorcerà, mentre se il periodo è più corto, lo allungherà (Enciclopedia Treccani, 1999). In alcuni casi, particolari condizioni

luminose possono arrestare dei cicli fisiologici (fenomeno definito **fotoperiodismo**).

- **Fototropismo**: proprietà dei vegetali (detta anche eliotropismo) di reagire all'azione esercitata dalla luce orientando i propri organi secondo la direzione dei raggi luminosi. In una stessa pianta le diverse parti reagiscono, in modo differente al medesimo stimolo: alcune (fusti) si curvano in modo da disporsi parallelamente alla direzione dei raggi e da avvicinarsi con la parte apicale alla loro sorgente, per cui il fototropismo si dice positivo; altre, al contrario, (radici) si comportano in modo esattamente opposto e il relativo fototropismo si dice negativo. Le foglie, infine, di norma si dispongono perpendicolarmente all'incidenza dei raggi, in modo da godere del massimo di energia luminosa, e il loro fototropismo si dice trasversale. Il fototropismo positivo è presente anche nei Funghi (per esempio, nello zigomicete *Pilobolus*).

Nelle piante sono presenti molteplici fotorecettori (Fig. 30) classificabili come segue:

- **Fitocromi** (famiglia di recettori in grado di captare il rosso e il rosso lontano (*red/far red receptors*);
- **Criptocromi e fototropine**, recettori della luce blu nonché di UV-A;
- **Recettori degli UV-B**.



**Figura 30. Riassunto dei principali recettori delle piante e delle loro funzioni**

I fitocromi esistono generalmente in due forme interconvertibili tra loro: una con il massimo di assorbimento nella regione del rosso (picco a 660 nm) e un'altra con un massimo assorbimento nella regione del rosso lontano (picco a 730 nm). Tali recettori non sono soltanto in grado di definire l'intensità del singolo segnale ma anche di "calcolare" il rapporto tra le irradianze del rosso e del rosso lontano (*red/far red ratio*).

La forma PFR 730 nm è considerata la forma attiva del fitocromo, in quanto molti processi fotomorfogenici sono indotti dalla luce rossa. Il fitocromo agisce quindi come interruttore molecolare presente in due stati, in grado di indurre la pianta a intraprendere o meno una determinata via di sviluppo piuttosto che un'altra in base ai segnali luminosi percepiti. Le reazioni che dipendono dal fitocromo sono state classificate, in termini di flusso fotonico e di tempo di irraggiamento, in due categorie: reazioni di induzione (IR) e reazioni da alto irraggiamento (HIR). Le IR sono a loro volta divise in reazioni a flusso basso (LFR) e reazioni a flusso molto basso (VLFR). Una reazione LFR è la classica risposta dipendente dal fitocromo, caratterizzata da foto-reversibilità. I meccanismi di trasduzione dei segnali percepiti mediante il fitocromo sono rappresentati da proteine G, fosfatidilinositolo fosfato,  $Ca^{2+}$ /calmodulina e proteine chinasi a diverse specificità.

I fotorecettori del blu e dell'UV-A sono presenti in molti organismi (batteri, funghi, piante verdi e animali). L'isolamento di tali molecole nelle piante è stato un processo arduo, da cui è derivato il nome di criptocromi. In realtà piuttosto recentemente sono stati identificati tre gruppi di recettori in grado di assorbire la luce blu e gli UV-A: le flavoproteine propriamente dette criptocromi (CRY1, CRY2 e CRY3, in *A. thaliana*), le fototropine (PHOT1 e PHOT2 in *A. thaliana*) e un possibile terzo tipo di recettore con un cromoforo appartenente al gruppo delle xantofille, appartenenti chimicamente alla famiglia dei carotenoidi (Horwitz e Berrocal, 1997). Inoltre sono stati identificati alcuni ulteriori recettori, coinvolti nella fioritura e nella regolazione dei ritmi circadiani, denominati ZTL, FKF1, LKP2 (Banerjee e Batschauer, 2005).

Le risposte degli organismi vegetali agli UV-B risultano non essere solo indotte in maniera diretta dai danni fisici prodotti (ad esempio, sul DNA), ma anche da specifici fotorecettori. Studi recenti hanno evidenziato la presenza di diversi fotorecettori, probabilmente appartenenti alla famiglia delle flavoproteine, coinvolti in percorsi di segnalazione separate, uno attivo nella regione 280-300 nm e l'altro nella regione 300-320 nm (Ulm e Nagy, 2005). Recentemente è stata identificata un'altra molecola,

potenziale recettore degli UV-B, denominata UVR8 (Jenkins, 2009). Le caratteristiche del cromoforo responsabile dell'assorbimento degli UV-B non sono ancora state chiarite.

La ricerca sui fitocromi è piuttosto fervente e diverse molecole sono in corso di studio. Ad esempio, nella felce *Adiantum* è stato identificato un fotorecettore che sembra possedere caratteristiche comuni sia ai fitocromi sia alle fototropine (Nozue *et al.*, 1998).

Molto interessanti sono le ricerche volte ad identificare eventuali fotorecettori della luce verde, tradizionalmente considerata una banda cromatica non utilizzata da parte delle piante e dunque trasmessa dalle foglie. Recenti studi hanno dimostrato che la luce verde può avere discreti effetti sulla biologia delle piante e i meccanismi di azione sono in corso di analisi. Principalmente essi vengono suddivisi in: processi criptocromo-dipendenti e processi criptocromo-indipendenti. L'effetto della luce verde sembra contrapporsi ai processi indotti dalla luce blu e rossa, funzionando dunque in maniera simile al segnale indotto dal rosso lontano, che informa le piante della presenza di condizioni ambientali sfavorevoli alla fotosintesi (Folta e Maruhnich, 2007). L'identificazione di recettori specifici per la luce verde (500-600 nm) è resa complessa dal fatto che anche fitocromi e criptocromi siano molecole in grado di assorbirla. Alcuni candidati sono stati suggeriti nel corso dell'ultimo decennio di studi: una zeaxantina, ovvero un fotorecettore il cui cromoforo appartiene alla famiglia dei carotenoidi, apparentemente richiesto per la regolazione reversibile degli stomi (Frechilla *et al.*, 2000); una flavoproteina omologa alle acquaporine di tipo 1 (Hertel, 2005, Lorenz *et al.*, 2003), che appare legata alla regolazione dell'elongazione dello stelo, evento che necessita di un rapido cambiamento nel turgore (Folta, 2004); la flavoproteina CRY3 (o CRY-DASH), con alta somiglianza in termini di sequenza genica con criptocromi e fotoliasi a singolo filamento (Selby e Sancar, 2006) e una molecola definita eliocromo, recettore del rosso lontano e del verde, reversibile e complementare all'azione dei fitocromi (Tanada, 1997).

## 2. Materiali e metodi

### 2.1. Il progetto Zephyr

#### 2.1.1. Finalità del progetto



Figura 31. Logo del progetto Zephyr

La crescita delle piante è influenzata da una serie di fattori naturali, sia in ambienti naturali sia all'interno dei vivai: luce, nutrienti, temperatura, vento, umidità e composizione del suolo, predazione da parte di specie animali, competizione intra e interspecifica (quest'ultimo fattore risulta in realtà presente solo in ambiente naturale). Una soluzione innovativa per evitare o ridurre molti di questi fattori limitanti è l'applicazione del concetto di *plant factory* (letteralmente: industria delle piante) anche nel settore forestale.

Le *plant factories* sono sistemi di crescita chiusi in grado di produrre piante di alta qualità nel corso di tutto l'anno, grazie ad un controllo artificiale dell'ambiente di coltivazione (es. intensità luminosa, fotoperiodo, temperatura, concentrazione di anidride carbonica e ossigeno dell'aria, umidità relativa dell'aria e dei substrati di coltura).

L'associazione tra indipendenza totale dalle condizioni climatiche esterne e l'elevato numero di ripiani di coltivazione, consentono al sistema di produrre un numero molto elevato di semenzali, anche di specie esotiche, in tempi ristretti rispetto alle tradizionali tecniche di coltivazione all'aperto.

Un altro vantaggio importante di tali sistemi è che essi sono sterilizzabili prima di iniziare il ciclo colturale, rendendo superfluo l'utilizzo di pesticidi. Si tratta di tecnologie a risparmio energetico, in grado anche di ridurre le emissioni legate al trasporto a lunga distanza dei prodotti, grazie alla possibilità di una produzione locale. Vengono ridotti anche i consumi di suolo e di acqua, che può anche essere riciclata. In Giappone sono al momento attive circa 200 *plant factories* i cui prodotti principali sono lattuga, pomodori, fragole ed altre specie agrarie. Al contrario, non vi sono impianti dedicati alla coltivazione di specie forestali.

Il primo progetto europeo che si è focalizzato su tale argomento è stato il progetto **Zephyr** (*Zero Impact Innovative Technology in Forest Plant Production*, Fig. 31). Tale progetto, iniziato nel 2012, è stato finanziato dalla Commissione europea nell'ambito del programma Horizon 2020, con l'intento di introdurre una tecnologia innovativa ispirata al concetto di *plant factory* per la pre-coltivazione di materiale di rigenerazione forestale a partire da seme.

Le specie forestali necessitano di condizioni ambientali altamente specifiche per garantire la germinazione dei semi prima ancora dell'accrescimento dei semenzali. Riuscire a ricreare in ambiente artificiale tali condizioni diventa l'unico modo per preservare la biodiversità in quanto piantine prodotte per taleaggio sono essenzialmente cloni, a differenza della coltivazione da seme che garantisce la conservazione della variabilità genetica.

L'unità di produzione è mobile, a impatto zero sull'ambiente e a basso costo ([www.zephyr.project.eu](http://www.zephyr.project.eu)), non influenzata dalle condizioni ambientali esterne e dotata di luci LED caratterizzate dall'emissione di spettri continui ottimali per sostenere la fotosintesi clorofilliana. L'utilizzo di luci LED comporta una serie di vantaggi rispetto alle fonti luminose tradizionali: minori consumi energetici, minore emissione di calore e durata maggiore delle lampade stesse. Lo spettro selezionato per il prototipo mostra una riduzione dei picchi di luce rossa e blu caratteristici delle lampade LED tradizionali e una emissione continua anche nelle bande del verde, del giallo-arancio e del rosso lontano. Tale scelta è derivata da una serie di test effettuati su molteplici spettri al fine di identificare il migliore per le specie forestali europee oggetto di studio.

La camera di crescita (Fig. 32) inserita nel prototipo è costituita da:



**Figura 32. Camera di crescita del prototipo Zephyr**

- 10 ripiani in rotazione continua, ognuno dei quali può alloggiare al massimo 2 vassoi di plastica di dimensioni 53\*31.5 cm;
- un sistema di condizionamento dell'aria;
- un sistema di irrigazione;
- un binario per il movimento orizzontale del braccio robotico.

Uno dei vantaggi di tale sistema risulta essere l'uniformità delle condizioni di crescita all'interno della camera, garantita dalla rotazione dei ripiani al di sotto della sorgente luminosa. Nelle tradizionali camere di crescita, così come nelle serre, i semenzali restano nella medesima posizione nel corso del tempo, alcuni più vicini altri più lontani dalle fonti luminose o dalle ventole. La presenza in uno spazio limitato di ben 10 ripiani di coltivazione consente di incrementare la densità di produzione di piantine forestali di alta qualità pronte per essere trapiantate in contenitore o direttamente in campo.

Intensità luminosa, fotoperiodo ed ulteriori parametri ambientali (temperatura dell'aria, consumi idrici, umidità e pH del suolo) sono monitorati tramite innovativi sensori wireless (*stick sensors*) posizionati all'interno dei vassoi connessi ad un sistema di controllo centrale che consente di controllare e gestire in remoto i parametri.

Sensori ottici sono stati invece sviluppati per il monitoraggio dell'accrescimento delle piantine in termini di altezza dello stelo (tramite analisi ottiche stereoscopiche) e grado di verde o *greenness*, un parametro in grado di fornire in maniera indiretta informazioni relative alla biomassa del semenzale (tramite analisi di immagini digitali).

La fotocamera stereoscopica è stata montata su di un braccio robotico in grado di posizionarla in modo tale da cogliere una immagine per ogni semenzale presente nel sistema, utilizzando un sistema di coordinate che tiene conto di una griglia di riferimento costruita sui vassoi multiplugs per identificare le singole posizioni ed il numero del vassoio considerato. Questo tipo di analisi consente di valutare eventuali differenze nei ritmi di accrescimento all'interno del medesimo vassoio così come tra vassoi differenti, indicando differenze che è possibile associare a disomogeneità nelle condizioni di crescita o al background genetico dei semi.

Il braccio robotico è anche dotato di una pinza che può tornare utile per prelevare specifici semenzali in maniera totalmente automatizzata.

Il monitoraggio in continuo dei parametri ambientali consente di intervenire sul sistema in maniera puntuale soltanto qualora sia necessario ripristinare un certo valore di un parametro, con un considerevole risparmio di energia e denaro.

L'energia necessaria al movimento del sistema rotante, all'alimentazione dei LED, al sistema di irrigazione e riciclaggio dell'acqua nonché all'alimentazione del sistema di controllo è fornita da una serie di pannelli fotovoltaici. Una fonte energetica ausiliaria potrebbe essere necessaria per alimentare il sistema di condizionamento dell'aria, in base alle condizioni climatiche esterne ed in base ai protocolli di crescita.

L'utilizzo di pannelli fotovoltaici per la produzione energetica consente la trasportabilità del sistema laddove sia necessario, direttamente nei siti di riforestazione (Fig. 33). 20 pannelli fotovoltaici sono posizionati sul tetto del container su un'estensione di circa 14 m<sup>2</sup>. Il consumo giornaliero del sistema è di circa 1.45 kW (su un carico massimo totale di 1.9 kW) qualora sia coltivato in simultanea il numero massimo di vassoi consentito.



**Figura 33. Trasporto su ruota del prototipo Zephyr**

L'unità di produzione è inoltre caratterizzata da un sistema di riciclaggio di acqua e fertilizzanti, grazie alla presenza di una lampada battericida e non prevede l'utilizzo di pesticidi.

Il mancato rilascio di inquinanti nell'ambiente comporta una riduzione delle emissioni pari a circa il 70% rispetto ai metodi di coltivazione tradizionale in vivaio.

Da una serie di studi comparativi, è stato possibile affermare che, rispetto ad una serra tradizionale, il sistema Zephyr mostri i seguenti vantaggi:

- Risparmio in termini di spazio fino al 495%

- Risparmio energetico 85%
- Risparmio di tempo 74%
- Risparmio idrico legato a sistemi di recupero e riciclaggio dell'acqua fino al 90%
- 100% di risparmio su utilizzo di erbicidi e pesticidi. Tale risparmio non è legato soltanto alla fase di pre-coltivazione nel sistema ma si protrae anche dopo il trasferimento dei semenzali all'aperto, grazie alla robustezza delle piantine che consente di evitare l'utilizzo di sostanze chimiche.
- Cicli di produzione possibili: fino a 11 l'anno.

Tale tecnologia integrata va dunque a indurre un drastico cambiamento nello stato dell'arte della produzione vivaistica forestale: al di là dell'efficienza energetica, è in grado di contribuire alla protezione ambientale attraverso la difesa della biodiversità, il riciclaggio dell'acqua, la forte riduzione dell'uso di fertilizzanti e la totale assenza di utilizzo di pesticidi. Inoltre i materiali di riforestazione prodotti sono certificati e standardizzati, garantendo un incremento nell'efficienza dei programmi di riforestazione.

Le specie forestali la cui coltivazione è stata testata nel corso dei 3 anni di progetto, appartengono a 2 categorie:

- 1) Specie coltivate per la produzione di legname
- 2) Specie non coltivate per la produzione di legname ma per le loro proprietà, es. piante medicinali.

I test svolti nel corso del progetto hanno dimostrato che:

- I semenzali di quasi tutte le specie testate hanno mostrato una performance di crescita migliore sotto lampade LED Valoya® rispetto alle lampade a fluorescenza tradizionali.
- Le luci LED accelerano le fasi fenologiche dei semenzali, riducendo i tempi di emergenza e di chiusura delle gemme apicali.
- Il sistema rotante consente un'elevata produzione di semenzali di alta qualità in breve tempo (cicli di circa 30 giorni).

### 2.1.2. Organizzazione del progetto

Il progetto Zephyr è stato condotto da un consorzio di 14 partners appartenenti a 10 nazioni europee (Belgio, Finlandia, Francia, Germania, Grecia, Inghilterra, Italia, Portogallo, Spagna e Svezia) ed è stato coordinato dall'Università degli Studi della Tuscia, nella figura del Prof. Bartolomeo Schirone.

Qui di seguito sono riportati i singoli partner e i rispettivi ruoli nell'ambito del progetto:

- **Università degli Studi della Tuscia (UNITUS, Italia):** coordinamento e gestione del progetto; definizione e sviluppo dei protocolli di crescita e loro validazione biologica; definizione della nuova tecnologia; disseminazione dei risultati scientifici; test di crescita su varie specie mediterranee.
- **Università dell'Insubria (Italia):** responsabile dello svolgimento di test di crescita con l'utilizzo dei nuovi sensori. Analisi delle caratteristiche dei suddetti sensori. Definizione e sviluppo di protocolli di crescita e loro validazione biologica.
- **CO.MET.ART s.a.s. (Italia):** progettazione e costruzione delle parti meccaniche del nuovo prototipo, incluso il sistema di riciclaggio dell'acqua.
- **Vivai Torsanlorenzo (Italia):** definizione e messa in opera dei nuovi protocolli di crescita. Test di campo delle piantine prodotte all'interno del prototipo. Responsabile della partecipazione del progetto ad una fiera internazionale. Nello specifico il prototipo è stato presentato pubblicamente nel corso di EXPO 2015 a Milano nei giorni 20 e 21 (Fig. 34). Oltre all'esibizione del prototipo in azione presso Piazza Città di Lombardia, è stata anche organizzata una Conferenza scientifica internazionale dal titolo *Zephyr: Zero-impact technology to respond to zero hunger challenge*, tenutasi il 21 ottobre nella Sala Biagi del Palazzo della Regione Lombardia. Il convegno, dedicato alle tecnologie a impatto zero come Zephyr, ha visto la partecipazione di esperti provenienti da tutto il mondo ed ha affrontato la questione dell'azzeramento della fame nel mondo attraverso il ricorso alle tecnologie del futuro.



**Figura 34. Presentazione del prototipo Zephyr a EXPO 2015**

- **Demokritus University of Thrace (DUTH, Grecia):** definizione e sviluppo dei protocolli di crescita e loro validazione biologica; definizione della nuova tecnologia; responsabile della disseminazione dei risultati scientifici; test di crescita su varie specie mediterranee.
- **Valoya (Finlandia):** fornitore delle lampade LED per lo svolgimento della prima fase di test di coltivazione del progetto; messa a punto di LED innovativi con spettri specifici ottimali per la crescita delle piante.
- **Robosoft (Francia):** realizzazione delle componenti robotiche del sistema. Responsabili dell'integrazione dei sistemi e delle componenti.
- **Fraunhofer IFAM (Germania):** responsabile dello sviluppo, realizzazione e validazione dei nuovi sensori per il monitoraggio delle piante e del suolo, integrati in una rete wireless.

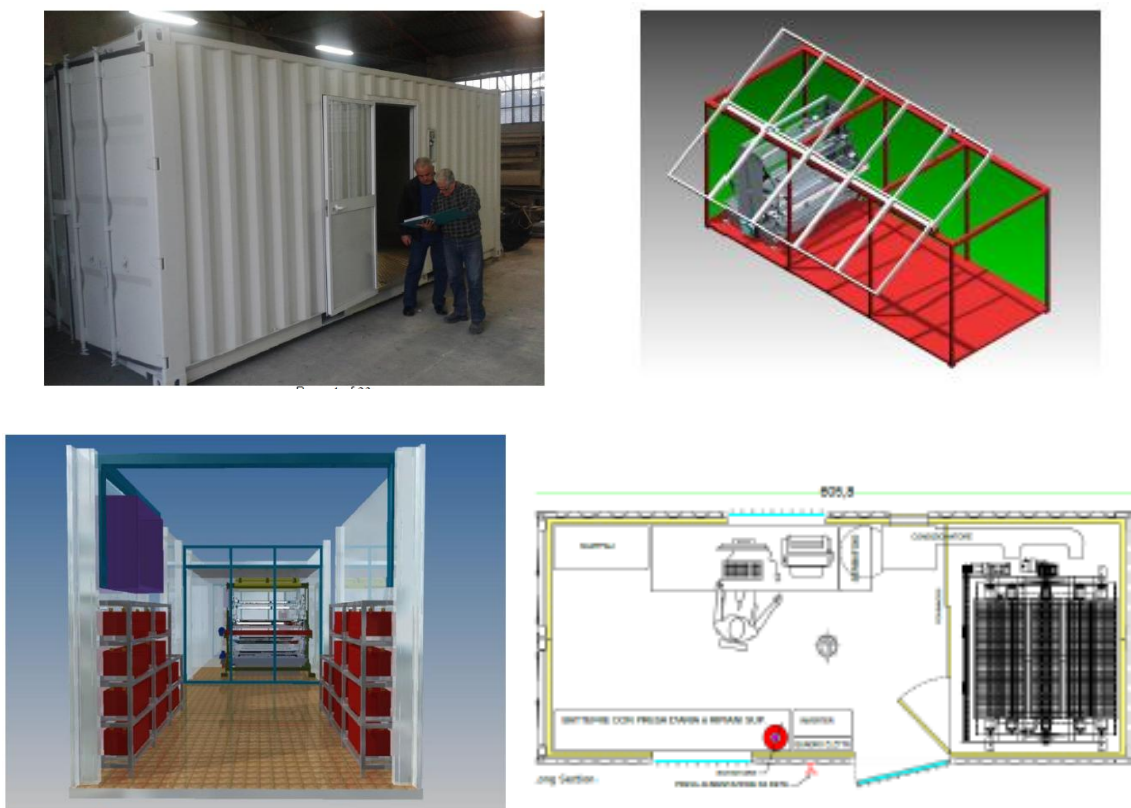
- **The ACREO Institute (Svezia):** responsabile insieme ad IFAM dello sviluppo, realizzazione e validazione dei nuovi sensori per il monitoraggio delle piante e del suolo, integrati in una rete wireless.
- **Dalarna University (Svezia):** responsabile della definizione e sviluppo di nuovi protocolli di crescita e loro validazione biologica. Test di crescita di varie specie del nord Europa.
- **VELTHA IVZW (Belgio):** responsabile dell'analisi di mercato e del controllo di qualità degli aspetti ingegneristici legati alla costruzione del prototipo. Organizzazione del piano di industrializzazione del prototipo e della partecipazione ad una fiera internazionale.
- **Advantic Sistemas y Servicios s.l. (Spagna):** creazione e sviluppo del sistema di controllo e monitoraggio e del sistema di comunicazione wireless tra sensori e unità di controllo. Responsabile della creazione del manuale per l'utente.
- **Azorina (Portogallo):** partecipazione alla definizione e sviluppo di protocolli di crescita e loro validazione biologica. Test di 2 specie autoctone delle isole Azzorre.
- **EXERGY LTD (Inghilterra):** creazione e sviluppo dei pannelli fotovoltaici.

La prima fase del progetto, finalizzata alla messa a punto di protocolli di crescita di una serie di specie forestali da poter applicare all'interno del prototipo finale, è iniziata con una serie di test in camere di crescita tradizionali equipaggiate con lampade LED ed in contemporanea è stato condotto uno studio per la definizione delle caratteristiche delle componenti robotiche, del sistema rotante da alloggiare nel prototipo, così come una prima analisi dei sensori wireless necessari, sulla base delle necessità dell'utente finale.

Nella seconda fase del progetto si è proceduto alla creazione fisica di tutte le componenti del prototipo: nuovi sensori wireless, braccio robotico, sistema rotante multi-ripiano, LED innovativi a spettro continuo, sistema di pannelli fotovoltaici e sistema di controllo e monitoraggio. Una volta assemblato il prototipo e definiti i protocolli di crescita, alcuni di questi sono stati testati all'interno della nuova camera di crescita per validarne l'efficienza.

## 2.1. 3. Descrizione delle singole componenti

### 2.1.3.1. Il container



**Figura 35. Visione interna ed esterna del container**

Il container ISO è un contenitore di circa 40 metri cubi di volume. Lo spazio interno risulta più che sufficiente per ospitare sottosistemi, unità di controllo e batterie oltre alla camera di crescita, lasciando abbastanza spazio per i movimenti di un operatore (Fig. 35).

L'ampio tetto del container consente di ospitare un numero di pannelli fotovoltaici tali da poter evitare l'aggiunta di altri sistemi di rifornimento energetico.

Le dimensioni del container sono le seguenti:

- Dimensioni (L x L x H): 6 m x 2.44 m x 2.59 m
- Volume totale: 38.5 m<sup>3</sup>
- Peso massimo: 30,500 Kg
- Area utilizzabile del tetto: 14.88 m<sup>2</sup>

### 2.1.3.2. Pannelli fotovoltaici

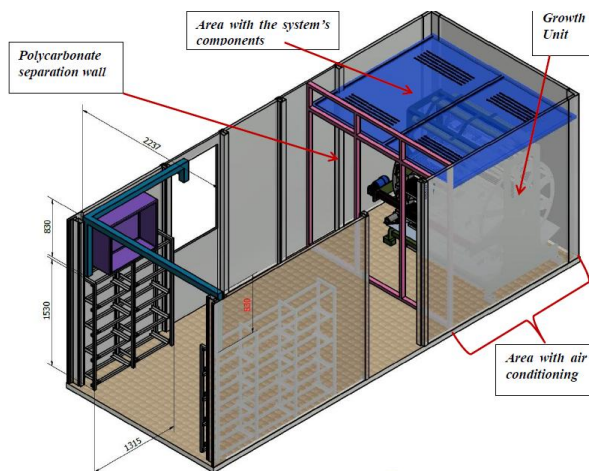


**Figura 36. Pannelli fotovoltaici prima e dopo il montaggio sul container**

Il sistema di alimentazione elettrica basata su pannelli fotovoltaici del prototipo Zephyr è definibile quale sistema ibrido indipendente dotato di batterie di accumulo ed in grado di essere associato ad altre fonti aggiuntive come rete elettrica locale o generatori diesel.

Le componenti del sistema sono rappresentate da 20 pannelli fotovoltaici, batterie di accumulo, regolatore di carica ed inverter. Ovviamente il sistema può funzionare soltanto in assenza di ombreggiamento o neve (Fig. 36).

### 2.1.3.3. Sistema di condizionamento dell'aria



**Figura 37. Sistema di condizionamento dell'aria**

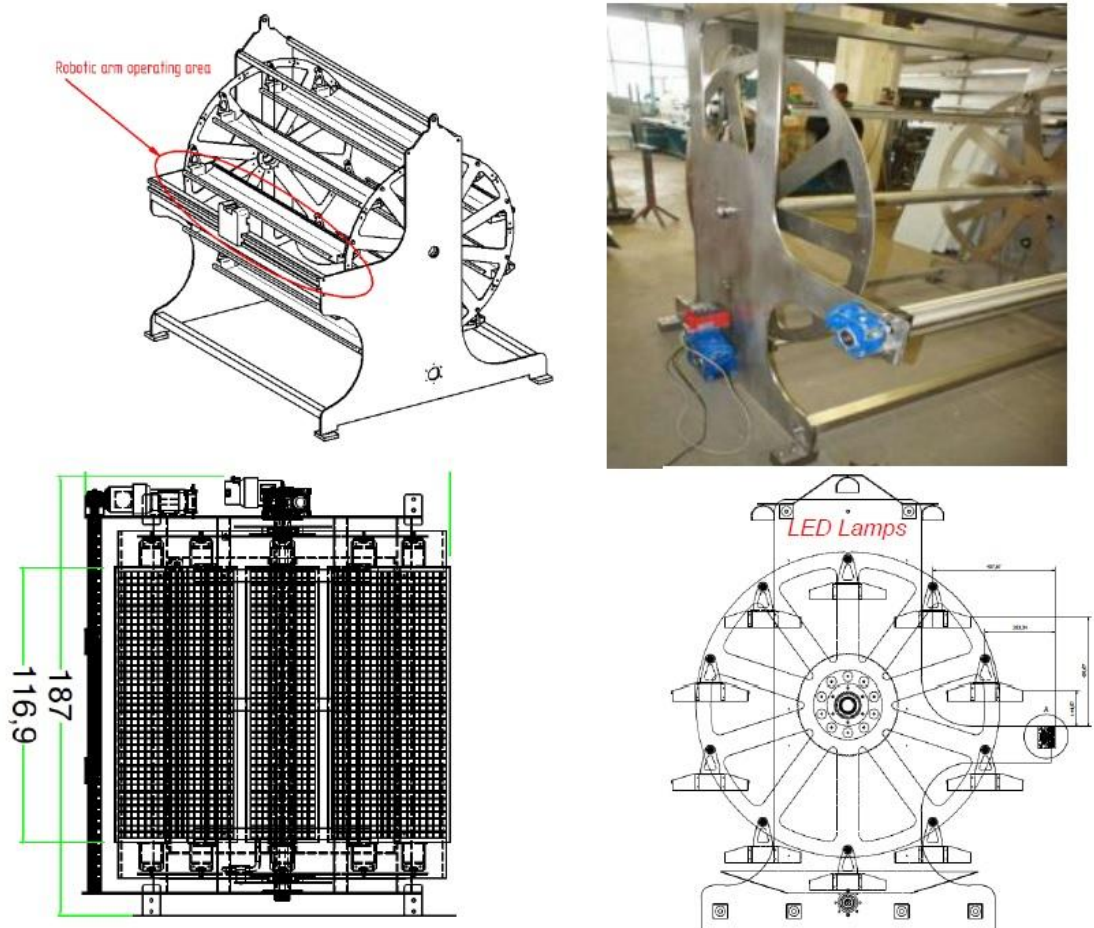
Il sistema di condizionamento dell'aria è stato progettato per consentire un condizionamento dell'unità di crescita, ovvero soltanto di una parte del container, nello

specifico la porzione isolata dalla zona di comando mediante un pannello di policarbonato.

Nel corso dell'utilizzo ordinario del prototipo non è prevista presenza umana nel container, fatta eccezione per brevi visite di controllo da parte del personale quando il serbatoio dell'acqua vada nuovamente riempito.

Il sistema è costituito da un condensatore, un evaporatore ed un pannello di controllo. Dal momento che tutti i protocolli di crescita prevedono valori costanti di umidità e temperatura per l'intero ciclo, tale sistema ha un pannello di controllo indipendente dal sistema di controllo centrale della camera di crescita (Fig. 37).

#### 2.1.3.4. Il tamburo rotante



**Figura 38. Tamburo rotante**

La camera di crescita è quasi totalmente occupata da un tamburo rotante costituito da 10 ripiani in rotazione continua (Fig. 38). Ogni ripiano può alloggiare fino a 2 vassoi multiplug di dimensioni 53 x 31.5 cm. Utilizzando 2 vassoi per ripiano, la superficie di lavoro disponibile è di

circa 15 m<sup>2</sup> e l'ambiente da condizionare ha un volume netto di 6.5 m<sup>3</sup>. Il peso totale dell'unità comprensiva dei vassoi e del sistema di condizionamento dell'aria è inferiore a 500 Kg.

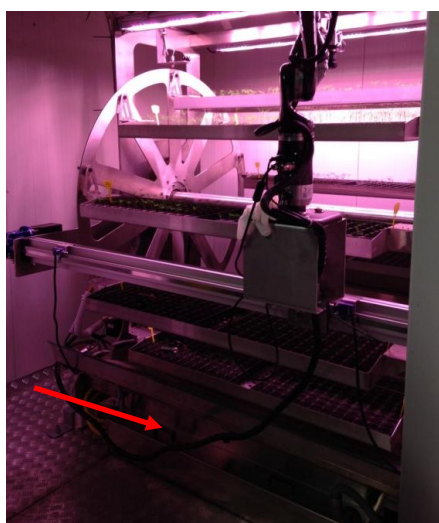
Un binario orizzontale per il movimento del braccio robotico è posizionato esattamente al metà altezza del tamburo, sul lato anteriore esposto all'utilizzatore manuale.

#### **2.1.3.5. Sistema di irrigazione**

Il sistema di irrigazione selezionato per il prototipo è di tipologia a flusso e riflusso.

I vassoi alloggiati sui ripiani del tamburo rotante restano temporaneamente immersi (un ripiano per volta) per qualche centimetro in un reservoir dell'acqua posizionato nella parte basale della camera di crescita (Fig. 39). Attraverso la struttura forata del ripiano e i fori di fondo del vassoio, l'acqua risale nel suolo per capillarità. L'immersione dei vasi ha una durata dipendente dalla tipologia di suolo, di pianta, dal volume dei vassoi e può essere ripetuta più volte durante la giornata. Il sistema è automatizzato, dunque il programma di irrigazione viene impostato a livello centrale senza la necessità di intervento dell'operatore tranne che nei casi in cui i sensori ionici segnalino la necessità di aggiunta di sali all'acqua, impoverita da una serie di cicli irrigui.

All'inizio del ciclo di irrigazione, il reservoir viene riempito a partire dall'acqua contenuta in un serbatoio di stoccaggio dotato di lampada battericida. L'acqua in uscita ritorna al serbatoio dove viene disinfettata per poter essere riciclata.



**Figura 39. Immagine della camera di crescita con in evidenza il reservoir dell'acqua del sistema di irrigazione**

#### 2.1.3.6. Braccio robotico



**Figura 40. Braccio robotico prima e dopo il montaggio**

Il braccio robotico (Fig. 40), prodotto dalla ditta Robosoft, si compone di tre articolazioni che ne consentono ampie possibilità di movimento nonché la possibilità di sostenere una serie di strumenti:

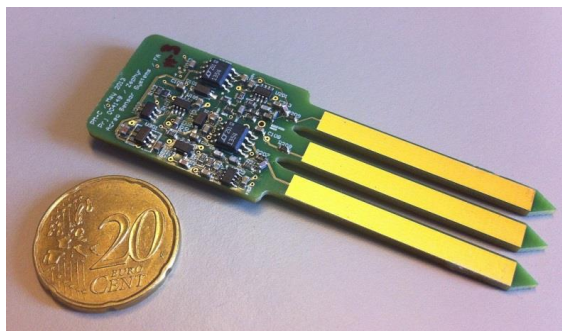
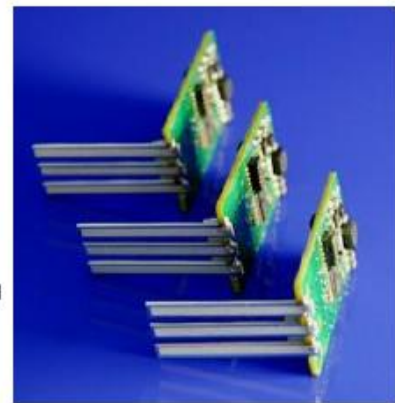
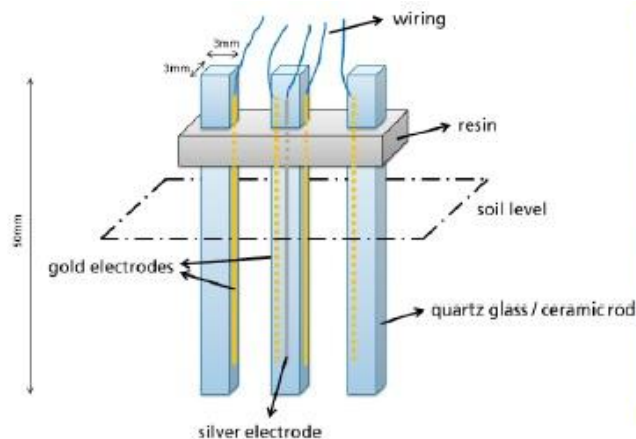
1. una fotocamera stereoscopica costituita da 2 fotocamere (Acreo®) per l'analisi dell'accrescimento delle piante.
2. Un set di luci costituito da 5 luci LED da assemblare attorno alla fotocamera stereoscopica per illuminare l'area di saggio in maniera uniforme.
3. Una fotocamera di assistenza.
4. Una pinza per effettuare trapianti di semenzali e manipolazioni da parte dell'operatore all'interno della camera con l'ausilio della camera di assistenza.

Le principali caratteristiche del braccio robotico sono le seguenti:

- 6 gradi di libertà in termini di movimento DOF

- Peso totale: 5 Kg
- Carico Massimo sostenibile: 1,5 Kg (1 Kg in estensione completa)
- Massima estensione: 90 cm
- Massima velocità lineare: 15 cm/s
- Temperatura di utilizzo: 0 – 30 °C

#### 2.1.3.7. Sensori sottosuolo



**Figura 41. Sensori wireless per il monitoraggio del substrato**

Per monitorare in remoto le condizioni di umidità e concentrazione ionica del suolo all'interno dei vassoi sono stati ideati dei sensori wireless definiti *stick sensors*, in virtù della loro conformazione a bastoncino, ideale per poter essere inseriti in verticale all'interno dei vassoi (Fig. 41). Il rilevamento del contenuto di acqua e di ioni totali nel suolo avviene su base elettrica (metodo dell'impedenza elettrica).

La concentrazione specifica dei singoli ioni era stato inizialmente inserito tra i propositi secondari del progetto ma il metodo di analisi necessario, differente rispetto a quello necessario per il rilevamento del contenuto di acqua, è risultato troppo complesso per poter essere miniaturizzato su uno *stick sensor*, compatibilmente con il budget prefissato per tale fase progettuale.

Nell'ambito del progetto Zephyr l'acqua viene riciclata all'interno del sistema. Di conseguenza, nel corso di una serie di cicli di irrigazione, in seguito all'assorbimento progressivo di acqua da parte dei semenzali, si ha un impoverimento in termini di quantitativo di sali disciolti (soprattutto se si utilizza acqua di rubinetto). Il sensore ionico consente di identificare il momento in cui è necessario aggiungere sali per ripristinare le condizioni originali. Se da una parte i sensori, connessi al sistema di controllo centrale, devono consentire di evitare il raggiungimento di livelli minimi critici di sali nell'acqua, allo stesso modo essi devono consentire di mantenere il sistema lontano da situazioni di rischio in cui si raggiunga una concentrazione di sali che possa risultare tossica per le piante.

Gli elettrodi che vanno a comporre i sensori sono stati prodotti utilizzando la tecnica innovativa di stampa definita come *screen printing*, che prevede l'utilizzo di una maschera o stencil per delimitare una zona scoperta dove l'inchiostro è libero di aderire al substrato in seguito ad una pressione meccanica esercitata tipicamente mediante un rullo. I laboratori dell'IFAM di Brema dispongono di una linea di produzione basata su tale tecnica, totalmente robotizzata.

I principali vantaggi dei sensori wireless sono i seguenti:

- minor costo rispetto ai sensori dotati di filo;
- il loro numero e posizione possono essere facilmente modificati a seconda del protocollo di coltivazione;
- nessuna necessità di ricostituzione delle connessioni in caso di variazioni nella disposizione dei sensori.

#### **2.1.3.8. Sensori ottici**

La camera di crescita è stata dotata di una fotocamera stereoscopica costituita da due camere poste a breve distanza tra loro, finalizzata all'acquisizione di immagini successivamente analizzate mediante particolari algoritmi (Fig. 42). I parametri che è

possibile analizzare sono essenzialmente tre: il valore dell'altezza dello stelo, l'area fogliare totale e la biomassa dei semenzali.

Inizialmente era stato ipotizzato di aggiungere al sistema sensoriale ottico anche uno strumento di valutazione della concentrazione di clorofilla, effettuabile mediante autofluorescenza. Così come precedentemente descritto per i sensori ionici, anche in questo caso un simile dispositivo avrebbe causato uno sforamento del budget prestabilito.

Ad ogni modo, l'analisi della fluorescenza della clorofilla fornisce potenzialmente maggiori informazioni relative allo stato di benessere di una pianta rispetto alla semplice analisi di immagine ma, in un contesto come quello della camera di crescita Zephyr destinata alla produzione commerciale di semenzali, equipaggiata con una camera stereoscopica in grado di fornire informazioni relative all'altezza ma anche alla biomassa epigea dei semenzali, l'analisi della fluorescenza risulta superflua.

*Estrazione del greenness:* la valutazione della biomassa verde delle piante avviene mediante un'analisi HSV dei dati ricavati da un'immagine. L'acronimo HSV (*hue-saturation-value*) indica il valore di saturazione di una certa tonalità, in questo caso del verde. Un parametro essenziale è la ripetibilità delle condizioni luminose, il che ha condotto alla scelta di inserire una serie di LED attorno alla fotocamera stereoscopica sostenuta dal braccio robotico. In particolare, la luce dell'ambiente di analisi non deve essere ricca di verde, preferibilmente una luce azzurrognola, in grado di incrementare il contrasto tra lo sfondo grigio e le piante verdi.

*Analisi stereografica:* la crescita dei semenzali all'interno dei singoli vassoi viene monitorata mediante valutazione dell'altezza media per vasoio ricavata dall'analisi delle immagini acquisite mediante la fotocamera stereoscopica sostenuta dal braccio robotico.

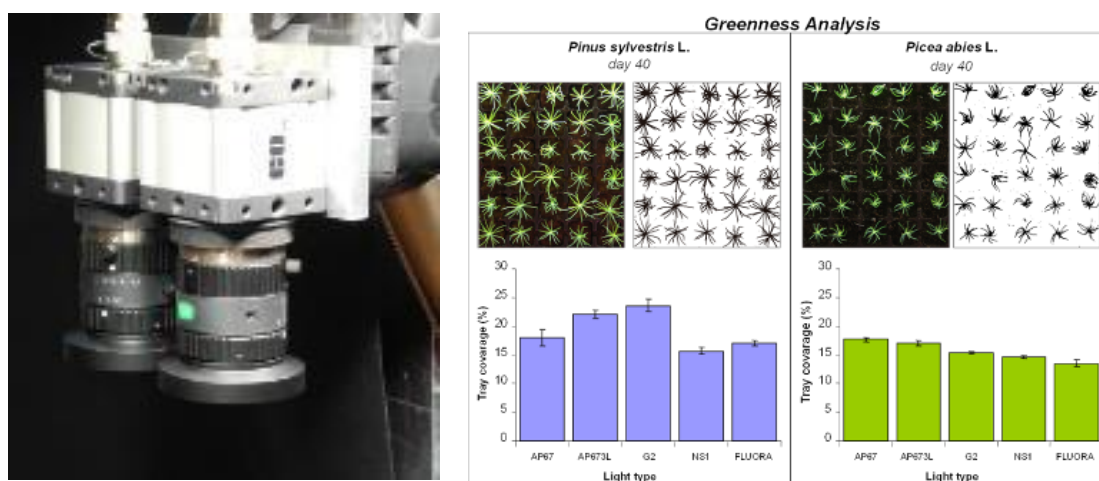
La fotocamera stereoscopica è un particolare tipo di fotocamera dotata di due obiettivi paralleli, posti alla medesima distanza degli occhi umani (6.35 cm). Questo permette alla fotocamera di simulare la visione binoculare e quindi di creare immagini tridimensionali.

La stereoscopia è nata quasi contestualmente alla fotografia, alla fine dell'800: già allora era stato dimostrato che se un oggetto fosse stato fotografato da due fotocamere o da due obiettivi distinti, contemporaneamente, e se le due immagini ottenute fossero state osservate in modo che l'occhio sinistro potesse vedere la sola immagine scattata dalla macchina o dall'obiettivo di sinistra e l'occhio destro quella destra, l'osservatore avrebbe percepito, esattamente come nella realtà, anche la "profondità del soggetto inquadrato", in una parola, il rilievo. Proprio a causa del fatto che i sistemi per tenere separate le due immagini per gli occhi sono decisamente più macchinosi rispetto alla visione classica di una fotografia, la

stereoscopia non ha mai avuto grandi consensi di pubblico, neppure quando Edwin Land, con l'invenzione delle lenti polarizzanti, riuscì ad applicare la stereoscopia anche alla cinematografia: i grandi fruitori furono soprattutto gli americani e ancora oggi la stereoscopia è vista come un curioso *entertainment*, ed è applicata soprattutto alla cinematografia con il puro fine della spettacolarità.

Le immagini ottenute mediante una fotocamera stereoscopica vengono analizzate allo scopo di studiarne la profondità mediante software di *ray tracing*. Il *ray tracing* è una tecnologia che ricostruisce il percorso (ipotetico e reale, nel caso della computer grafica 3D) fatto dai raggi di luce e lo percorre al contrario, dagli oggetti verso la fonte luminosa. Il termine viene utilizzato anche per un preciso algoritmo di Rendering nel campo della Computer grafica 3D, in cui le visualizzazioni delle scene, modellate matematicamente, vengono prodotte usando una tecnica che segue i raggi partendo dal punto di vista della telecamera piuttosto che dalle sorgenti di luce.

Avendo due immagini dello stesso vassoio a confronto, è possibile estrarre i valori delle altezze dei semenzali correlando le coppie di pixel. Il software di analisi delle immagini è stato sviluppato da Acreo ® e si chiama *uEyeDualcam HeightMap*.



**Figura 42. Fotocamera stereoscopica per l'analisi del greenness**

#### 2.1.4. Specie considerate

Il progetto Zephyr si è focalizzato sul tentativo di propagare in ambiente controllato una lunga lista di specie forestali arboree ed arbustive europee, caratteristiche della zona temperata:

- *Abies alba* Mill.
- *Arbutus unedo* L.
- *Arctostaphylos uva-ursi* L.
- *Azorina vidalii*
- *Castanea sativa* Mill.
- *Cornus sanguinea* L.
- *Coryus avellana* L.
- *Crataegus monogyna* Jacq.
- *Fagus sylvatica* L.
- *Frangula azorica*
- *Fraxinus excelsior* L.
- *Fraxinus ornus* L.
- *Hypericum foliosum* Aiton
- *Juniperus brevifolia* (Seub.) Antoine
- *Myrtus communis* L.
- *Picea abies* L.
- *Pinus nigra* J.F. Arnold
- *Pinus sylvestris* L.
- *Platanus orientalis* L.
- *Populus nigra* L.
- *Prunus avium* L.
- *Prunus azorica* L. ssp. *azorica* (Mouillefert) Franco
- *Punica granatum* L.
- *Quercus ilex* L.
- *Quercus ithaburensis* var. *macrolepis* (Kotschy) Hedge & Yalt
- *Quercus suber* L.
- *Sambucus nigra* L.
- *Taxus baccata* L.

- *Vitex agnus-castus L.*

## 2.1.5. Attività svolte presso l'UNITUS

### 2.1.5.1. Definizione dei protocolli di coltivazione indoor

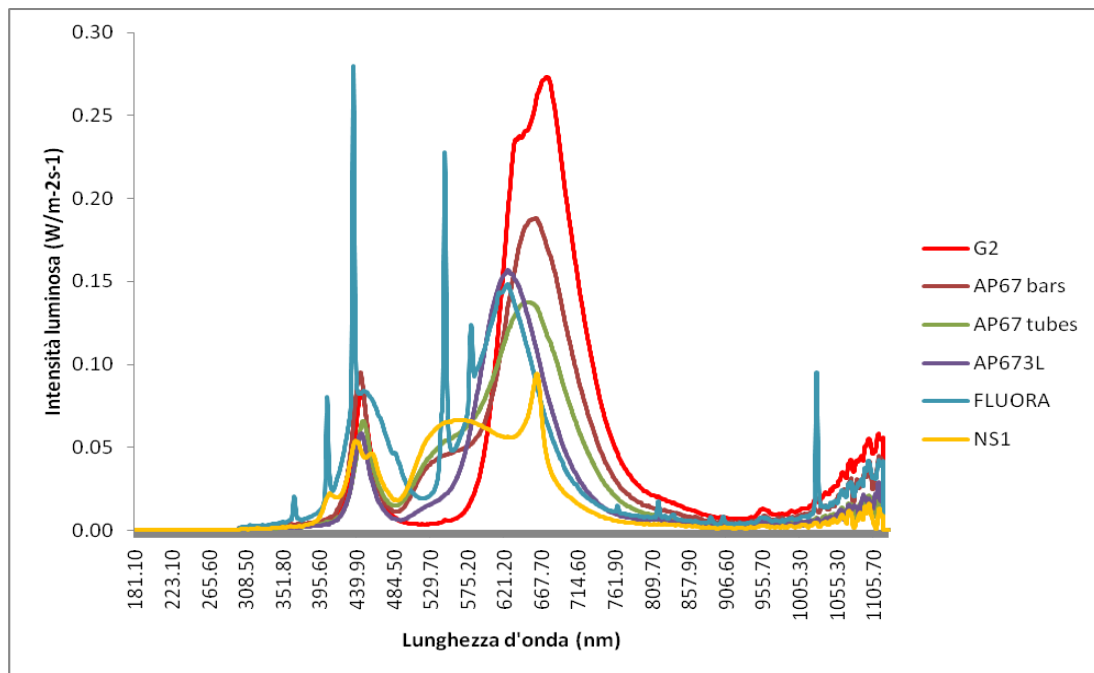
#### 2.1.5.1.1. Selezione delle fonti luminose

Al fine di confrontare da un lato le performance di crescita delle varie specie sotto lampade a fluorescenza e LED e dall'altro di valutare differenze di sviluppo legate alla qualità spettrale delle lampade, sono stati testati 6 spettri, uno a fluorescenza (spettro di controllo) e 5 differenti spettri LED prototipali dell'azienda Valoya® (Tab. 1; Fig. 43):

- OSRAM L36W/77 FLUORA (tubiformi, 4 lampade, lunghezza 120 cm)
- Valoya AP67 (a barra, 2 lampade, lunghezza 120 cm)
- Valoya L20 AP67 (tubiformi, 4 lampade, lunghezza 120 cm)
- Valoya AP673L (a barra, 2 lampade, lunghezza 120 cm)
- Valoya G2 (a barra, 2 lampade, lunghezza 120 cm)
- Valoya NS1 (a barra, 2 lampade, lunghezza 120 cm)

| <b>Bande di luce</b> | <b>Blu</b>        | <b>Giallo-verde</b> | <b>Rosso vicino</b> | <b>Rosso lontano</b> |
|----------------------|-------------------|---------------------|---------------------|----------------------|
| <b>Lung. onda</b>    | <b>400-500 nm</b> | <b>500-600 nm</b>   | <b>600-700 nm</b>   | <b>700-800 nm</b>    |
| <b>AP673L</b>        | 11.9 %            | 19.3 %              | 60.5 %              | 8.3 %                |
| <b>AP67 bars</b>     | 13.8 %            | 15.1 %              | 53 %                | 18.1 %               |
| <b>G2</b>            | 7.7 %             | 2.4 %               | 64.4 %              | 25.5 %               |
| <b>NS1</b>           | 20.2 %            | 38.9 %              | 35.7 %              | 5.2 %                |
| <b>AP67 tubes</b>    | 10.5 %            | 26.2 %              | 48.9 %              | 14.4 %               |
| <b>Fluora</b>        | 34.8 %            | 24.1 %              | 36.7 %              | 4.4 %                |

**Tab. 1. Composizione spettrale delle lampade utilizzate espressa come percentuale di bande di luce in un range compreso tra 400 e 800 nm**

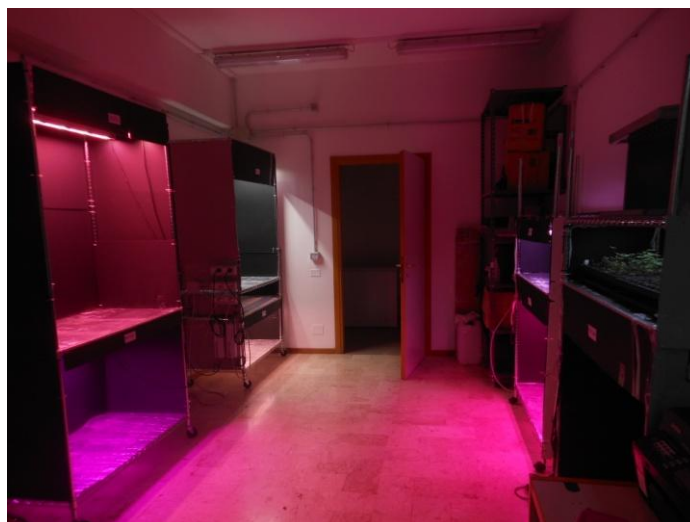


**Figura 43. Spettri luminosi delle lampade utilizzate nel lavoro di tesi**

Tali spettri sono stati selezionati sulla base di progetti precedentemente svolti presso il Dipartimento DAFNE. Nello specifico le fonti luminose di tipologia AP67 e G2, avendo dimostrato buoni risultati nel progetto Regen Forest, sono state risSelected mentre NS2, avendo mostrato ritardi nella crescita, è stata sostituita dal nuovo spettro NS1. AP673L è stata introdotta in sostituzione di AP67 ARCH, un ulteriore spettro utilizzato nel progetto Regen Forest. Sempre sulla scia dei progetti precedenti, Valoya ha introdotto per il progetto Zephyr anche una nuova tipologia di lampada LED a tubo, come diretta sostituzione dei tubi a fluorescenza (L20 AP67).

Le lampade sono state montate su scaffali (1 differente spettro per ripiano) all'interno di una stanza climatizzata presso l'Università degli Studi della Tuscia (Fig. 44).

La distanza tra ripiano e lampade è stata definita al fine di assicurare a livello dei vassoi una intensità luminosa pari a  $120 \pm 20$  PPFD, con una media di 80-100 cm.



**Figura 44. Stanza climatizzata allestita presso l'UNITUS per la coltivazione indoor di specie forestali**

#### **2.1.5.1.1.1. Proprietà degli spettri selezionati**

**Valoya AP67 bars e AP67 tubes (L20):** nonostante la differenza strutturale delle due lampade (a barra o a tubo), lo spettro luminoso emesso da queste due fonti è il medesimo. Da studi effettuati su specie agrarie lo spettro AP67 risulta in grado di incrementare la biomassa, indurre la fioritura e garantire un ottimale sviluppo dell'apparato radicale. All'occhio umano la luce fornita da tali lampade appare rosata.

**Valoya AP673L:** si tratta di uno spettro ad alta percentuale di rosso, con percentuali rilevanti di blu e rosso lontano. Ha dato ottimi risultati con lattughe e specie erbacee. All'occhio umano la luce appare di una tonalità pesca.

**Valoya G2:** è uno spettro ad alta percentuale di rosso e rosso lontano, molto povero di blu. All'occhio umano appare rosa intenso. Nel corso del progetto Regen forest ha mostrato una forte capacità di indurre l'accrescimento dell'apparato radicale delle specie arboree.

**Valoya NS1:** è uno spettro ad alta intensità e tra gli spettri Valoya è quello che maggiormente si avvicina al reale spettro solare. All'occhio umano appare bianco. La vicinanza allo spettro solare lo rende potenzialmente utile per limitare gli shock in fase da trapianto dei semenzali cresciuti in ambiente artificiale destinati al trasferimento in campo aperto.

Lo spettro di controllo **OSRAM L36W/77 Fluora** è ampiamente diffuso nel settore ortoflorovivaistico.

## **2.1.5.1.2. Selezione del substrato**

### **2.1.5.1.2.1. Il substrato Jiffy Preforma**

Il substrato inizialmente selezionato per condurre le prove di crescita nell'ambito del progetto Zephyr è risultato essere il VECO3 Preforma Plug-OB, costituito da terreno Jiffy®, torba di sfagno e fibra di cocco.

Per rispondere alle esigenze dei coltivatori moderni, la maggior parte dei prodotti Jiffy è progettata per essere utilizzata con i sistemi di automazione che sono oggi disponibili in ogni serra. In particolare, il sistema di coltivazione in zollette Preforma è divenuto parte importante dell'industria della coltivazione in serra, dell'orticoltura, della produzione di talee e della propagazione forestale in tutto il mondo.

Un agente legante aggiunto ai substrati consente alle zollette di mantenere la propria forma (stabilita sulla base del contenitore selezionato dall'acquirente) nel corso dell'utilizzo.

Si tratta di un substrato sterile con un pH bilanciato ed è raccomandabile che il valore si mantenga tra 6 e 7. Essendo dotati di una quota di nutrienti, non necessitano dell'utilizzo di soluzioni nutrienti in sostituzione dell'acqua.

#### *Proprietà fisiche e idrauliche del substrato Jiffy Preforma (Fig. 45)*

Il termine “riserva utilizzabile” (*total available water*) è un parametro chiave nel campo dell'irrigazione che indica la capacità del suolo di trattenere acqua disponibile per le piante. Dopo pesanti precipitazioni o intense irrigazioni, il suolo drena acqua fino al raggiungimento della capacità di campo, ovvero la quantità massima di acqua che un terreno ben drenato può trattenere contro la forza di gravità o il quantitativo di acqua residua nel momento in cui il drenaggio mostra un drastico rallentamento. In assenza di una somministrazione ulteriore di acqua, il contenuto idrico della zona radicale decresce come risultato dell'assorbimento da parte delle radici delle piante. Man mano che l'assorbimento procede, l'acqua residua viene trattenuta dalle particelle di suolo con forza intensa, il che rende progressivamente più complesso un ulteriore assorbimento da parte delle piante. Il punto in corrispondenza del quale non è possibile alcun assorbimento ulteriore è

detto punto di appassimento (*wilting point*) (FAO, 1998). La riserva utilizzabile si può dunque definire come la differenza tra la quantità di acqua presente nel suolo alla capacità di campo e al punto di appassimento. Per suoli naturali generalmente si utilizzano valori di pressione pari a -10 o -30 kPa per la capacità di campo e -1500 kPa per il punto di appassimento (FAO, 1979). Prima del raggiungimento del *wilting point* è possibile identificare una soglia al di sotto della quale le forze di attrazione tra matrice solida e particelle di acqua risultano così elevate da generare delle difficoltà di estrazione da parte delle piante con rallentamento del trasporto dalle radici alle foglie e impossibilità di compensazione delle perdite per traspirazione, entrando così in uno stato di stress (FAO, 1998). La frazione di riserva utilizzabile che la pianta può estrarre prima di entrare in uno stato di stress idrico è detta “riserva facilmente utilizzabile (*easy available water* - EAW) ed assume valori variabili in base al tipo di suolo, alla specie, alla profondità delle radici e al sistema di irrigazione impiegato. Boodt e Verdonck (1992) la definirono come differenza tra il contenuto di acqua in corrispondenza di una aspirazione pari a 1 e 5 kPa (Raviv, 2007).

#### Results Physical research



#### Data on analyzed product:

Company name : Jiffy Products International BV  
 Type of product: **VECO3 Preforma plug - OB**  
 Remarks: PR-38655, 90%  
 Start date: 16.07.2010  
 Analysis nr. :

#### Analysis Results:

Moisture: 84 %  
 Organic matter: 93 %  
 Bulk density: 82 kg/m<sup>3</sup>  
 Shrinkage: 36 %  
 Pore volume: 95 %  
 EAW:\* 10 %

Composition  
 Cocopeat  
 Peat

\*Easy Available Water

#### Data at different pressure heights:

|                       | Pressure height in centimeters |     |     |     |     |
|-----------------------|--------------------------------|-----|-----|-----|-----|
|                       | -3                             | -10 | -20 | -32 | -50 |
| Volume % water        | 55                             | 52  | 49  | 47  | 42  |
| Volume % air          | 40                             | 43  | 46  | 48  | 53  |
| Water quantity in OM* |                                | 6,8 |     |     |     |

\*Water quantity of organic matter in g/g OM

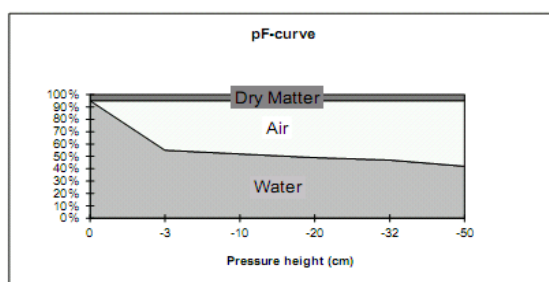


Figura 45. Proprietà idrauliche del substrato Jiffy Preforma

#### **2.1.5.1.2.2.      Analisi delle proprietà idrauliche del suolo, sotto lampade LED e a fluorescenza, in assenza di piante**

Si è scelto di esprimere l'umidità dei panetti di suolo come percentuale in volume di acqua totale, assumendo come volume totale occupabile il valore del volume occupato dai pori.

**Percentuale in volume di acqua =**

**(peso totale del panetto umido – peso della materia secca)/ volume totale dei pori**

- **Proprietà fisiche del substrato Jiffy Preforma:**

Densità apparente:  $0.082 \text{ g/cm}^3$

Porosità: 95% del volume totale

Materia secca: 5% del volume totale

Volume del panetto:  $27 \text{ cm}^3$

Volume totale dei pori: 95% di  $27 \text{ cm}^3 = 25.65 \text{ cm}^3$

Volume occupato dalla materia secca: 5% di  $27 \text{ cm}^3 = 1.35 \text{ cm}^3$

Peso della materia secca: volume materia secca \* densità apparente =

$1.35 \text{ cm}^3 * 0.082 \text{ g/cm}^3 = 0.11 \text{ g}$

In assenza di piante, la perdita giornaliera di acqua (corrispondente alla perdita in peso fresco) da parte del suolo è causata solo dall'evaporazione.

Nell'ottica di valutare l'evaporazione giornaliera dei panetti di suolo esposti a luci LED e a fluorescenza all'interno di una camera di crescita, è stato monitorato il peso fresco di 12 panetti Jiffy da  $27 \text{ cm}^3$  di volume, inizialmente saturati (~80% di umidità), al tempo 0 e dopo 3-5-6-7-10 giorni. Le condizioni in cui sono stati incubati sono state le seguenti (Tab. 2):

|                                   |                                                                        |                                                                       |
|-----------------------------------|------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| <b>Tipologia di illuminazione</b> | Luci LED                                                               | Lampade a fluorescenza                                                |
| <b>Umidità relativa dell'aria</b> | ~ 70%                                                                  | ~ 70%                                                                 |
| <b>Temperatura</b>                | 22°C                                                                   | 22°C                                                                  |
| <b>Aerazione</b>                  | Sistema di aerazione indipendente (basato su ventole) per ogni ripiano | Sistema di aerazione generale (basato su ventole) per tutti i ripiani |

**Tab. 2. Condizioni di incubazione dei panetti di suolo**

#### **2.1.5.1.2.3. Selezione del sistema di irrigazione**

Sulla base delle proprietà fisiche ed idrauliche del substrato Preforma, nell'ambito del progetto Zephyr si è stabilito di selezionare un metodo di irrigazione comunemente utilizzato per le coltivazioni idroponiche, scegliendo tra un sistema a goccia ed uno a subirrigazione. Nel caso di specie latifoglie, il sistema a goccia può presentare seri limiti, soprattutto considerando dei vassoi ad alta densità di semenzali come i multiplugs. L'acqua tende difatti a fermarsi sulle foglie superiori laddove è possibile che si formino dei depositi calcarei, causando così una limitazione della traspirazione. Un sistema a subirrigazione risulta dunque essere più vantaggioso.

Fin quando i semenzali siano dimensioni limitate, l'acqua viene persa essenzialmente per evaporazione dagli strati superficiali del panetto di terra ma una volta che le foglie si siano espanse al punto da coprire totalmente il suolo, la traspirazione diventa il processo primario nella regolazione dell'equilibrio idrico del sistema. Nelle prime fasi di sviluppo è dunque necessario mantenere gli strati superficiali del suolo ben inumiditi e tale scopo può essere raggiunto associando un sistema a subirrigazione con dei nebulizzatori dall'alto.

#### **2.1.5.1.2.4. Definizione del tempo minimo di immersione dei vassoi in acqua**

Partendo da un vassoio da 104 alloggiamenti (Herkuplast® QPD104VW), ognuno contenente un panetto di Jiffy Preforma da 27 cm<sup>3</sup>, conservato a 4°C per alcune settimane e caratterizzato da un contenuto in volume di acqua pari al 44.4%, è stato misurato il tempo minimo di immersione necessaria affinché il terreno raggiunga nuovamente il 52% in volume di acqua (limite superiore del range EAW), a temperatura ambiente e senza sistemi di aerazione a ventole attivi.

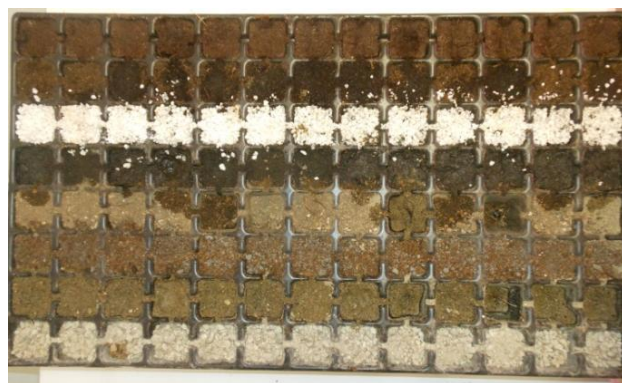
Il panetto inumidito è stato dunque posizionato sotto lampade LED Valoya® per calcolare il tempo necessario al raggiungimento del limite inferiore del range EAW pari al 42% di acqua (v/v), in presenza e assenza di ventole attivate.

#### **2.1.5.1.2.5. Valutazione di substrati alternativi**

Il limite maggiore del substrato Jiffy Preforma è risultato essere il difficile controllo del processo di disidratazione rapida, che può causare problemi gestionali in assenza di un sistema di irrigazione automatizzato e dotato di temporizzatore. Come precedentemente descritto, infatti, il terreno Jiffy necessiterebbe di molteplici cicli di irrigazione giornalieri per mantenere il substrato entro il range dell'EAW.

Si è dunque stabilito di valutare substrati alternativi, utilizzati comunemente nei vivai italiani, al fine di studiarne il comportamento idraulico (Fig. 46):

- Jiffy Preforma
- Substrato misto 1 (20:10:1; Substrato a base di torba scura Brill Type 3 Special : perlite: sabbia di fiume)
- 100% perlite
- 100% pozzolana
- Substrato misto 2: ½ Substrato a base di torba scura Brill Type 3 Special, ½ pozzolana
- 100% sabbia di fiume
- 100% pomice

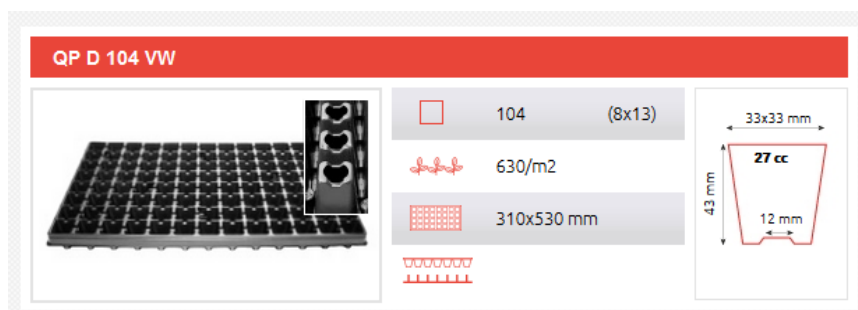


**Figura 46. Analisi delle proprietà idrauliche di differenti substrati**

#### **2.1.5.1.3. Selezione del contenitore**

Tra gli obiettivi del progetto Zephyr vi è una produzione di semenzali ad alta densità attraverso un ciclo di produzione di circa 30 giorni. Pertanto si è stabilito di utilizzare una tipologia di vassoio multiplug, tenendo in considerazione il volume minimo di substrato necessario per la semina e l'accrescimento, nel corso del primo mese post germinazione, delle specie in esame, nonché le dimensioni dei ripiani del prototipo e la distanza prevista tra ripiano e lampade.

Considerando una dimensione del ripiano di 120\*60 cm e una distanza di circa 30 cm tra ripiano e fonti luminose, è stato selezionato come vassoio più idoneo il QPD104VW della ditta Herkuplast®, di dimensioni 310\*530 mm, costituito da 104 alloggiamenti di 27 cc l'uno, alti 43 mm (Fig. 47). Su ciascun ripiano è stato dunque possibile coltivare in contemporanea due vassoi ognuno contenente semi di una singola specie.



**Figura 47. Contenitore multiplug selezionato per la pre-coltivazione di specie forestali**

#### 2.1.5.2. Specie oggetto di studio durante il dottorato

- *Corylus avellana* L.
- *Frangula azorica* Grubov
- *Fraxinus excelsior* L.
- *Fraxinus ornus* L.
- *Hypericum foliosum* Aiton
- *Laurus azorica* (Seub.) Franco
- *Morella Faya* (Aiton) Wilbur
- *Platanus orientalis* L.
- *Prunus lusitanica* L. ssp. *azorica* (Mouillefert) Franco
- *Quercus suber* L.
- *Taxus baccata* L.

#### *Corylus avellana* L.



**Nome scientifico:** *Corylus avellana* L.

**Nome comune:** Nocciolo

**Famiglia:** Betulaceae

Il nocciolo è un arbusto a foglie caduche, alto in media 4-7 m (ma può raggiungere anche i 10 m), dotato di notevole facoltà pollonifera, poco longevo (generalmente inferiore al secolo), a rapida crescita nei primi anni, ramificato fin dalla base in più fusti che deperiscono dopo circa 20-30 anni e vengono rimpiazzati da nuovi polloni che possono anche affrancarsi. A volte può assumere portamento ad alberetto (monocormico); ha chioma fitta e densa. La corteccia è marrone-grigiastra, rapidamente glabra, con lenticelle più chiare ben evidenti e solchi longitudinali. Il ramo dell'anno è coperto da una pubescenza rossastra rada di origine ghiandolare; dal secondo anno il ritidoma si sfoglia

in una sottile pellicola. Le gemme, globose, pluriperulate, glabre e di colore bruno chiaro, sono portate spiralate.

Le foglie sono alterne, semplici, picciolate (0,5-2 cm) con stipole caduche. Sono obovate, spesso anche leggermente lobate, cordate alla base, grossolanamente e doppiamente dentate, acuminate all'apice, molli e vellutate al momento del germogliamento, verde scuro e sparsamente pelose superiormente, più chiare e tomentose di sotto.

I fiori maschili sono riuniti in gruppi di 2-4 amenti cilindrici e penduli, ibernanti, lunghi 3-7 cm all'antesi e sono privi di perianzio. I fiori femminili sono dotati di perianzio concresciuto con l'ovario e sono riuniti in piccolissimi amenti dall'aspetto gemmiforme. All'antesi si evidenziano per gli stigmi rosso vivo che fuoriescono. La fioritura è molto precoce, andando da dicembre a febbraio/marzo. In primavera le gemme fiorali si aprono e formano un breve rametto foglioso che all'apice porta l'infiorescenza con gli stigmi ormai secchi. Il frutto (nocciola) maturante in settembre, è un achenio globoso di 15-20 mm di diametro, solitario o a gruppi di 2-4, protetto in maniera incompleta da un involucro campanuliforme di consistenza fogliacea, irregolarmente dentato o lobato-laciniato all'apice. Il pericarpo è legnoso, dapprima verdognolo poi bruno, con un ilo grande come la base stessa. Le nocciole non vengono prodotte ogni anno; il processo dipende da molteplici fattori quali le condizioni meteorologiche primaverili (incidenza delle gelate tardive). Generalmente è più alta la probabilità di trovare nocciole su alberi di piccole dimensioni in piena luce. I noccioli che si sviluppano all'ombra di altri alberi alti raramente fioriscono e producono nocciole. La specie può svilupparsi in semiombra o in assenza di ombra. Può svilupparsi in forma di comunità arbustiva su terreni calcarei esposti, preferendo terreni basici o neutri. La pianta può tollerare forti venti ma non esposizioni marittime.

Il seme ha germinazione ipogea e dà luogo a semenzali che formano foglie quasi simili alla forma adulta.

L'apparato radicale è fittonante all'inizio, poi si espande rimanendo superficiale. Il legno poco durevole è utile per lavori al tornio, per paleria, cerchi da botte etc. Il carbone serve a preparare polvere pirica e apprezzati carboncini da disegno. Il nocciolo è ampiamente distribuito su gran parte del continente europeo, dalla Bretagna alla Scandinavia a nord, fino ai monti Urali in Russia a est e fino a Spagna, Italia e Grecia a sud. Inoltre lo si ritrova in Marocco, Algeria, Turchia, Iran e nella regione caucasica.

Preferisce un clima oceanico con inverni miti, dal momento che la fioritura è molto precoce. Cresce fino a 610 m di altitudine, sviluppandosi nel sottobosco o ai margini dei boschi di conifere e latifoglie, dal Castanetum al Picetum. Normalmente viene ceduto ogni 10-12 anni.

La formazione delle gemme e l'entrata in dormienza sono fenomeni indotti dal giorno corto mentre la ripresa vegetativa è correlata al termoperiodo.

Essa rappresenta la specie più importante del genere *Corylus* in Europa. Si presenta come specie semi pioniera, occupando facilmente campi abbandonati. Ha un grande valore alimentare ed economico grazie alla produzione delle nocciole, soprattutto in Italia e nella provincia di Viterbo. Le nocciole sono molto ricche in folati, vitamina E, riboflavina, niacina, tiamina, acido pantotenico, piridossina etc. per cui sono prescritte per prevenire anemia megaloblastica e microcitica e ancor più importante, difetti del tubo neurale del feto. Possiedono inoltre funzione antiossidante e sono ottime per abbassare il livello di colesterolo. Un altro potenziale farmaceutico è rappresentato dalla possibilità di estrarre dalle foglie il medesimo precursore del Paclitaxel, estraibile dal tasso.

### ***Frangula azorica* Grubov**



**Nome scientifico:** *Frangula azorica* Grubov

**Nome comune:** Frangola

**Famiglia:** Rhamnaceae

Si tratta di un piccolo albero con foglie semplici alternate, comunemente chiamato “sanguinho”. Manca delle spine caratteristiche della famiglia delle Rhamnaceae. I fiori hanno 5 petali e il frutto è rappresentato da bacche blu scuro. La specie appare vigorosa e persiste su terreni degradati. Si ritrova su tutte le isole dell’arcipelgo delle Azzorre, fatta eccezione per le isole Graciosa e Corvo. Nel passato è stato rinvenuto anche a Madeira, dove oggi si ritiene estinto. La specie si sviluppa nelle foreste di alloro e ginepro ad altitudini fino a 1000 metri. È classificata come specie a basso rischio nella Lista Rossa della IUCN ed inserita nell’allegato II della Direttiva europea Habitat e nell’appendice 1 della Convenzione sulla conservazione della vita selvatica e dell’ambiente naturale in Europa.

La rarefazione della specie è legata alla perdita degli habitat, in quanto gli alberi vengono eliminati per lasciare spazio all’agricoltura e per il recupero di legname. Anche l’espansione di specie invasive sta mettendo in seria difficoltà la specie. Le bacche mostrano un effetto lassativo, probabilmente causato da sostanze chimiche in grado di danneggiare anche le cellule del colon e promuovere la formazione di tumori. Pertanto, è sconsigliato l’utilizzo di tali frutti per periodi protratti.

### ***Fraxinus excelsior* L.**



**Nome scientifico:** *Fraxinus excelsior* L.

**Nome comune:** frassino maggiore

**Famiglia:** Oleaceae

Il frassino maggiore (*excelsior*) è quello che raggiunge le dimensioni maggiori potendo arrivare a 40 m di altezza e a 1 m di diametro; è un albero a rapido accrescimento e abbastanza longevo, emette polloni radicali e caulinari. Il tronco è dritto e slanciato

mentre la chioma appare poco ramosa e leggera, dapprima ovale e poi arrotondata. La corteccia, inizialmente liscia e verde-olivastra, diviene tardivamente grigio-bruna, finemente e densamente fessurata con il ritidoma persistente. I rami dell'anno sono robusti, lisci, verde-grigi, con lenticelle visibili. Le gemme hanno poche perule, nere e vellutate; quella terminale è grossa e piramidale, mentre le laterali sono più piccole e globose. Le foglie sono composte da 7-15 foglioline (lunghe 5-11 cm e larghe 1-4 cm), sessili o sub sessili (solo l'apicale è distintamente picciolettata), ovali, acuminate all'apice, non cuneate alla base, minutamente dentate ai margini con un numero di dentini che è maggiore delle nervature, verdi scure e glabre di sopra, più pallide nella pagina inferiore ma con la nervatura mediana pubescente. I fiori, riuniti in pannocchie dense, laterali, compaiono prima della fogliazione (marzo-aprile), sono privi di perianzio ed hanno stami molto brevi con grosse antere purpuree e violette. Le piante possono essere ermafrodite, poligame o unisessuali; secondo Picard (1982) le piante poligame e quelle maschili sono le più frequenti. La specie è ad impollinazione anemofila. Il frutto è una samara monosperma, lunga 30-40 mm, bruno chiara, appiattita, obovata-lineare, più o meno arrotondata alla base e matura verso settembre-ottobre. Il seme generalmente non raggiunge la metà dell'ala ed è profondamente dormiente. La plantula mostra cotiledoni ellittici, lunghi 3-4 cm, mentre le foglie primarie sono semplici e con margine dentato. Le gemme appaiono nere.

L'apparato radicale è molto sviluppato e giunge anche a grandi profondità.

Il legno, bianco-giallastro e poco differenziato è duro, pesante, tenace ed elastico, ricercato per la produzione di mobili pregiati. Dai pedali marezzati si ricava il cosiddetto "ebano grigio", molto stimato in ebanisteria.

L'areale del frassino maggiore occupa tutta l'Europa arrivando ad ovest fino all'Atlantico, dalle coste norvegesi a quelle della Galizia e a buona parte delle isole inglesi (fino alla Scozia); nella Pianura Sarmatica è diffuso fino al 60° di latitudine e alle Alture del Volga; più a sud attraverso la regione pontica arriva al Caucaso. In Italia è frequente nelle regioni settentrionali, è presente negli ambienti di forra dell'Italia centrale mentre manca nella zona meridionale (eccetto alcune segnalazioni).

Si presenta come albero sporadico ed esigente, che cresce su suoli profondi, freschi ma anche umidi, associandosi in montagna con gli aceri, il faggio, l'abete bianco e rosso ed in pianura con la farnia e il carpino bianco.

La specie è eliofila ma tollera l'ombra nelle fasi giovanili. Risulta essere molto sensibile alle gelate tardive ma è anche resistente alle basse temperature se è in dormienza. Predilige terreni fertili, poco coerenti, alcalini, neutri o anche subacidi; tollera suoli limosi o moderatamente argillosi. L'acqua è il principale fattore limitante in quanto il frassino maggiore consuma molta acqua e può subire facilmente danni a causa di un ritardato controllo della traspirazione. Al contrario, può sopravvivere per più di un mese alla sommersione delle radici. Su suoli fertili, profondi e incoerenti, la specie mostra un comportamento invasivo. Il seme è profondamente dormiente a causa di un complesso sistema di inibizioni. All'inizio dell'imbrunimento delle samare (parametro che indica l'avvenuta maturazione), l'embrione non è ancora completamente sviluppato; mentre viene portata a termine tale fase, la disidratazione del pericarpo e del tegumento del seme rende i tessuti impermeabili bloccando ogni possibilità di germinazione. Inoltre si instaura anche una dormienza ormonale. In condizioni naturali occorrono almeno 2 anni dalla maturazione per la germinazione. *F. excelsior* è una specie ricercata soprattutto per la qualità del legno e, in particolare nei Paesi dell'Europa settentrionale, come pianta ornamentale. Nei paesi nordici, il frassino maggiore veniva adorato come pianta sacra, Odino il più grande degli dei nordici con il legno di Frassino creò infatti il primo uomo sulla terra. Bruciare legna di frassino era convinzione comune, che allontanasse gli spiriti maligni. Le foglie raccolte quando sono appena nate, ancora appiccicose e zuccherine, essiccate si usano per preparare un ottimo tè. In fitoterapia si usano semi, foglie, linfa, corteccia dei rami giovani. Contengono glucosidi, zuccheri, resine, acido malico, vitamine C e P, hanno proprietà astringenti, diuretiche, lassative, sudorifere, toniche. Il fogliame del frassino maggiore è molto ricco in nutrienti e un tempo veniva usato come alimentazione del bestiame, le sue foglie nel suolo si degradano facilmente e migliorano notevolmente la sua fertilità.

***Fraxinus ornus* L.**



**Nome scientifico:** *Fraxinus ornus* L.

**Nome comune:** orniello

**Famiglia:** Oleaceae

L'orniello è un albero che può raggiungere i 20 m di altezza, dotato di fusto cilindrico che sostiene una chioma ampia e arrotondata. Non è molto longevo ma ha una notevole capacità pollonifera. La corteccia è liscia e grigia e rimane tale anche in età avanzata.

I rametti sono glabri, grigi o grigio-giallastri; le gemme sono pauciperulate, grigie, tomentose; le laterali sono opposte e più piccole di quella apicale. Le foglie sono composte da 5-9 foglioline lunghe 3-8 cm e larghe 1,8-4,5 mm, ovato-lanceolate, distintamente picciolate, irregolarmente dentato-seghettate ai margini, pubescenti nella pagina inferiore lungo la nervatura. I fiori formano pannocchie dense, odorose, terminali, erette, che compaiono dopo la fogliazione in primavera avanzata (aprile-maggio); mostrano un calice piccolo, profondamente tetralobato, persistente; la corolla è bianca con 4 petali lineari lunghi 5-7 mm mentre i 2 stami sono gialli. In prevalenza sono ermafroditi e l'impollinazione è entomofila. Il frutto, una samara monosperma, lunga 20-30 mm, bruno-rossastra, obovata-lineare o oblunga, a sezione tondeggianti e con le vestigia del calice, matura verso settembre-ottobre. Il seme non è dormiente ma un periodo di stratificazione fredda di qualche settimana riduce la scalarità nella germinazione. La plantula ha cotiledoni ellittico-allungati, sui 25-28 mm di lunghezza, mentre le foglie primarie sono semplici, con base cuneata e margini con denti piccoli e numerosi. L'apparato radicale, fittonante e profondo, è provvisto di numerose radici laterali. Il legno ha alburno e duramen pressochè indifferenziati di colore variabile da avorio a bruno-giallognolo, con raggi parenchimatici invisibili a occhio nudo. È resistente ed elastico, ricercato per manici ed attrezzi sportivi, per lavori al tornio e per paleria e cerchi da botte, nonché come combustibile. L'orniello ha un areale che si estende dalla Spagna sud-occidentale all'Anatolia e alla Siria attraverso il Mediterraneo centro-orientale e i Balcani. Trova il suo limite settentrionale nella Slovacchia meridionale e nel nord-est della Romania. In Italia si ritrova in tutta la penisola e nelle isole, ad eccezione del settore alpino centro-occidentale e della Pianura padana, dal piano basale ai 1000 m a nord e 1500 m a sud, principalmente nella zona fitoclimatica del Castanetum ma frequentemente anche nel Lauretum freddo. Si tratta di una specie termofila, eliofila e molto xerofila, a dormienza accentuata, non molto socievole ma diffusa nei boschi misti

sopra e mesomediterranei, soprattutto su suoli carbonatici e nei versanti esposti a sud. Incidendo la corteccia dell'orniello è possibile raccogliere una gomma densa zuccherina, nota come manna che, rapprendendosi all'aria, prende forme e consistenze diverse. Tale è la diffusione nella Sicilia nord-orientale e in area nebroidea che ha dato anche origine a più di un toponimo e a cognomi locali. Foglie e frutti secchi possono fornire un buon tè, mentre con le foglie fermentate si possono anche produrre bevande alcoliche.

### ***Hypericum foliosum* Aiton**



**Nome scientifico:** *Hypericum foliosum* Aiton

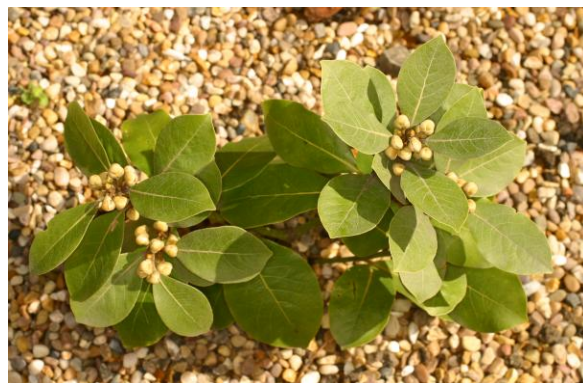
**Nome comune:** Furalha o Malfurada

**Famiglia:** Hypericaceae

La specie *Hypericum foliosum* è anche comunemente detta “Furalha” o “Malfurada”. Si tratta di una fanerofita endemica delle Isole Azzorre, distribuita su tutte le isole dell'arcipelago. È una pianta legnosa che cresce preferenzialmente al di sopra dei 400 metri e solo occasionalmente al di sotto dei 100 metri di altitudine, sia in aree riparate che in spazi aperti (Moura, 1998). Ha un portamento arbustivo, con un'altezza compresa tra 0.5 e 1 m, con rami eretti o diffusi. Il tronco mostra una corteccia fessurata. Le foglie sono sessili o sub sessili, spesso amplessicauli, con forma variabile da ovale a triangolare-lanceolata, a margine piano, base arrotondata, con la lamina inferiore più pallida della superiore. Le infiorescenze si compongono di un numero di fiori variabile tra 1 e 9, corimbiformi o ombrelliformi, senza fiori accessori; il pedicello ha una lunghezza tra 7 e 12 mm; le brattee sono ridotte, da lineari-lanceolate a lineari-subulate; i petali appaiono di un colore giallo oro. I semi, di colore marrone-giallo, sono lunghi 1.2-1.5 mm dotati di

appendici alari. Come tutte le specie del genere *Hypericum*, anche *H. foliosum* mostra proprietà antidepressive, antibatteriche e antiossidanti, legate a sostanze estraibili dalla parte aerea. Una delle sostanze più note è l'ipericina, che ha dimostrato di possedere promettenti proprietà antitumorali e ha la capacità di inibire la crescita di gliomi (tumori cerebrali), del cancro al polmone e del cancro della pelle *in vitro* (in laboratorio). Le sue proprietà fotodinamiche potrebbero portare all'utilizzo di ipericina in combinazione con il laser nel trattamento del cancro.

### ***Laurus azorica* (Seub.) Franco**



**Nome scientifico:** *Laurus azorica* (Seub.) Franco

**Nome comune:** Alloro delle Canarie

**Famiglia:** Lauraceae

*Laurus azorica* è una specie appartenente alla famiglia delle Lauraceae. Si tratta di un vigoroso albero di forma conica che può variare significativamente in dimensioni e altezza, raggiungendo talvolta i 10-18 m di altezza. Come risultato di recenti variazioni tassonomiche, *Laurus azorica* è stato ristretto all'arcipelago delle Azzorre, ma è stata descritta la presenza di popolazioni passate appartenenti a tale specie nella parte occidentale delle isole Canarie, inclusa Gran Canaria così come è stata identificata una nuova specie nell'arcipelago di Madeira, chiamata *Laurus novocanariensis*.

*Laurus azorica* è una specie dioica, con fiori maschili e femminili su piante separate. Ogni fiore è odoroso, color bianco crema, circa 1 cm di diametro e sono portati in coppia accanto ad una foglia. Le foglie sono ampie, lucenti. Di un colore verde scuro, fortemente ovoidali, lunghe 7-14 cm e larghe 4-8 cm, con margine continuo. Il frutto è una drupa nera di circa 1-2 cm di lunghezza. Le bacche e l'olio da esse estratto sono utilizzati come preparazione cutanea antibatterica; l'olio viene applicato esternamente come anti

reumatico e cicatrizzante per ferite ed è assunto oralmente per il trattamento dell'apoplessia; l'olio è anche utilizzato per trattare le bolle, come emostatico e per problemi dell'apparato respiratorio.

***Morella Faya (Aiton) Wilbur***



**Nome scientifico:** *Morella Faya (Aiton) Wilbur*

**Nome comune:** Faia

**Famiglia:** Myricaceae

*Morella faya*, comunemente chiamata faia, è una specie nativa delle Azzorre, di Madeira e delle Canarie. È stata introdotta in svariati luoghi quali Hawaii, Nuova Zelanda e Australia. È un arbusto sempreverde o un piccolo albero alto 3-8 m, raggiungendo raramente i 15 m. Fusto e rami sono coperti da una peluria rossastra. Le foglie, aromatiche, coriacee e oblanceolate, sono solitamente di un verde scuro, lunghe 4-11 cm e larghe 1-3 cm, con margine continuo e apice appuntito, alternate lungo il fusto. Cresce facilmente su vari tipi di suolo. È una specie dioica, con fiori maschili e femminili prodotti in larga parte su piante separate anche se talvolta sono presenti seppur in basso numero, fiori dell'altro sesso (Binggeli, 1997). I fiori maschili hanno 4 stami e sono normalmente raggruppati vicino a un ramo. I fiori femminili, che solitamente si mostrano in gruppi simili, crescono leggermente oltre l'estremità del ramo. Il frutto è rappresentato da una drupa di 5-6 mm di diametro, di colore rossastro-violaceo che vira al viola scuro e nero. In Macaronesia è abbondantemente presente ad altitudini comprese tra 600 e 900 m. La popolazione portoghese è probabilmente nativa o naturalizzata in seguito alla importazione da Madeira o dalle Azzorre. Sulle isole Hawaii è una specie invasiva (Vitousek *et al.*, 1987) e compete con specie arboree native come *Metrosideros polymorpha*, con profondo impatto sul ciclo dell'azoto (Vitousek e Walker, 1989). Le

drupe sono commestibili e utilizzate tradizionalmente per la produzione di un vino molto particolare, mentre il legname è utilizzato come legna da ardere.

***Platanus orientalis L.***



**Nome scientifico:** *Platanus orientalis L.*

**Nome comune:** Platano orientale

**Famiglia:** Platanaceae

Il platano orientale è una specie arborea caducifoglie appartenente alla famiglia delle Platanaceae. Si presenta come un albero robusto e maestoso alto fino a 30 m, chioma ampia, robusta, globosa e ovata; fusto dritto e di notevoli dimensioni diametriche, con grosse e robuste branche, spesso contorte. Può sopravvivere fino a 2000 anni. Si presenta come specie ripicola lungo i corsi d'acqua, infatti pur non essendo particolarmente esigente in termini di suolo, necessita di disponibilità idrica. Generalmente condivide il suo habitat con pioppi, salici e ontani. L'areale nativo è rappresentato dal continente eurasiatico, all'Europa sud orientale all'Asia occidentale. Nel Mediterraneo lo si ritrova nel Sud Italia (inclusa la Sicilia), in Montenegro, Albania, Grecia (inclusa Creta), Bulgaria, Cipro, Turchia, Siria, Libano e Israele. Diverse ricerche hanno esteso il range nativo alla penisola iberica per quanto riguarda il confine occidentale e all'Himalaya per il confine orientale. Dal momento che in tali regioni è stato coltivato fin dall'antichità, è difficile determinare se esso sia effettivamente indigeno di tali aree periferiche (Ansin & Ozkan, 2006; Pilotti *et al.*, 2009).

La specie mostra una forte plasticità rispetto alle fluttuazioni termiche, crescendo dal livello del mare fino ad altitudini pari a 1400 m. Ad altitudini maggiori, i fattori limitanti sembrano essere le temperature al di sotto dei -25°C e i forti venti. Anche in termini di precipitazioni appare molto flessibile, crescendo in ambienti come l'Iran, con precipitazioni annuali tra 100 e 500 mm, concentrate in inverno e primavera. Inoltre in

alcune aree i periodi aridi durano dai 3 ai 9 mesi. Una limitazione biofisica per una estensione della sua coltivazione in Europa è la sensibilità alle gelate, di conseguenza in Europa centrale e occidentale si è preferito coltivare il platano ibrido (London plane, *Platanus × acerifolia* Willd.). Il legno è utilizzato per la produzione di mobili da interno mentre le foglie contengono una serie di sostanze (flavonoidi, triterpenoidi pentaciclici, tannini, acido caffeico) che le rendono utili nei trattamenti di patologie dermatologiche, gastrointestinali, reumatiche ed infiammatorie. Le proprietà farmacologiche di tali sostanze sono difatti citotossiche, citostatiche, astringenti, antibatteriche e antisettiche. Esso è inoltre utilizzato nel design del paesaggio in aree industriali o parchi, in virtù del suo valore estetico, alta tolleranza al vento e all'inquinamento (Kavadas, 1956; Zencirkiran, 2010).

Il platano orientale ha inoltre in Grecia un valore monumentale, in accordo con la mitologia ed i poemi epici (Baumann, 1982).

***Prunus lusitanica* L. ssp. *azorica* (Mouillefert) Franco**



**Nome scientifico:** *Prunus lusitanica* L. ssp. *azorica* (Mouillefert) Franco

**Nome comune:** Ginja

**Famiglia:** Rosaceae

Questa sottospecie di alloro portoghese si presenta come un robusto albero sempreverde con foglie più spesse e ampie delle altre sottospecie ma con i medesimi affascinanti gruppi di fiori bianchi profumati. Le foglie giovani mostrano una pigmentazione rossastra ma diventano verde scuro una volta mature, mentre lo stelo continua a rimanere rosso. Nonostante il nome comune utilizzato per tale specie, alloro portoghese, implichi in

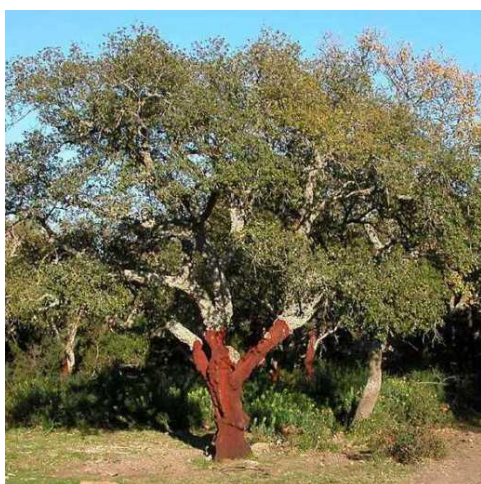
maniera scorretta che essa appartenga alla famiglia delle Lauraceae, tale sottospecie è una tipologia di ciliegio. A differenza degli altri ciliegi però, essa è una sempreverde, simile agli allori. Inoltre, i veri allori portoghesi, non fiorisce finchè nuove foglie non siano state emesse in primavera, mentre la maggior parte dei ciliegi fiorisce prima di emettere nuove foglie. I fiori che sbocciano a Giugno, hanno organi sia maschili sia femminili e sono impollinati dagli insetti. Dal fiore originano le ciliegie verdi che eventualmente virano ad un colore nero brillante in autunno. Tale subspecie è presente sulle isole di São Miguel, Terceira, São Jorge e Pico. Cresce in gole profonde e strette e foreste indisturbate di alloro e ginepro.

E' stata inserita come subspecie a rischio (EN B1 + 2ce) nella Lista rossa della IUCN (2004) nonchè nell'allegato II della Direttiva europea Habitat e nell'appendice 1 della Convenzione sulla conservazione della vita selvatica e dell'ambiente naturale in Europa.

I maggiori rischi per tale subspecie sono rappresentati dall'abbattimento degli alberi per lasciare spazio ad agricoltura e piantagioni nonché la pressione generata dalla competizione con specie esotiche e dalla predazione animale.

Le foglie di *P. lusitanica azorica* contengono cianuro che può essere rilasciato nell'ambiente in seguito a incendio o rottura della foglia. Il frutto è commestibile se totalmente maturo, invece quando è ancora un po' duro, risulta tossico.

### ***Quercus suber* L.**



**Nome scientifico:** *Quercus suber* L.

**Nome comune:** sughera

**Famiglia:** Fagaceae

La quercia da sughero è una specie arborea latifolia e sempreverde. Gli alberi sopravvivono fino a 200-250 anni, raggiungendo in genere un'altezza media di 15-20 m con possibilità anche di toccare i 25 m in condizioni ottimali di crescita. Il diametro del tronco a petto d'uomo può superare i 200 cm. La corteccia può essere spessa fino a 20 cm, porosa e solcata da profonde fessure longitudinali ed ha la capacità di difendere la pianta dagli incendi. La sughera ha una caratteristica peculiare che è quella di una forte produzione di sughero a partire dal fellogeno, il tessuto meristematico alla base della formazione del periderma (di cui la corteccia, propriamente detta ritidoma, rappresenta la parte suberificata più esterna). Tale prodotto ha forte rilevanza economica, soprattutto dopo 10 anni dalla prima decorticazione (demaschiatura), che avviene generalmente quando la pianta ha un'età tra i 15 e i 20 anni e un diametro del tronco di circa 18-20 cm. Il primo sughero ottenuto, detto sugherone, ha difatti minor valore in quanto assai poroso, grezzo e disimmetrico. Il sughero che si ottiene successivamente è invece detto sughero gentile o sughero femmina.

Il legno è duro e pesante, pertanto non è molto usato, anche perchè le decorticaioni frequenti della pianta ne alterano le proprietà tecnologiche; è però un ottimo combustibile con ceneri ad elevato tenore in potassio.

Le foglie durano 2 o 3 anni ma alcuni biotipi hanno foglie semipersistenti; in generale più il clima è secco o freddo e più precoce è la filloptosi; appaiono coriacee, ovato-lanceolate, intere ai margini oppure ornate da 4-7 denti acuti (la denticolazione si attenua con l'età), lunghe 3-7 cm e larghe 1.5-3 m. La sughera ha un discreto eteromorfismo correlato con l'età: nelle piante giovani o nei rami giovanili, le foglie hanno forma ovaleggiante con denti ben evidenti e mucronati. Superiormente hanno radi peli sparsi e la nervatura primaria incisa e sinuosa verso l'apice. Mentre sulla pagina inferiore sono verdi con un tomento non accentuato. Da adulte sono glabre, lucenti e di un verde quasi glaucescente superiormente, bianche o grigiastre per una densa pubescenza inferiormente; la nervatura mediana rimane più o meno sinuosa nel terzo superiore. La pubescenza è dovuta a tricomi stellati, con 8-10 raggi, lunghi 150- 200 micron, che coprono tutta la superficie, a sua volta protetta da cere. Gli stomi sono scarsamente visibili, ellittici. Il picciolo è lungo 5-17 mm, ornato con piccole stipole lineari e pelose, caduche.

La sughera è una specie ad impollinazione anemofila, con fiori maschili e femminili prevalentemente separati sulla medesima pianta. Le infiorescenze maschili sono lunghe e

peduncolate e appaiono dalle gemme ascellari dei rami dell'anno precedente. I fiori femminili appaiono nella parte superiore dei rami dell'anno.

La fioritura (antesi) avviene in primavera avanzata (aprile-giugno) oppure dopo il periodo di aridità estiva (settembre-ottobre). I biotipi a fioritura autunnale sono molto più frequenti nel settore occidentale dell'areale dove il rischio di gelate primaverili è maggiore. A seconda del periodo di antesi, la maturazione delle ghiande avviene o nell'autunno dello stesso anno o nella tarda estate/autunno dell'anno successivo. Ne derivano dunque biotipi a maturazione annuale e biennale. La maturazione annuale risulta più comune nei boschi meridionali mentre la maturazione biennale si concentra nei boschi più a nord, anche se singoli individui possono mostrare simultaneamente entrambi i comportamenti. La ghianda ha dimensioni comprese tra 2 e 3.5 cm, con diametro di 1.2-1.8 cm. La cupola è subemisferica e copre circa metà della ghianda. Le squame sono lunghe fino a 5 mm, grigie e tomentose. Nella zona meridionale dell'areale e a minori altitudini corrispondono ghiande più lunghe, ampie e pesanti rispetto alle zone più a nord o a quote maggiori. Il seme non mostra dormienza; le foglie della plantula sono appena pubescenti alla germogliazione, poi diventano rapidamente glabre e nell'estate solo la nervatura primaria rimane pelosa. L'apparato radicale è fittonante ma si espande grazie a diverse robuste ramificazioni laterali.

Si tratta di una specie eurimediterranea con corologia occidentale. Richiede una temperatura media annua tra 13 e 18° C e non tollera temperature al di sotto di -10° C. Di conseguenza, il suo areale naturale include le regioni costiere del bacino del Mediterraneo occidentale, includendo dunque Algeria, Francia, Italia, Marocco, Portogallo, Spagna e Tunisia e le isole della Corsica, Sicilia e Sardegna nonché limitate aree delle isole di Majorca e Minorca. In Italia è presente in Liguria, diviene frequente in diverse zone costiere della Toscana e del Lazio, della Calabria ionica e della Puglia ed è estesamente coltivata in Sicilia e Sardegna. Le foreste più estese si ritrovano sulla costa atlantica della penisola iberica. Il confine più orientale raggiunto dalla specie è rappresentato dalle coste pugliesi. La sughera cresce generalmente su terreni non calcarei, in preferenza suoli sabbiosi e dalla struttura leggera ma la si può occasionalmente ritrovare su suoli carbonatici. Cresce entro un vasto range di precipitazioni annue, andando dai 479 mm di Mamora (Marocco) ai 2400 mm di molte aree nord-occidentali del Portogallo e del Sud della Spagna. Normalmente si ritrova in sistemi agroforestali, noti come *montado* in Portogallo e *dehesa* in Spagna. Si tratta di boschi aperti con bassa densità di piante (50-

300 alberi/ha) in cui specie foraggiere crescono all'ombra delle sughere e sono dunque oggetto di pascolo nel corso dell'estate.

La quercia da sughero è stata una specie negletta prima che divenisse sistematico l'uso del sughero per la produzione di tappi di bottiglia, soprattutto di vini. Per più di 300 anni la produzione di tappi è stata guidata dalla gestione sostenibile delle foreste di sughera. Il sughero non utilizzato per i tappi è alla base di un vasto gruppo di prodotti, inclusi pannelli isolanti, pavimentazioni, rivestimenti delle pareti domestiche e pannelli insonorizzanti nell'industria automobilistica, nonché per scopi artigiani ed artistici. Un prodotto di nicchia ed alto valore, a base di sughero, il cosiddetto foglio di sughero, è oggi utilizzato come base di stampa, per creare copertine per i libri, nella produzione di abbigliamento, etc. Inoltre il sughero è utilizzato per la creazione di volani per il badminton, manici delle canne da pesca e particolari componenti per l'industria spaziale (Gil *et al.*, 2008; Gellini e Grossoni, 1997).

### ***Taxus baccata* L.**



**Nome scientifico:** *Taxus baccata* L.

**Nome comune:** Tasso

**Famiglia:** Taxaceae

Il tasso è una gimnosperma, sempreverde, dioica/talvolta monoica, considerata rara ed a rischio di estinzione in molte nazioni europee. Si presenta come arbusto o albero di media statura (15-18 m) ma può anche raggiungere i 40 m in esemplari molto vecchi (ad esempio, nel Supramonte sardo è stato segnalato un tasso di 20 m di altezza; Gellini e Grossoni, 1997). È una specie assai longeva e di lento accrescimento ed in Europa vi sono diversi esemplari con età superiore al migliaio di anni. Il tronco è breve e rastremato, talvolta eretto e indiviso ma più frequentemente suddiviso fino dalla base, sempre più o meno costoluto; la chioma, di colore verde scuro, ha forma piramidale ad

ampia base e nelle piante adulte la cima è arrotondata o appiattita. Il ritidoma è rosso bruno, dapprima liscio si desquama poi in placche sottili. Il legno è forte, pesante ed elastico (anticamente utilizzato per fabbricare archi). I rami principali sono distesi e sparsi lungo il tronco, quelli secondari sono alterni, corti e penduli. Quelli dell'anno appaiono verdi. Le gemme sono piccole, ovoidi, prive di resina, con squame ottuse e sovrapposte. Le foglie (aghi) sono lineari, flessibili, acute ma non pungenti, appiattite, un poco incurvate a forma di falce, con la nervatura centrale prominente, di colore verde scuro appena lucente nella pagina superiore e verde giallo per la presenza di due fasce stomatifere nella pagina inferiore. Inserite a spirale tutt'intorno ai rametti, le foglie appaiono distiche o subdistiche per la torsione del picciolo e mancano di canali resiniferi. Gli aghi risultano essere tossici. L'apparato radicale è robusto ma poco profondo. La densa chioma causa un ombreggiamento al terreno così forte da impedire lo sviluppo di altre specie. I microsporofilli si sviluppano in amenti all'ascella delle foglie dei rametti di un anno mentre i macrosporofilli sono costituiti da uno sporofillo carnoso e gemmiforme, portato nel lato inferiore del rametto, di color verde e con un solo ovulo. Fiorisce da febbraio ad aprile.

Il seme è ovoidale, privo di ala o tasche resinifere, tegumento duro nerastro con pruina azzurrognola. Lungo 6-7 mm è avvolto da un arillo carnoso intensamente colorato di rosso una volta giunto a maturazione. Solitamente maturano in un anno, alla fine dell'estate o in autunno.

L'areale geografico europeo del tasso si estende a Nord fino alla Norvegia e alla Svezia, a sud fino all'Italia, Spagna e Grecia (incluse le isole di Eubea, Thasos e Samothraki), a est fino all'Estonia, Polonia, Ucraina, Turchia e monti del Caucaso. Al contrario dell'ampio areale potenziale, la presenza del tasso è spesso rarefatta e rappresentata da piccole popolazioni o individui isolati. Infatti la distribuzione della specie è basata essenzialmente sulle condizioni edafiche. Viene difatti ritrovato in formazioni arboree o arbustive su terreni calcarei. I siti nativi della specie appaiono ben drenati, con suolo calcareo e protetti da venti sferzanti. Nella zona settentrionale del range, inclusa la Bretagna, il tasso cresce solo a basse altitudini mentre nella zona meridionale si presenta come specie montana e cresce solo ad alta quota. Nella regione del Caucaso esso si estende dal livello del mare a 2050 m. Cresce bene in presenza di alta umidità, caratteristica delle aree a clima oceanico. In particolare predilige aree caratterizzate da inverni miti, abbondanti piogge e alta umidità. Al contrario, inverni molto rigidi e venti

secchi e freddi primaverili sembrano limitarne la crescita. Le barriere ecologiche che ne limitano l'espansione sono le basse temperature al nord, il clima continentale nelle aree del Baltico e in Polonia (est), lunghi periodi siccitosi in Turchia (sud-est) e siccità associata ad elevate temperature nel Nord Africa (sud). Insieme all'agrifoglio, esso rappresenta un relitto del Terziario. In termini di successione ecologica, il tasso appare come una specie intermedia tra specie pioniere e climaciche. In termini sociologici, è essenzialmente co-dominante nelle parti più basse della copertura boschiva, in termini morfofisiologici appare come un intermedio tra latifoglie e aghifoglie.

Fin dalla Preistoria, il legname di tasso è stato utilizzato in virtù della sua durezza e flessibilità per costruire strumenti ed armi. Inoltre esso era noto per la tossicità di alcune sue parti (eccetto gli arilli). Nella medicina tradizionale, tutte le parti della pianta sono state utilizzate per le proprietà antispasmodiche, cardiotoniche, espettoranti, narcotiche, purgative etc. Le foglie sono state utilizzate contro asma, bronchite, indigestioni, reumatismi e epilessia (in forma di decotto) e contro i reumatismi come aggiunta a bagni di vapore.

I giovani rami e gli arilli sono stati utilizzati come rimedio omeopatico contro la cistite, mal di testa, problemi cardiaci e renali, reumatismi.

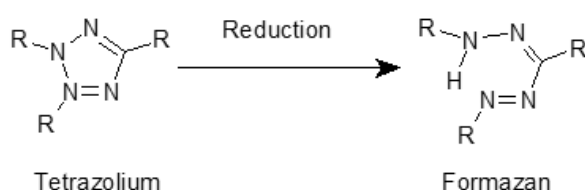
Negli ultimi decenni l'importanza del tasso è cresciuta in maniera considerevole grazie alla scoperta di precursori del taxolo, principio attivo alla base della preparazione di un farmaco chemioterapico (Paclitaxel), estraibili dalle foglie di *T. baccata*.

#### **2.1.5.2.1. Approvvigionamento dei semi**

- *Corylus avellana* L.: Viterbo
- *Frangula azorica* Grubov: Isola di Sao Miguel (Azzorre, Portogallo)
- *Fraxinus excelsior* L.: Bosco di Broz (Tambre – BL)
- *Fraxinus ornus* L.: Pieve Santo Stefano (AR)
- *Hypericum foliosum* Aiton: Isola di Sao Miguel (Azzorre, Portogallo)
- *Laurus azorica* (Seub.) Franco: Isola di Sao Miguel (Azzorre, Portogallo)
- *Morella Faya* (Aiton) Wilbur: Isola di Sao Miguel (Azzorre, Portogallo)
- *Platanus orientalis* L.: Thermi, Thessaloniki (Grecia)

- *Prunus lusitanica* L. ssp. *azorica* (Mouillefert) Franco: Isola di Sao Miguel (Azzorre, Portogallo)
- *Quercus suber* L.: sughereta di Tuscania (VT)
- *Taxus baccata* L.: Pieve Santo Stefano (AR)

#### 2.1.5.2.2. Test di vitalità



**Figura 48. Meccanismo di reazione del TTC in presenza di deidrogenasi**

La vitalità dei semi è stata valutata attraverso il test ai sali di tetrazolio. Tale test (detto TTC-test) si basa sulla riduzione del sale di tetrazolio 2,3,5-trifenil-tetrazolio cloruro (TTC), un colorante biologico che rivela l'attività respiratoria: in presenza di deidrogenasi, il TTC, da incolore, si trasforma in una sostanza rossa insolubile, il formazano (Fig. 48). È stata preparata una soluzione all'1% di sale di tetrazolio in acqua distillata, facendo attenzione a non esporre la soluzione a luce diretta, utilizzando una bottiglia sterile rivestita totalmente di alluminio. 25/30 semi per specie sono stati inizialmente privati del pericarpo, quindi messi a bagno per 48 ore a 4°C per consentirne la reidratazione. Dopo 48 ore sono stati immersi nella soluzione di sali di tetrazolio e incubati per 48 ore al buio, così da consentire la penetrazione del colorante nei tessuti embrionali. Dopo 48 ore di incubazione, i semi sono stati estratti dalla soluzione, asciugati su carta da filtro, quindi sezionati con un bisturi a metà, al fine di esporre l'embrione, così da poterne analizzare l'eventuale colorazione. Sono stati ritenuti vitali semi il cui embrione abbia acquisito una colorazione rossastra.

#### 2.1.5.2.3. Pretrattamenti di rottura della dormienza

##### 2.1.5.2.3.1. Analisi bibliografica

*Corylus avellana*: il seme fresco di nocciolo non mostra dormienza che può essere invece indotta da un periodo di conservazione a secco, a causa dello spostamento di

inibitori della germinazione dalla testa al pericarpo attraverso i cotiledoni e l'asse embrionale (Jarvis, 1975; Jeavons e Jarvis, 1984).

I pretrattamenti riscontrabili in letteratura sono vari:

- 8 giorni di conservazione secca seguita da immersione dei semi in etanolo per 30 secondi e trattamento con una soluzione allo 0.1% (p/V) di cloruro di mercurio per 5 minuti con lavaggio finale con acqua distillata/deionizzata (Jeavons e Jarvis, 1984)
- Applicazione di gibberelline esogene (Bradbeer e Pinfield, 1967)
- Stratificazione a freddo (4°C) per 35 giorni (Wood e Bradbeer, 1967)
- Sterilizzazione superficiale del seme mediante immersione in una soluzione filtrata di ipoclorito di calcio (2% p/V) per 5 minuti (Jarvis, 1975)
- Sterilizzazione superficiale del seme mediante immersione in una soluzione filtrata di ipoclorito di calcio (3% p/V) per 5 minuti seguita da immersione in una soluzione di GA3 (acido gibberellico) ad una concentrazione di 5 µg ml<sup>-1</sup> (Jarvis e Shannon, 1981)
- Sterilizzazione superficiale del seme mediante immersione in una soluzione filtrata di ipoclorito di calcio (2% p/V) per 5 minuti seguita da immersione in 10 ml di acqua o una soluzione di gibberelline a 25°C al buio (Jarvis e Wilson, 1977)
- Sterilizzazione superficiale del seme mediante immersione in una soluzione filtrata di ipoclorito di calcio (1% p/V) per 5 minuti seguita da immersione in una soluzione di GA3 a concentrazione 100-200 ppm per 18 ore (Piotto, 1992)
- Stratificazione a freddo per 3 mesi seguita da stratificazione a caldo per 3 settimane seguita da ulteriori 3 settimane a 4°C (Bonner e Karrfalt, 2008)
- Stratificazione a freddo per 16-20 settimane (Gosling, 2007)
- Immersione in acqua tiepida per 48 ore seguita da 2 settimane di stratificazione a caldo seguita a sua volta da 3-4 mesi di stratificazione a freddo (Bird, 1990)
- Rimozione del pericarpo (parziale o totale) ed immersione in una soluzione di GA3 (10 mg/l) per 24 h (Nornah *et al.*, 1994)
- Trattamento con soluzione di GA3 (50 ppm) per 12 h (Molnar *et al.*, 2005)
- Rimozione del pericarpo e stratificazione a freddo per 2 mesi (ISTA, 2007)

In seguito a tale vasta gamma di pretrattamenti, la germinazione oscilla tra 70 % (Bonner e Karrfalt, 2008) e 100 % (Bradbeer e Pinfield, 1967; Jarvis, 1975).

*Fraxinus excelsior*: il frassino maggiore mostra una delle dormienze più complesse tra le specie forestali, legata a vari fattori interattivi, ovvero dormienza fisiologica dovuta all'incompleto sviluppo dell'embrione, dormienza embrionale, dovuta alla presenza di inibitori ed effetti inibitori causati dai tessuti del pericarpo. I semi esposti in condizioni naturali all'avanzamento dell'inverno, germinano in primavera, generalmente dopo 2 inverni (solo il 5% dopo il primo inverno) (Wardle, 1961).

I pretrattamenti necessari a interromperla disponibili in letteratura sono molteplici:

- 6-16 settimane di stratificazione calda (20°C) seguita da altre 16 settimane a 4°C (Gellini e Grossoni, 1997).
- Stratificazione umida a 20°C per 2-3 mesi seguita da 7 mesi a 4°C (Van de Walle, 1987).
- Trattamento con gibberelline (Drăghici *et al.*, 2010)
- 90 giorni di stratificazione a caldo o trattamento con gibberelline seguito da 30 giorni di stratificazione a caldo (Draghici *et al.*, 2010)
- 16 settimane di stratificazione a caldo più 16 settimane a freddo (Raquin *et al.*, 2002)
- Escissione e coltura degli embrioni (Raquin *et al.*, 2002)
- Micropropagazione (Hammat e Ridout, 1992)
- Stratificazione a 20°C/3°C (16 + 16 settimane) (Tylkowski, 1991)
- Imbibizione dei semi e stratificazione umida a 20° per 2-3 mesi seguita 4 mesi a basse temperature ed infine reidratazione dei semi a 16°C (Van de Walle, 1987)

Tra questi pretrattamenti, l'escissione embrionale comporta il raggiungimento della percentuale di germinazione più alta, pari al 90% (Raquin *et al.*, 2002).

*Fraxinus ornus*: la dormienza dell'orniello non è comparabile con quella del frassino maggiore, pertanto i trattamenti cui sottoporre il seme sono molto più rapidi. Il seme fresco può essere direttamente seminato in inverno, mentre per le semine primaverili sono consigliati vari pretrattamenti:

- stratificazione al caldo per 2-8 settimane (generalmente 3) ed al freddo per 8-15 settimane. La germinazione è favorita da alternanze termiche di +5/+25°C (caldo diurno-freddo notturno), che in natura corrispondono a fine inverno-inizio primavera. Temperature costanti di +20°C possono indurre dormienza secondaria (ANPA, 2001).
- Stratificazione a 3°C per 14 settimane in sabbia o torba (Draghici *et al.*, 2011)
- Applicazione di gibberelline (Drăghici *et al.*, 2010)
- Escissione e coltura degli embrioni (Tepper *et al.*, 1967)

La germinazione in seguito a pretrattamenti oscilla tra 69-87% (Draghici *et al.*, 2011).

*Platanus orientalis*: come nel caso del nocciolo, i semi di platano orientale non necessitano di alcun pretrattamento se seminati subito dopo la raccolta (a fine inverno) mentre ne necessitano se conservati per mesi prima della semina (Piotto e Di Noi, 2001).

In letteratura i suggerimenti sono molteplici:

- 6/8 settimane di stratificazione a freddo per semi raccolti in primavera (Piotto e Di Noi, 2001)
- Stratificazione umida per 60-90 giorni a 5°C in sabbia, torba o terreno sabbioso-limoso (Bonner e Karrfalt, 2008)
- Trattamento con GA3 ad una concentrazione da 100 a 1000 mg/L (Bonner e Karrfalt, 2008)
- Stratificazione per 6-12 settimane a 20-25 °C (Prada e Arizpe, 2008)
- 2 mesi di stratificazione a freddo (Dirr e Heuser, 2006)

A seguito di tali pretrattamenti, la germinazione risulta essere compresa tra 30-50% (Piotto e Di Noi, 2000; Prada e Arizpe, 2008; Navarrete Poyatos *et al.*, 2011; Shen NGO, 2005) e 84% (Royal Botanic Gardens Kew, 2008).

*Prunus azorica*: il seme di *Prunus azorica* mostra una dormienza eliminabile mediante un periodo prolungato di stratificazione a freddo (90 giorni) dopo aver preventivamente rimosso l'endocarpo. In tal modo è possibile raggiungere un 77% di germinazione (Moreira *et al.*, 2012).

*Quercus suber*: la ghianda non mostra dormienza dunque non necessita di pretrattamenti. Il tasso di germinazione è molto alto (70-90%) anche qualora le ghiande siano attaccate da insetti (ANPA, 2001; Branco *et al.*, 2002).

*Taxus baccata*: la germinabilità in condizioni naturali si attesta attorno al 50-70% e raggiunge il 95% dopo il terzo anno. I semi raramente germinano il primo anno e di solito si ha il massimo nel secondo e terzo anno in quanto la dormienza è così forte da necessitare di 1/2 inverni per essere rimossa. Essa è imputabile ad un'imaturità dell'embrione al momento della maturazione del seme.

I pretrattamenti consigliati sono vari:

- stratificazione a 15-20 °C per 3-7 mesi seguita da stratificazione fredda a 3°C per 2-4 mesi (Piotto, 1992)
- Alternanza di 15°C e 20°C in cicli di 24 ore per 6 mesi e mezzo seguita da stratificazione a freddo per 4-4 mesi e mezzo (Piotto, 1992)
- Stratificazione a freddo per 9 mesi (ISTA, 2007)
- Sterilizzazione superficiale dei semi per 12 minuti in una soluzione al 20% (vol/vol) di candeggina con sonicazione continua seguita da doppio risciacquo con acqua sterile. Dopo aver aperto i semi, gli embrioni vanno rimossi con un forcipe e risciacquati con acqua distillata sterile per allontanare le cellule endospermatiche (Flores *et al.*, 1993)
- Imbibizione di semi per 7 giorni in acqua corrente seguita da sterilizzazione in una soluzione di etanolo al 70% (v/v) e 20 minuti in una soluzione di ipoclorito di sodio (5%) con 3 risciacqui finali in acqua distillata sterile (Tafreshi *et al.*, 2011).
- Rimozione manuale del rivestimento e della regione basale del seme seguita da immersione in acqua corrente per 7 giorni prima di procedere all'escissione e coltura degli embrioni (Abbasin *et al.*, 2010).
- Un mese di vernalizzazione o 5-15 minuti in acqua bollente seguiti da trattamento con HCl concentrato per 30-60 minuti (Hoseini Nasr *et al.*, 2007)
- Stratificazione per 24 settimane a 15°C seguita da 40 settimane a 4°C (Gosling, 2007)
- Stratificazione a 20°C per 90 giorni più 120 giorni a 5°C (Kumar *et al.*, 2009)

- 4 mesi di stratificazione a caldo seguita da 4 mesi di stratificazione a freddo (Dirr e Heuser, 2006)
- Vernalizzazione in piastre Petri su agar per 20 settimane seguite da 20 settimane a 20°C e ancora 21 settimane a 5°C (Royal Botanic Gardens Kew, 2008)
- Stratificazione a caldo a 20°C per 3 mesi seguita da 4 mesi a 5°C (Hartmann e Kester, 2002)

In seguito a tali trattamenti la germinazione risulta compresa tra 30 e 80% (Piotto, 1992; Flores *et al.*, 1993; Iskulo, 2010; Hoseini Nasr *et al.*, 2007; Pandey *et al.*, 2002 ; ISTA, 2007).

#### **2.1.5.2.3.2. Pretrattamenti di rottura effettuati**

- *Corylus avellana L.*: vernalizzazione in perlite 2 mesi a 4°C
- *Frangula azorica Grubov.*:
  1. 18 ore in soluzione GA3 200 mg/L in agitazione al buio seguite da incubazione a 20°C o da 2 periodi di stratificazione a freddo (4°C) su letto di perlite sterile: 30 e 60 giorni;
  2. stratificazione a freddo (30 e 60 giorni) senza pretrattamento ormonale seguita da incubazione a 20°C;
  3. controllo: incubazione a 20°C senza pretrattamenti.
- *Fraxinus excelsior L.*: stratificazione all'aperto in cassetta contenente sabbia di fiume da dicembre 2013 a marzo 2014
- *Fraxinus ornus L.*: 18 ore in soluzione GA3 200 mg/L in agitazione al buio
- *Hypericum foliosum Aiton.*:
  1. 18 ore in soluzione GA3 200 mg/L in agitazione al buio seguite da incubazione a 20°C o da 2 periodi di stratificazione a freddo (4°C) su letto di perlite sterile: 30 e 60 giorni;
  2. stratificazione a freddo (30 e 60 giorni) senza pretrattamento ormonale seguita da incubazione a 20°C;
  3. controllo: incubazione a 20°C senza pretrattamenti.
- *Laurus azorica (Seub.) Franco.*:
  1. 18 ore in soluzione GA3 200 mg/L in agitazione al buio seguite da incubazione a 20°C o da 2 periodi di stratificazione a freddo (4°C) su letto di perlite sterile: 30 e 60 giorni;

2. stratificazione a freddo (30 e 60 giorni) senza pretrattamento ormonale seguita da incubazione a 20°C;
  3. controllo: incubazione a 20°C senza pretrattamenti.
- *Morella Faya* (Aiton) Wilbur:
    1. 18 ore in soluzione GA3 200 mg/L in agitazione al buio seguite da incubazione a 20°C o da 2 periodi di stratificazione a freddo (4°C) su letto di perlite sterile: 30 e 60 giorni;
    2. stratificazione a freddo (30 e 60 giorni) senza pretrattamento ormonale seguita da incubazione a 20°C;
    3. controllo: incubazione a 20°C senza pretrattamenti.
  - *Platanus orientalis* L.: incubazione diretta a 22°C al buio dopo eliminazione del piumino dal seme.
  - *Prunus lusitanica* L. ssp. *azorica* (Mouillefert) Franco:
    1. 18 ore in soluzione GA3 200 mg/L in agitazione al buio seguite da incubazione a 20°C o da 2 periodi di stratificazione a freddo (4°C) su letto di perlite sterile: 30 e 60 giorni;
    2. stratificazione a freddo (30 e 60 giorni) senza pretrattamento ormonale seguita da incubazione a 20°C;
    3. controllo: incubazione a 20°C senza pretrattamenti.
  - *Quercus suber* L.: la specie non mostra dormienza, dunque si è proceduto ad una immersione delle ghiande per 24 ore in acqua tiepida al fine di allontanare quelle galleggianti in quanto vacue o attaccate da vermi. Le ghiande idonee alla germinazione sono state private del pericarpo e sottoposte alla rimozione di un terzo della loro lunghezza, quindi sterilizzate per 20 minuti in una soluzione di ipoclorito di sodio al 20%, risciacquate con abbondante acqua corrente e sottoposte ad un risciacquo finale con acqua distillata sterile prima di essere posizionate su un letto di perlite sterile a 22°C al buio per favorire la germinazione.
  - *Taxus baccata* L.: 9 mesi di stratificazione a freddo (4°C) su letto di perlite sterile.

### 2.1.5.2.3.3. Allestimento delle vernalizzazioni



**Figura 49. Preparazione delle vernalizzazioni**

Prima di procedere all'allestimento delle vernalizzazioni, i semi sono stati reidratati mediante immersione in acqua distillata per 48 ore a 4°C e quindi sterilizzati mediante incubazione per 20 minuti in una soluzione al 20% di ipoclorito di sodio e risciacquati abbondantemente con acqua corrente ed infine con acqua distillata sterile.

Le vernalizzazioni sono state allestite in cassette rettangolari di plastica (~20\*30 cm) disinfettate con alcol etilico e riempite con 1 cm di acqua distillata sterile. All'interno di ciascuna cassetta è stata posizionata una retina metallica sulla quale adagiare, in direzione perpendicolare al lato maggiore del contenitore, dei cordoncini assorbenti sterili con le estremità laterali immerse in acqua. Sulla rete ed i cordoncini è stato disteso un foglio di tessuto non tessuto sterile umido, sul quale depositare uno strato di perlite umida sterile, di circa 0.5 cm di spessore. In caso di semi di piccole dimensioni è stato depositato sulla perlite un secondo foglio di tessuto non tessuto sul quale distribuire i semi. Un terzo foglio di tessuto non tessuto umido è stato quindi adagiato sui semi per evitarne la disidratazione. In caso di semi di dimensioni tali da poter essere agevolmente distinti dalla perlite, è possibile mescolarli direttamente al substrato inerte, in grado di mantenere un elevato grado di umidità, senza necessità dunque della deposizione del terzo strato di tessuto (Fig. 49).

Sui semi è stata spruzzata una limitata quantità di fungicida.

Le cassette sono state posizionate in una cella frigorifera a 4°C e controllate due volte a settimana in termini di: presenza di muffe, grado di umidità dei semi e della perlite, necessità di aggiunta di acqua per assicurare l'immersione dei cordoncini assorbenti.

#### 2.1.5.2.3.4. Preparazione della soluzione di GA3

È stata preparata una soluzione di acido gibberellico (GA3, 346.37 g/mol), con concentrazione pari a 200 mg/L. Pertanto, sono stati solubilizzati 100 mg di GA3 in polvere in una minima quantità di etanolo 100% sotto cappa chimica e portati a volume con acqua distillata sterile. Circa 300 semi per specie (circa 300 mg per quanto riguarda l'*Hypericum foliosum*) sono stati immersi nella soluzione di GA3 200mg/L ed incubati per 18 ore al buio in agitazione (Fig. 50).

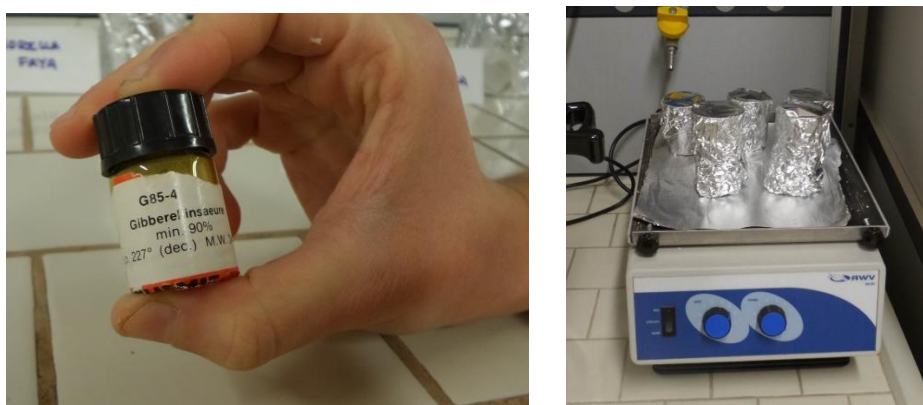


Figura 50. Pretrattamento con GA3

#### 2.1.5.3. Impostazione dei nuovi protocolli di coltivazione indoor

Le specie che hanno mostrato un elevato tasso di germinazione sono state selezionate per un ciclo di propagazione in camera di crescita, secondo i seguenti protocolli (Tab. 3):

- *Corylus avellana*
- *Fraxinus excelsior*
- *Platanus orientalis*
- *Quercus suber*

| <b>Specie</b>        | <b>Fotoperiodo</b> | <b>Temperatura</b> | <b>Umidità</b> | <b>Tipologia substrato</b> | <b>Durata del ciclo</b> |
|----------------------|--------------------|--------------------|----------------|----------------------------|-------------------------|
| <i>C. avellana</i>   | 12L 12D            | 22 ± 2 °C          | 50 ± 10%       | Substrato misto 1          | 30 giorni               |
| <i>F. excelsior</i>  | 12L 12D            | 22 ± 2 °C          | 50 ± 10%       | Substrato misto 1          | 30 giorni               |
| <i>P. orientalis</i> | 12L 12D            | 22 ± 2 °C          | 50 ± 10%       | Terreno sabbioso *         | 40 giorni               |
| <i>Q. suber</i>      | 12L 12D            | 22 ± 2 °C          | 50 ± 10%       | Substrato misto 1          | 30 giorni               |

\* SABBIA 50%; TORBA 15%; POZZOLANA 25%; CARBONE 10%

**Tab.3. Protocolli di coltivazione indoor delle specie testate**

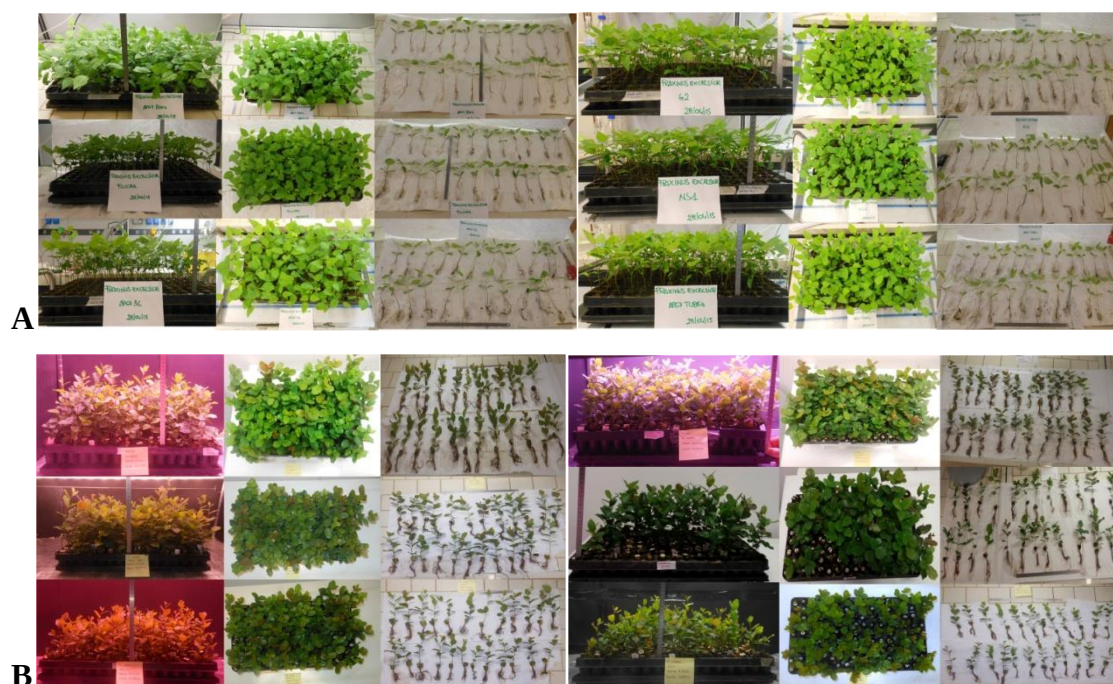
#### **2.1.5.3.1. Analisi dei semenzali**

Al termine del ciclo di crescita indoor, per ciascun trattamento luminoso sono state selezionate in maniera casuale 24 piantine per vasoio, da sottoporsi ad analisi morfometriche sia distruttive che non distruttive (Fig. 51), al fine di rilevare i seguenti parametri:

1. Altezza del fusto
2. Diametro dello stelo all'altezza del colletto
3. Rapporto di snellezza (altezza/diametro dello stelo)
4. Peso fresco dello stelo
5. Peso secco dello stelo
6. Peso fresco delle radici
7. Peso secco delle radici
8. Numero di foglie
9. Area media delle foglie
10. Area fogliare totale

11. Peso fresco delle foglie

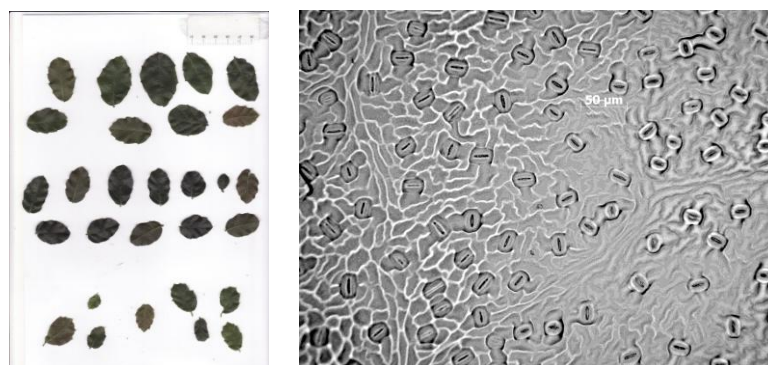
12. Peso secco delle foglie



**Figura 51. Vassoi al termine del ciclo di crescita indoor e selezione dei campioni da analizzare (esempio A: *Fraxinus excelsior*; esempio B: *Quercus suber*)**

3 plantule per trattamento luminoso sono state selezionate in maniera casuale per ulteriori analisi microscopiche (Fig. 52). Tre foglie per ogni piantina sono state selezionate in maniera casuale ed analizzate come segue:

1. Area fogliare (LA)
2. Densità stomatica relativa (RSD)
3. Numero assoluto di stomi ( $RSD \cdot LA$ )



**Figura 52. Analisi delle aree fogliari e degli stomi (esempio relativo a *Q. suber*)**

Inoltre, 24 semenzali per trattamento luminoso sono stati selezionati sempre in modalità casuale per la costruzione di curve di crescita, misurando l'altezza del fusto due volte a settimana nel corso del ciclo di crescita, a partire dall'emergenza delle prime foglie vere.

#### **2.1.5.3.1.1. Metodi di analisi**

*Altezza del fusto:* è stata misurata con righello metallico posizionando lo zero a livello del suolo.

*Diametro dello stelo all'altezza del colletto:* è stato misurato con calibro digitale.

*Peso fresco (stelo, radici, foglie):* ogni semenzale è stato privato manualmente delle foglie quindi lo stelo e l'apparato radicale sono stati separati mediante l'uso di forbici. Le tre porzioni (stelo, radici e foglie) sono state pesate separatamente e poste ad essiccare in stufa per 24 ore a 102 °C.

*Peso secco (stelo, radici e foglie):* dopo 24 ore di essiccazione in stufa stelo, radici e foglie sono stati nuovamente pesati.

*Numero di foglie:* ogni semenzale è stato sottoposto a conteggio manuale delle foglie, con esclusione dei cotiledoni.

*Area media delle foglie:* le foglie separate manualmente dal semenzale, sono state sottoposte a scannerizzazione al fine di analizzare le singole aree fogliari mediante software Digimizer ed utilizzare i dati così ottenuti per il calcolo del valore medio.

*Area fogliare totale:* le singole aree fogliari ottenute come precedentemente descritto mediante utilizzo del software Digimizer, sono state sommate al fine di ottenere un valore totale dell'area fogliare del singolo semenzale.

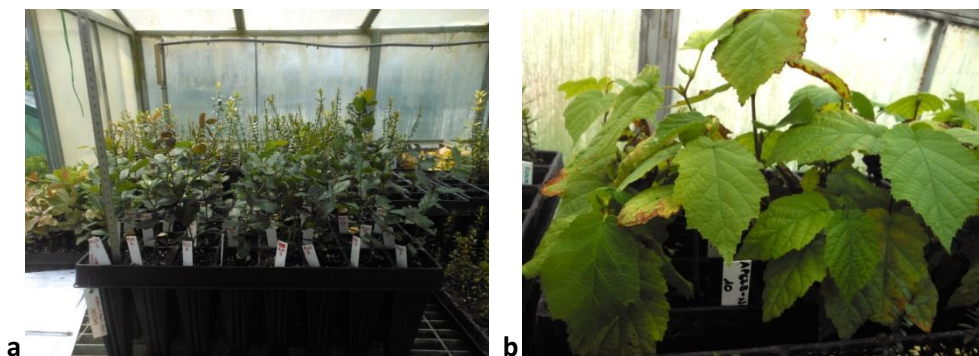
*Densità stomatica relativa (RSD):* dopo aver selezionato in maniera casuale tre foglie per semenzale, queste ultime sono state sottoposte a scannerizzazione al fine di misurarne le aree mediante software Digimizer (Area fogliare - LA). In seguito su ogni foglia è stato depositato uno strato di circa 1 mm di spessore di smalto trasparente. Una volta asciugato bene, è stato applicato sulla superficie fogliare smaltata un rettangolo di scotch trasparente di circa 3\*1 cm, facendolo aderire bene alla superficie. Lo scotch è stato quindi asportato, portando con sé il calco della superficie fogliare. Il rettangolo di scotch è stato quindi depositato su un vetrino da

microscopia e sottoposto ad un'analisi al microscopio ottico con ingrandimento 20X, connesso ad un pc mediante fotocamera digitale Zeiss®. Sono state selezionate per ogni foglia tre aree ben definite e ne è stata effettuata una fotografia. Le fotografie delle tre aree sono state sottoposte ad analisi mediante Digimizer, effettuando il conteggio degli stomi visibili e definendo l'area totale di analisi. Infine il numero degli stomi è stato diviso per l'area di analisi per ottenere una densità relativa degli stomi. Per ciascuna foglia sono state dunque ottenute tre densità relative, a partire dalle quali è stato ricavato il valore medio.

*Numero assoluto di stomi (RSD\*LA):* il valore medio delle densità stomatiche relative per singola foglia è stato moltiplicato per il valore dell'area fogliare ottenuto mediante scannerizzazione seguita da analisi con software Digimizer, così da ottenere il numero assoluto di stomi per foglia.

#### 2.1.5.4. Trasferimento in serra

Al termine del ciclo di crescita indoor, 40 semenzali per ciascun trattamento luminoso per ciascuna specie (fatta eccezione per *P. orientalis* che, a causa di difficoltà di propagazione indoor, non è stato possibile trasferire in serra) sono stati trapiantati in contenitori più ampi (Herkuplast® QP40T/18, 40 semenzali per vassoio) e trasferiti in una serra per circa un anno (fino all'inizio dell'estate successiva al trapianto) prima dell'impianto finale in campo aperto nel vivaio forestale dell'Università degli Studi della Tuscia, ubicato presso l'Azienda agraria "Nello Lupori" (Viterbo) (Fig. 53). Il periodo di acclimatazione in serra è necessario per molte specie al fine di evitare uno shock da trapianto, dovuto alle ingenti differenze, in termini quali-quantitativi, tra luce artificiale e luce solare. Nel caso della quercia da sughero tale periodo è teoricamente evitabile, grazie all'elevata adattabilità della specie a differenti condizioni di illuminazione.



**Figura 53. Semenzali di *Q. suber* (a) e *C. avellana* (b) trasferiti in serra dopo un ciclo di coltivazione indoor**

#### 2.1.5.4.1. Analisi dei semenzali

L'altezza dei 24 semenzali già seguiti nel corso del loro accrescimento durante il ciclo di coltivazione indoor, è stata misurata in serra una volta a settimana fino a Luglio (in corrispondenza dunque del naturale periodo di interruzione della crescita vegetativa indotta dall'incipiente estate nell'area del Mediterraneo).

Dopo un anno di crescita in serra, 10 piante sono state selezionate in maniera random per ciascun trattamento luminoso e sottoposte ad analisi morfometriche, come precedentemente descritto (Fig. 54), con l'aggiunta di un ulteriore parametro, ovvero il contenuto in clorofilla. A tal scopo una singola foglia ben distesa è stata selezionata per ciascun semenzale e sottoposta a misurazione del contenuto di clorofilla mediante SPAD meter 502 plus Konica Minolta.



Figura 54. Esempi di semenzali di *F. excelsior* (a) e *Q. suber* (b) selezionati per le prove morfometriche al termine di un anno di acclimatazione in serra

#### 2.1.5.5. Impianto in campo aperto

Dopo un anno di acclimatazione in serra, all'inizio dell'estate (prima del periodo di aridità estiva tipico dell'area mediterranea), le specie *Quercus suber* e *Corylus avellana* sono state selezionate per lo step finale: l'impianto in campo aperto (giugno 2015).

L'area destinata all'impianto è stata coperta con un telo pacciamante direttamente a contatto col suolo, per ridurre lo sviluppo delle erbe infestanti.

Sono quindi stati creati dei buchi all'interno del telo, di circa 15 cm di diametro, ad una distanza di circa 20 cm l'uno dall'altro, costruendo linee parallele, distanti circa 40 cm tra loro. In corrispondenza di ciascun foro è stata scavata una buca delle medesime dimensioni e di circa 30 cm di profondità all'interno della quale depositare una piantina. Sono state dunque trapiantate 10 piantine per trattamento luminoso per specie.

Si è provveduto a riempire le buche e stabilizzare le piante aggiungendo terreno fresco (torboso) ed è stato installato e programmato un impianto automatizzato di irrigazione a nebulizzazione per irrigare le piante due volte al giorno (Fig. 55).

La porzione di impianto destinata al nocciolo è stata coperta con telo ombreggiante al 70%, a causa della maggiore sensibilità agli stress luminosi già mostrata dalla specie nella fase di acclimatazione in serra.

Tutte le piante dell'impianto sono state monitorate misurandone l'altezza una volta ogni due settimane, per un totale di 6 settimane, al termine delle quali ne è anche stato rilevato il tasso di sopravvivenza, allo scopo di valutare la resistenza delle piante allo stress luminoso ma anche allo stress idrico estivo. Dopo un anno (Maggio 2016) sono state ripetute le misure relative all'altezza dei semenzali e al tasso di sopravvivenza.



**Figura 55. Impianto in campo aperto di sughera**

#### **2.1.5.6. Studi quali-quantitativi della luce in foreste naturali**

La letteratura mostra numerosi studi relativi alle ottimali condizioni di umidità, temperatura e fotoperiodo per il corretto accrescimento di ciascuna specie forestale, basati su osservazioni effettuate su esemplari adulti. Al contrario, le condizioni luminose ottimali per l'accrescimento dei semenzali in ambiente naturale sono scarsamente trattate.

In generale, le specie forestali vengono suddivise in due classi principali in base alle proprie necessità luminose: specie eliofile e specie sciafile. Tale classificazione è valida nello specifico per esemplari adulti ma spesso il comportamento dei semenzali appare divergente rispetto alle piante madri (Loach, 1970). Per conoscere dunque le reali

necessità luminose dei semenzali sono necessari studi di campo in foreste caratterizzate da rinnovazione naturale.

#### 2.1.5.6.1. Il plataneto della Valle dell'Anapo



**Figura 56. Riserva naturale orientata Pantalica, Valle dell'Anapo e Torrente Cava Grande**

La foresta di *Platanus orientalis* L. selezionata come area di studio è localizzata nella Riserva naturale orientata Pantalica, Valle dell'Anapo e Torrente Cava Grande, una riserva naturale regionale della Sicilia sud-orientale (Fig. 56). È attraversata dal fiume Anapo e dal Calcinara che scorrono attraverso canyon a "V" caratteristici della zona. Comprende più sistemi: la Valle del Fiume Anapo, che nasce sul Monte Lauro, nei Monti Iblei, e sfocia nel porto di Siracusa, la Valle di Pantalica e il torrente di Cava Grande.

Tale riserva è anche un sito UNESCO ed è stata fondata nel 1997 per preservare l'associazione *Platanelia orientalis*. Occupa un'area di 3712 ettari attraverso i territori di Sortino, Ferla, Cassaro, Buscemi e Palazzolo Acreide, in provincia di Siracusa. La vegetazione predominante è la tipica macchia mediterranea, caratterizzata dalla presenza di platani orientali, pioppi bianchi e neri, salici e un ricco sottobosco. Le aree a minor pendenza sono colonizzate da grandi querce e olmi. Nei secoli passati, il *Platanus orientalis* era distribuito lungo le sponde del fiume ma negli ultimi decenni la specie è stata fortemente decimata dal cancro colorato del platano, causato dal fungo *Ceratocystis platani*.

#### **2.1.5.6.1.1. Analisi della luce**

Sono stati selezionati 4 punti di analisi all'interno del bosco, due caratterizzati da abbondante rinnovazione naturale (R1 – R2) e due privi di rinnovazione (NR1 – NR2). In corrispondenza di ciascun punto sono stati raccolti spettri solari continui (180-1100 nm) mediante Spettroradiometro Stellarnet® alle ore 10, 12 e 14, effettuando 10 misurazioni consecutive con intervalli di 300 millisecondi. Le misurazioni sono state mediate e lo spettro medio per singolo punto e singola ora è stato sottoposto ad analisi quantitativa (irradianza espressa in  $\text{W/m}^2$ ) al fine di confrontare il variare dell'irradianza nel corso delle ore di luce tra punti con e senza rinnovazione. Inoltre si è provveduto ad effettuare una analisi qualitativa (composizione percentuale delle singole bande di colore), delle condizioni di ombra e luce cui i semenzali possono essere esposti.

Essendo i dati riferiti al mese di Agosto, caratterizzato da una irradianza in zone aperte a mezzogiorno di circa  $1500 \text{ W/m}^2$ , si è considerata una condizione di OMBRA per valori di irradianza inferiori a  $1000 \text{ W/m}^2$  e di LUCE per valori superiori a  $1000 \text{ W/m}^2$ .

#### **2.1.5.6.2. La sughereta di Tuscania**



**Figura 57. Sughereta di Tuscania**

Il bosco di sughera selezionato per l'analisi delle condizioni climatiche alla base della rinnovazione naturale della specie è stata la sughereta presente all'interno della Riserva Naturale di Tuscania (VT) (Fig. 57).

Costituita nel 1997, si estende per 1901 ha compresi tutti nel comune di Tuscania, con altitudine che varia dai 40 m s.l.m. fino a 224 m s.l.m.. All'interno della riserva si trovano due zone SIC (zone speciali di conservazione) che sono il “Corso del fiume Marta” e la “Sughereta di Tuscania”. Sono presenti numerose specie animali (cinghiale, moscardino, istrice, volpi) e vegetali (corniolo, sughera, biancospino, cerro, leccio, rosa selvatica etc.).

La sughereta si estende per circa 40 ha nella zona nord-est della riserva. Si tratta di una piantagione oggi naturalizzata di *Quercus suber* L., attualmente allo stato maturo (adulto), caratterizzata da un ricco sottobosco, con abbondanza di ginestra odorosa (*Spartium junceum* L.), ligustro comune (*Ligustrum vulgare* L.), orchidee selvatiche, asparago selvatico. Anche la fauna risulta rilevante. La specie predominante è rappresentata dal cinghiale (*Sus scrofa* L.), molto dannoso per il sottobosco e per la rinnovazione della sughera, in quanto in forte aumento numerico per l'assenza di predatori e di adeguate campagne di abbattimento.

Attualmente la sughereta non è gestita pertanto presenta una forte densità dovuta all'assenza di diradamenti negli ultimi 10-15 anni. Tale condizione ha determinato un'alta competizione, con riduzione della rinnovazione e affermazione del novellame e indebolimento delle piante adulte con conseguente facilitazione dell'attecchimento di patogeni, quali *Hypoxylon mediterraneum*, agente del cancro carbonioso.

Laddove in seguito a schianti si siano aperte spontaneamente delle buche, il sottobosco ha avuto modo di espandersi e il novellame di affermarsi grazie alla disponibilità di luce.

Grazie alla breve distanza tra Viterbo e Tuscania, è stato possibile monitorare la rinnovazione e il primo accrescimento dei semenzali da dicembre 2014 a luglio 2015 con cadenza settimanale o mensile.

All'inizio di dicembre 2014, sono state definite 6 aree di saggio, in seguito al periodo di massima caduta delle ghiande.

Ogni area di saggio, di dimensioni 50\*50 cm, è stata protetta dalla predazione dei cinghiali e roditori, con una gabbia metallica di 50\*50\*10 cm con maglie della rete metallica di 1 cm di lato. Le gabbie sono state fissate al suolo mediante utilizzo di 4 paletti metallici lunghi 70 cm, posizionati ai 4 vertici del quadrato (Fig. 58).



**Figura 58. Esempio di gabbietta metallica utilizzata per i saggi in bosco**

Il posizionamento delle gabbiette è avvenuto rispettando la naturale distribuzione delle ghiande cadute al suolo e scegliendo punti che non potessero ricevere alcun disturbo antropico, quindi lontani (o ai margini) di sentieri e strade.

Le aree sono state definite come segue:

G1-G2-G3 con esposizione al sole alle ore 12:00 in un giorno sereno (GABBIETTE DI LUCE).

G4-G5-G6 con esposizione all'ombra alle ore 12:00 in un giorno sereno (GABBIETTE DI OMBRA).

#### **2.1.5.6.2.1. Analisi della luce**

Al momento della messa a dimora delle gabbiette è stato effettuato, in corrispondenza di ciascuna di esse, un rilievo quali-quantitativo dello spettro solare (180-1100 nm), mediante utilizzo di uno spettroradiometro Stellarnet®. Nello specifico, lo spettro è stato acquisito in corrispondenza di 5 punti per gabbietta. Sono state difatti costruite due diagonali orientate verso i 4 punti cardinali. La fibra ottica dello spettroradiometro è stata quindi posizionata in corrispondenza del baricentro e a metà della distanza tra i 4 vertici e il baricentro.

Gli spettri luminosi sono stati rilevati alle ore 9, 10, 12 e 14, così da poter ricostruire l'andamento dello stato di illuminazione delle 6 aree nel corso delle ore centrali di luce della giornata.

Lo spettroradiometro è stato impostato in maniera tale da ottenere per ogni punto 10 misurazioni a intervalli di 300 ms. Tali misurazioni sono state poi alla base del

calcolo della media di illuminazione del singolo punto e della gabbietta nella sua totalità.

Come controllo, è stato rilevato uno spettro solare alle ore 12 in un punto senza copertura vegetativa.

Le gabbiette alla luce sono state confrontate con quelle in ombra in termini quantitativi (andamento dell'irradianza luminosa, espressa in  $\text{W/m}^2$ , nel corso delle ore di osservazione).

La totalità di spettri collezionati è stata suddivisa in un gruppo di spettri di ombra e sole. Dal momento che i dati relativi alle condizioni di illuminazione delle gabbiette sono stati raccolti nel mese di dicembre, con una irradianza in zone aperte a mezzogiorno pari a  $\sim 700 \text{ W/m}^2$ , è stato identificato come cut off tra condizioni di luce e ombra un valore di  $350 \text{ W/m}^2$ .

Gli spettri collezionati in condizioni di ombra e di luce sono stati poi confrontati in termini qualitativi, calcolandone la composizione percentuale delle differenti bande di colore, così identificate:

UV:  $<400 \text{ nm}$

ZONA DEL BLU:  $400\text{-}520 \text{ nm}$

ZONA DEL VERDE-GIALLO:  $520\text{-}610 \text{ nm}$

ZONA DEL ROSSO:  $610\text{-}720 \text{ nm}$

ZONA DEL ROSSO LONTANO:  $720\text{-}850 \text{ nm}$

#### **2.1.5.6.2.2. Analisi dei semenzali**

##### **2.1.5.6.2.2.1. Percentuale di germinazione ed emergenza**

A inizio primavera (21/3/2015) è stato effettuato un sopralluogo accurato per ogni singola gabbietta, andando a rimuovere la copertura metallica, per valutare la percentuale di germinazione delle ghiande di sughera al termine dei mesi invernali (Fig. 59).

Al termine della stagione primaverile, prima del sopraggiungere della stasi vegetativa estiva, è stata calcolata la percentuale di emergenza dell'apice

caulinare, che tiene conto delle ghiande germinate ed emerse al termine dell'inverno (precoci) nonché di quelle emerse nei mesi successivi (tardive).

Le ghiande danneggiate (per cause fisiche o biologiche) sono state considerate non germinate.



**Figura 59. Analisi della germinazione delle ghiande di sughera in bosco**

#### **2.1.5.6.2.2.2. Misure dei semenzali**

L'accrescimento dei semenzali all'interno delle gabbiette è stato monitorato mediante analisi dei seguenti parametri, con cadenza mensile, da Marzo a Giugno 2015, ovvero al raggiungimento della prima chiusura annuale della gemma apicale (Fig. 60):

- Altezza (espressa in cm)
- Diametro (espresso in mm, mediante utilizzo di calibro digitale)
- Numero di foglie
- Quantità di clorofilla (espressa in unità SPAD, misurata mediante SPAD METER Konica Minolta®)

Tramite i dati ottenuti si sono potute costruire le curve di crescita dei semenzali presenti in ogni area di saggio, per poter valutare l'eventuale incidenza del grado di esposizione luminosa sull'accrescimento dei semenzali.



**Figura 60. Misurazione dei semenzali di sughera in bosco**

#### **2.1.5.6.2.3. Analisi della fenologia dei semenzali di sughera**

1. Oltre agli studi relativi alle necessità luminose, i semenzali di sughera sono anche stati sottoposti a studi fenologici, al fine di identificare eventuali alterazioni dei ritmi fenologici indotti dalla coltivazione indoor. A tal scopo, in corrispondenza del periodo di germinazione delle ghiande in bosco (novembre 2014), sono stati allestiti tre vassoi da 104 posizioni (QPD 104 VW) utilizzando il substrato misto 1. Le ghiande di sughera sono state raccolte e immerse in acqua tiepida per 24 ore allo scopo di eliminare le vacue. Al termine di tale fase si è proceduto all'eliminazione del pericarpo e di un terzo dell'endosperma. Tale trattamento viene consigliato allo scopo di facilitare le fasi di germinazione ed emergenza del coleoptile e di limitare lo sviluppo di muffe. Le ghiande sono quindi state sottoposte a disinfezione superficiale con ipoclorito di sodio al 20% per 20 minuti seguita da una serie di risciacqui con acqua di rubinetto ed un ultimo risciacquo con acqua sterile distillata. Si è quindi proceduto alla semina delle ghiande in due vassoi: un vassoio (1) è stato posizionato sotto lampada

NS1 all'interno della camera climatizzata del progetto Zephyr, con fotoperiodo 12L 12D, temperatura di  $22\pm 2^{\circ}\text{C}$  e umidità relativa dell'aria pari a  $50\pm 10\%$ ; un secondo vassoio (2) è stato posizionato in serra presso il vivaio forestale dell'azienda agraria "Nello Lupori" (Viterbo).

Si è inoltre proceduto all'allestimento di un vassoio (3) seminando 104 ghiande pregerminate sotto lampade LED (NS1), preventivamente sottoposte a rimozione del pericarpo e di un terzo dell'endosperma seguita da disinfezione. Tale vassoio è stato posizionato in serra in contemporanea con il vassoio 2.

Tra i 6 spettri luminosi analizzati nell'ambito del progetto Zephyr, si è stabilito di condurre gli studi fenologici sotto lo spettro NS1, in quanto esso rappresenta tra questi il più vicino allo spettro solare reale. Le ghiande sono state osservate giornalmente, al fine di monitorarne le principali fasi fenologiche: germinazione, emergenza del coleoptile dal terreno, fine del I flusso vegetativo, inizio del II flusso vegetativo, fine del II flusso vegetativo, inizio del III flusso vegetativo. Il giorno della germinazione è stato considerato quale GIORNO ZERO così da poter ottenere risultati normalizzati relativi alla durata delle singole fasi fenologiche nelle differenti condizioni sperimentali.

Al termine dell'esperimento, in corrispondenza dell'inizio della stasi vegetativa dei semenzali in bosco imposta dalla stagione estiva (Giugno 2015), si è proceduto ad un confronto dei dati raccolti tra ambiente naturale (bosco), serra (sia in caso di semina di ghiande non ancora germinate o pregerminate sotto luci LED) e camera di crescita con luci LED, al fine di valutare l'impatto delle fonti luminose artificiali e in generale della coltivazione indoor sulla fenologia della specie.

2. Nell'ottica di valutare possibili effetti dei trattamenti di rimozione di tegumenti e parte dell'endosperma sull'accrescimento dei semenzali, si è proceduto, in contemporanea all'esperimento descritto al punto 1, all'allestimento di ulteriori due vassoi. In un vassoio sono state seminate ghiande sottoposte ai trattamenti precedentemente descritti (crf. punto 1), in un secondo sono state seminate ghiande intere, esclusivamente sottoposte a immersione per 24 ore in acqua tiepida seguita da disinfezione con ipoclorito di sodio. I due vassoi sono stati posizionati in contemporanea sotto lampada NS1 nella camera climatizzata del progetto Zephyr, monitorando non solo l'andamento delle fasi fenologiche nelle

due condizioni ma anche l'accrescimento dei semenzali (altezza del fusto, numero di foglie, diametro al colletto), a partire dall'emergenza del coleoptile dal terreno. In concomitanza con l'inizio della stasi vegetativa estiva in bosco, si è proceduto ad un confronto dei suddetti parametri morfometrici tra i due vassoi e i semenzali cresciuti in ambiente naturale.

#### **2.1.5.6.2.4. Confronto morfometrico tra semenzali cresciuti in bosco, serra e camera di crescita**

Dopo aver analizzato le variazioni, in termini di durata delle fasi fenologiche, tra ambiente naturale, seminaturale e controllato, constatando una maggiore velocità di crescita sotto luci LED (dovuta ad un maggior numero di cicli vegetativi che si susseguono in un breve arco di tempo), è stato effettuato un confronto morfometrico tra semenzali cresciuti da novembre (periodo di germinazione) a giugno (inizio della stasi vegetativa estiva) in bosco e semenzali cresciuti per 30 giorni (novembre-dicembre) sotto lampade artificiali (FLUORA; LED: AP67 tubes, AP67 bars, NS1, G2, AP67-3L) in vassoi quickpot QPD104VW (104 ghiande/vassoio). Le ghiande sono state fatte pregerminare in perlite sterile al buio quindi seminate in substrato misto 1. In tal modo si è tentato di valutare se 30 giorni di crescita in ambiente controllato siano sufficienti all'ottenimento di semenzali di dimensioni corrispondenti (o superiori) a quelle osservabili mediamente in una sughereta naturale al termine del primo ciclo di accrescimento, ovvero in corrispondenza del primo arresto nella crescita delle piante, dovuto all'incremento termico (associato ad un contemporaneo decremento dell'umidità dell'aria e del suolo) caratteristico della stagione arida estiva, propria dell'area mediterranea. Nello specifico sono stati selezionati in maniera random 10 semenzali per condizione di crescita e ne sono stati misurati i seguenti parametri: altezza del fusto, diametro del fusto a livello del colletto, numero delle foglie, peso fresco e secco dello stelo, peso fresco e secco delle foglie, rapporto di snellezza (altezza/diametro).

#### **2.2. Analisi statistica**

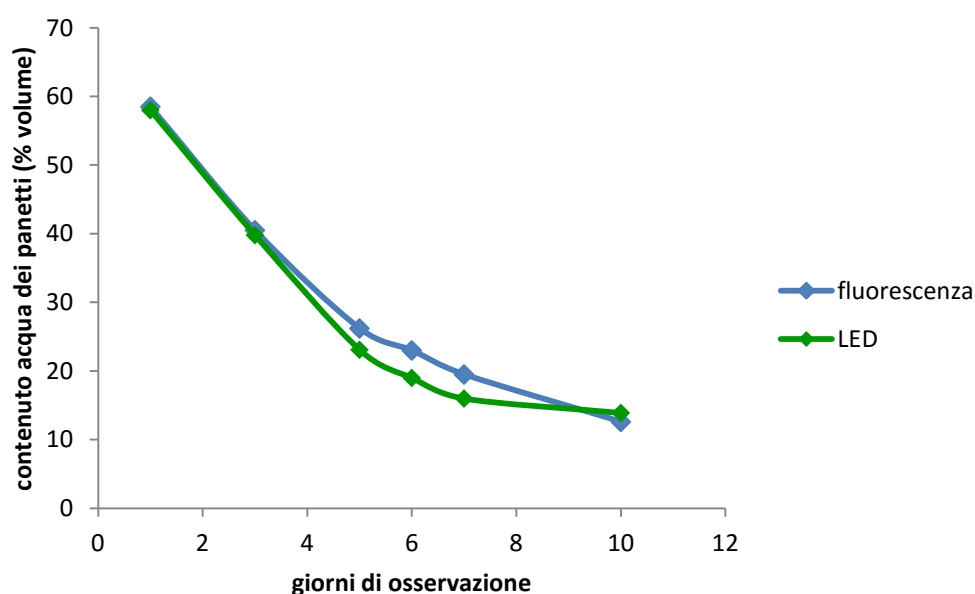
Tutti i dati relativi ai parametri di crescita rilevati, sono stati analizzati in ambiente R, applicando in successione il test di Shapiro Wilks per confermare la normalità dei dati e quindi t-test di Student o ANOVA test + Tukey's HSD test. È stato scelto un livello di probabilità pari a 0.05 (5%).

### 3. Risultati

#### 3.1. Attività svolte presso l'UNITUS

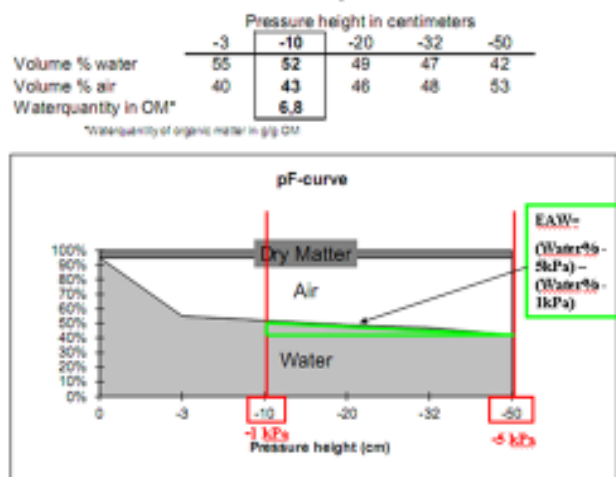
##### 3.1.1. Substrato Jiffy Preforma: analisi delle proprietà idrauliche del substrato, sotto lampade LED e a fluorescenza, in assenza di piante

Il test di valutazione dell'evaporazione dei panetti di substrato in assenza di piante nel corso di 10 giorni, non ha mostrato differenze statisticamente significative in termini di riduzione del peso fresco del substrato tra le due fonti luminose (lampade a fluorescenza e lampade LED, Fig. 61).



**Figura 61. Evaporazione dei panetti di substrato Jiffy esposti a luce a fluorescenza e LED nel corso di 10 giorni**

In accordo con la curva di ritenzione del suolo (pF curve), il substrato Preforma mostra un valore molto basso di EAW. Ricordiamo che con tale sigla si intende la frazione di riserva idrica utilizzabile che la pianta può estrarre prima di entrare in uno stato di stress idrico, ovvero la riserva facilmente utilizzabile.



**Figura 62. pF curve del substrato Jiffy Preforma con indicato il range di EAW**

Ad una pressione pari a -1 kPa il substrato contiene il 52% di acqua mentre a -5 kPa ne contiene il 42% (Fig. 62). La riserva facilmente utilizzabile corrisponde dunque ad un 10% della riserva idrica disponibile. Ciò significa che per ogni litro di substrato vi sono 100 ml di acqua disponibili (2,7 ml di acqua per un panetto da 27 cm<sup>3</sup>).

Perché tale riserva sia omogeneamente distribuita all'interno del panetto è necessario che il substrato sia ben drenante, ovvero dotato di alta permeabilità. D'altra parte, man mano che un panetto si disidrata la sua permeabilità diminuisce. Molti materiali sono facili da reidratare (es. sabbia, pomice, polvere di cocco) mentre altri non lo sono (es. torba e terreni a base di torba come il Jiffy Preforma). La ragione primaria è che la torba, una volta disidratata, stenta ad assorbire nuova acqua a causa della perdita dell'originale struttura del substrato. Anche all'interno del gruppo delle torbe ci sono grandi differenze. Le torbe chiare spesso appaiono meno soggette a tale fenomeno rispetto alle torbe scure. Per tal motivo un substrato come il Jiffy va reidratato molto frequentemente.

Analizzando la curva di disidratazione dei panetti, prendendo in considerazione il range appena definito di EAW (52-42%), è possibile affermare che:

- partendo da un panetto contenente un volume di acqua vicino al limite superiore del range EAW (~50%) si assiste ad un decremento esponenziale e

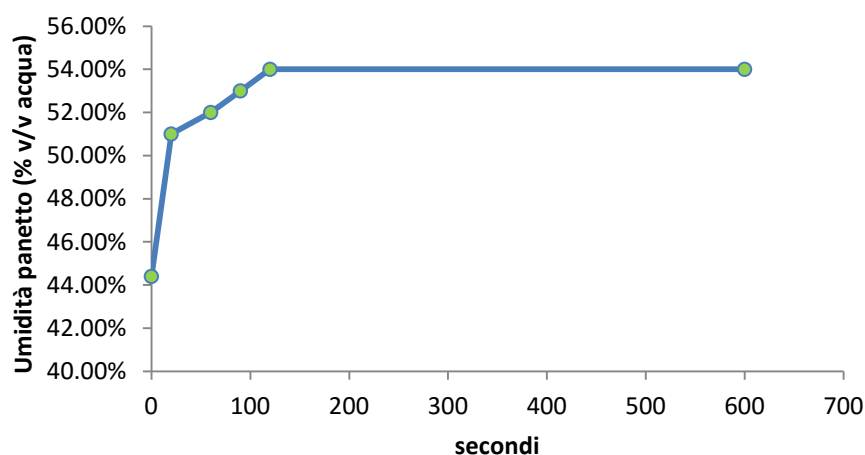
rapido nella riserva facilmente utilizzabile nel corso di 2 giorni (~40%), indipendentemente dalla fonte luminosa cui è esposto il substrato.

- La disidratazione prosegue in maniera esponenziale per 5 giorni, quando si raggiunge un peso fresco pari alla metà di quello di partenza.
- Da questo momento in poi, l'acqua residua viene trattenuta in maniera tenace, probabilmente grazie al contenuto in amido del panetto ed il cambiamento giornaliero del peso fresco si reduce. L'amido è un polimero utile a stabilizzare il substrato e risulta essere un aiuto alla gestione idrica delle colture. Il polimero può assorbire acqua fin oltre 200 volte il suo peso riducendo fino al 50% i turni di irrigazione necessari per garantire l'ottimale idratazione del substrato.
- Per mantenere il substrato nel range dell'EAW, evitando una disidratazione eccessiva, è necessario mettere appunto un protocollo di irrigazione basato su irrigazioni limitate in senso quantitativo ma frequenti (~2,7 ml di acqua per panetto quando l'umidità sia scesa al 40%).
- L'assenza di differenze significative nel comportamento dei panetti sotto fluorescenza e luci LED contrasta con la nota capacità dei LED di emettere minori quantità di calore, limitando il surriscaldamento delle superfici e dunque l'evaporazione dell'acqua. In questo caso, la rapida disidratazione osservata anche sotto LED è da imputarsi al sistema di aerazione a ventole presente su ogni ripiano, sistema assente nella cella a fluorescenza laddove sono stati condotti in contemporanea gli esperimenti.

### **3.1.2. Irrigazione: definizione del tempo minimo di immersione dei vassoi in acqua**

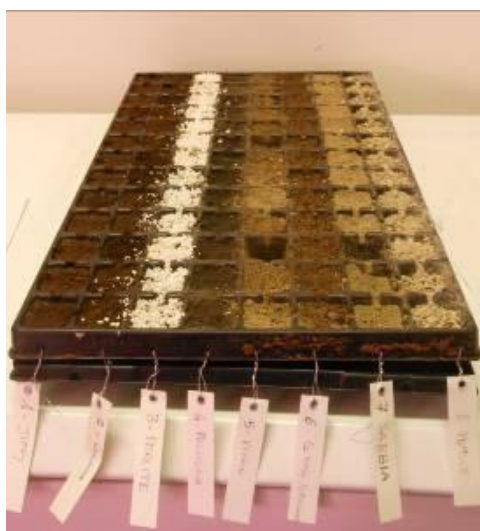
Il test di reidratazione dei panetti di substrato Jiffy, finalizzato a riportare l'umidità al limite superiore del range EAW (52% volume di acqua) ha mostrato come 60 secondi di immersione dei panetti in acqua (con modalità di irrigazione a flusso e riflusso) siano sufficienti a raggiungere tale scopo. In 90 secondi si è raggiunto un valore pari al 53% di contenuto in volume di acqua; in 120 secondi il 54% (Fig. 63). Di conseguenza, per essere certi di aver inumidito a sufficienza il substrato, è conveniente applicare una immersione di 120 secondi.

Una volta raggiunto il limite superiore del range EAW è stata monitorata la disidratazione del panetto fino al limite inferiore (42%) sotto le lampade LED Valoya, selezionate per il progetto Zephyr. Sono state necessarie circa 48 ore senza attivazione del sistema di aerazione a ventole e 24 ore con sistema attivato. Tale substrato necessita dunque al massimo di un ciclo di irrigazione al giorno. In presenza di piante tale periodo va di certo diminuito, considerando non più la sola evaporazione ma l'effetto della evapotraspirazione sul contenuto totale di acqua dei panetti.



**Figura 63. Test di reidratazione dei panetti di substrato Jiffy Preforma nel range EAW**

### 3.1.3. Valutazione di substrati alternativi



**Figura 64. Analisi delle proprietà idrauliche di diversi substrati**

Utilizzando un sistema a subirrigazione (1 litro di acqua per vassoio), i substrati differenti (Fig. 64) hanno mostrato velocità di assorbimento diverse (considerando terminato l'esperimento quando la superficie del panetto fosse umida):

- Solo pochi secondi (< 1 minuto): Jiffy, sabbia di fiume, perlite e pozzolana
- 4 minuti: Substrato misto 1
- Nessun assorbimento: Pomice e substrato misto 2

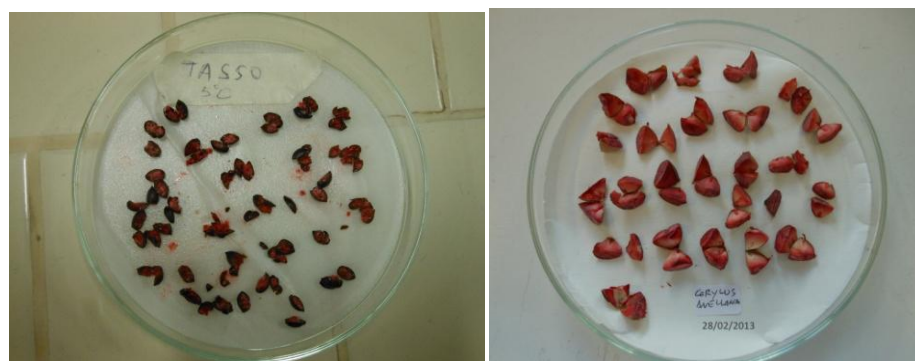
Il substrato misto 1, in virtù della minore velocità di assorbimento, che si associa di conseguenza anche ad una minore velocità di disidratazione, è risultato più agevole da gestire per le prove in camera di crescita prive di un sistema automatico di irrigazione.

Il terreno Jiffy è stato invece ritenuto idoneo per le coltivazioni all'interno del prototipo automatizzato.

### 3.1.4. Specie oggetto di studio durante il dottorato

#### 3.1.4.1. Test di vitalità

A causa di impedimenti quali dimensioni eccessivamente limitare del seme o difficoltà di rimozione del pericarpo, non tutte le specie studiate sono state sottoposte a test di vitalità ai Sali di tetrazolo (Fig. 65). Nella tabella seguente (Tab. 4) sono riportate le percentuali di vitalità derivate dal test. Le alte percentuali rilevate in media per tutte le specie analizzabili hanno consentito di decretare la bontà del seme, che è stato quindi sottoposto agli opportuni pretrattamenti di induzione della germinazione.



**Figura 65. Esempi di test di vitalità con sali di tetrazolio**

| <b>Specie</b>                                                 | <b>Percentuale di vitalità</b>                                                                                           |
|---------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Corylus avellana L.</i>                                    | 100%                                                                                                                     |
| <i>Frangula azorica Grubov</i>                                | test non effettuato a causa della difficoltà di rimozione del pericarpo.                                                 |
| <i>Fraxinus excelsior L.</i>                                  | 94%                                                                                                                      |
| <i>Fraxinus ornus L.</i>                                      | test non effettuato a causa delle limitate dimensioni del seme                                                           |
| <i>Hypericum foliosum Aiton</i>                               | test non effettuato a causa delle limitate dimensioni del seme                                                           |
| <i>Laurus azorica (Seub.) Franco</i>                          | 80%                                                                                                                      |
| <i>Morella faya (Aiton) Wilbur</i>                            | test non effettuato a causa delle limitate dimensioni del seme                                                           |
| <i>Platanus orientalis L.</i>                                 | test non effettuato a causa delle limitate dimensioni del seme                                                           |
| <i>Prunus lusitanica L. spp azorica (Mouvillefert) Franco</i> | 100%                                                                                                                     |
| <i>Quercus suber L.</i>                                       | le ghiande appena cadute dall'albero sono considerate vitali al 100% dunque non vengono generalmente sottoposte al test. |
| <i>Taxus baccata L.</i>                                       | 100%                                                                                                                     |

**Tab. 4. Risultati del test di vitalità ai sali di tetrazolio**

### 3.1.4.2. Percentuali di germinazione in seguito a pretrattamenti

| Specie                         | Pretrattamento                                                                                       | Percentuale di germinazione |
|--------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------|
| <i>Corylus avellana L.</i>     | Vernalizzazione in perlite 2 mesi a 4°C                                                              | 80%                         |
| <i>Frangula azorica Grubov</i> | Nessun pretrattamento-incubazione a 20°C                                                             | 0%                          |
|                                | 18 ore in soluzione GA3 200 mg/L in agitazione al buio + incubazione a 20°C                          | 0%                          |
|                                | 18 ore in soluzione GA3 200 mg/L in agitazione al buio + 30 giorni di stratificazione a freddo (4°C) | 0%                          |
|                                | 18 ore in soluzione GA3 200 mg/L in agitazione al buio + 60 giorni di stratificazione a freddo (4°C) | 0%                          |
|                                | 30 giorni di stratificazione a freddo (4°C)                                                          | 0%                          |
|                                | 60 giorni di stratificazione a freddo (4°C)                                                          | 0%                          |
| <i>Fraxinus excelsior L.</i>   | stratificazione all'aperto in cassetta contenente sabbia di fiume per 3 mesi                         | 98%                         |

|                                      |                                                                                                      |      |
|--------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------|
| <i>Fraxinus ornus L.</i>             | 18 ore in soluzione GA3 200 mg/L in agitazione al buio                                               | 100% |
| <i>Hypericum foliosum Aiton</i>      | Nessun pretrattamento-incubazione a 20°C                                                             | 5%   |
|                                      | 18 ore in soluzione GA3 200 mg/L in agitazione al buio + incubazione a 20°C                          | 10%  |
|                                      | 18 ore in soluzione GA3 200 mg/L in agitazione al buio + 30 giorni di stratificazione a freddo (4°C) | 80%  |
|                                      | 18 ore in soluzione GA3 200 mg/L in agitazione al buio + 60 giorni di stratificazione a freddo (4°C) | 100% |
|                                      | 30 giorni di stratificazione a freddo (4°C)                                                          | 100% |
|                                      | 60 giorni di stratificazione a freddo (4°C)                                                          | 100% |
| <i>Laurus azorica (Seub.) Franco</i> | Nessun pretrattamento-incubazione a 20°C                                                             | 36%  |
|                                      | 18 ore in soluzione GA3 200 mg/L in agitazione al buio + incubazione a 20°C                          | 68%  |
|                                      | 18 ore in soluzione GA3 200 mg/L in agitazione al buio + 30 giorni di stratificazione a freddo (4°C) | 40%  |
|                                      | 18 ore in soluzione GA3 200 mg/L in agitazione al buio + 60 giorni di stratificazione a freddo (4°C) | 72%  |

|                                                                            |                                                                                                      |     |
|----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
|                                                                            | 30 giorni di stratificazione a freddo (4°C)                                                          | 30% |
|                                                                            | 60 giorni di stratificazione a freddo (4°C)                                                          | 60% |
| <i>Morella faya</i> (Aiton)<br>Wilbur                                      | Nessun pretrattamento-<br>incubazione a 20°C                                                         | 0%  |
|                                                                            | 18 ore in soluzione GA3 200 mg/L in agitazione al buio + incubazione a 20°C                          | 0%  |
|                                                                            | 18 ore in soluzione GA3 200 mg/L in agitazione al buio + 30 giorni di stratificazione a freddo (4°C) | 0%  |
|                                                                            | 18 ore in soluzione GA3 200 mg/L in agitazione al buio + 60 giorni di stratificazione a freddo (4°C) | 0%  |
|                                                                            | 30 giorni di stratificazione a freddo (4°C)                                                          | 0%  |
|                                                                            | 60 giorni di stratificazione a freddo (4°C)                                                          | 0%  |
| <i>Platanus orientalis</i> L.                                              | No pretrattamento-<br>incubazione a 22°C al buio                                                     | 80% |
| <i>Prunus lusitanica</i> L.<br>spp. <i>Azorica</i><br>(Mouillefert) Franco | Nessun pretrattamento-<br>incubazione a 20°C                                                         | 0%  |
|                                                                            | 18 ore in soluzione GA3 200 mg/L in agitazione al buio + incubazione a 20°C                          | 0%  |
|                                                                            | 18 ore in soluzione GA3 200 mg/L in agitazione al buio + 30 giorni di stratificazione a freddo (4°C) | 0%  |

|                         |                                                                                                      |     |
|-------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
|                         | 18 ore in soluzione GA3 200 mg/L in agitazione al buio + 60 giorni di stratificazione a freddo (4°C) | 0%  |
|                         | 30 giorni di stratificazione a freddo (4°C)                                                          | 0%  |
|                         | 60 giorni di stratificazione a freddo (4°C)                                                          | 0%  |
| <i>Quercus suber L.</i> | No pretrattamento-incubazione a 22°C al buio                                                         | 95% |
| <i>Taxus baccata L.</i> | 9 mesi di stratificazione a freddo (4°C)                                                             | 10% |

**Tab.5. Effetto di differenti pretrattamenti di germinazione**

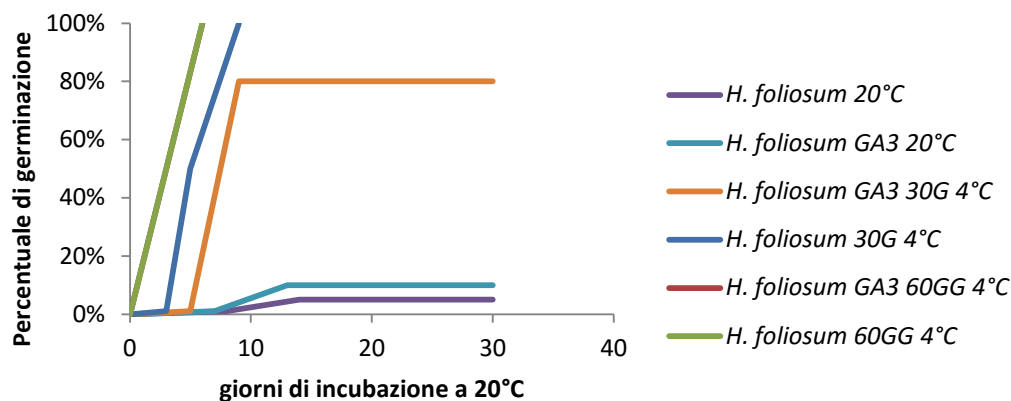
Tra le specie che hanno risposto positivamente ai pretrattamenti effettuati (Tab. 5), sono state selezionate per la successiva fase di coltivazione in ambiente controllato le seguenti:

- *Corylus avellana L.*
- *Fraxinus excelsior L.*
- *Platanus orientalis L.*
- *Quercus suber L.*

Per quanto concerne le specie autoctone delle Isole Azzorre, tali studi di germinazione sono stati condotti per coadiuvare Azorina, il partner del progetto Zephyr con sede presso le isole Azzorre (Portogallo), responsabile dei test di coltivazione indoor di tali specie. Pertanto presso i laboratori Unitus non si è proceduto oltre la fase di germinazione. Le specie che hanno dato risultati ottimali di germinazione tra le 4 testate (*Morella faya*, *Prunus lusitanica azorica*, *Laurus azorica* e *Hypericum foliosum*) sono state soltanto due: *Laurus azorica* e *Hypericum foliosum*.

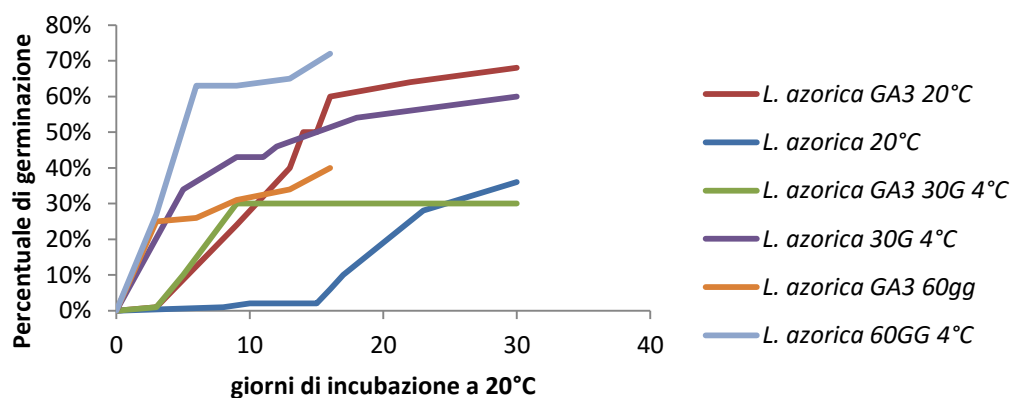
*H. foliosum* nello specifico ha mostrato un 100% di germinazione in soli 3 giorni come conseguenza di 30/60 giorni di stratificazione a freddo e 80% nel caso di stratificazione seguita a trattamento ormonale con GA3. Tali risultati sono

significativamente superiori rispetto alle percentuali di germinazione ottenute con incubazione diretta a 20°C (5%) o semplice trattamento ormonale (10%) (Fig. 66).



**Figura 66. Germinazione di *H. foliosum* in seguito a pretrattamenti**

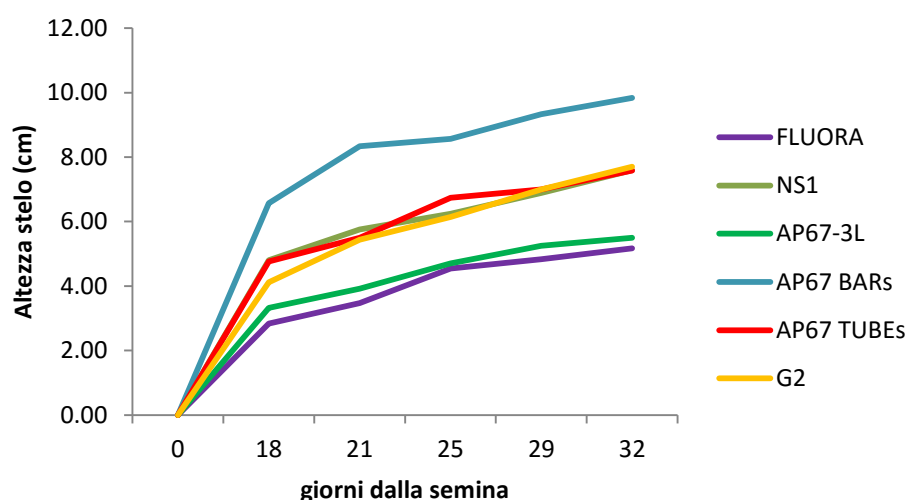
*L. azorica* ha mostrato i migliori risultati (70% di germinazione) in seguito a 60 giorni di stratificazione a freddo oppure a trattamento ormonale con GA3. Anche in questo caso, tale valore è risultato statisticamente significativo rispetto alla percentuale di germinazione ottenuta con incubazione diretta a 20°C o con pretrattamenti combinati con GA3 seguito da stratificazione a freddo (Marras e Pietrzak, 2015) (Fig. 67).



**Figura 67. Germinazione di *L. azorica* in seguito a pretrattamenti**

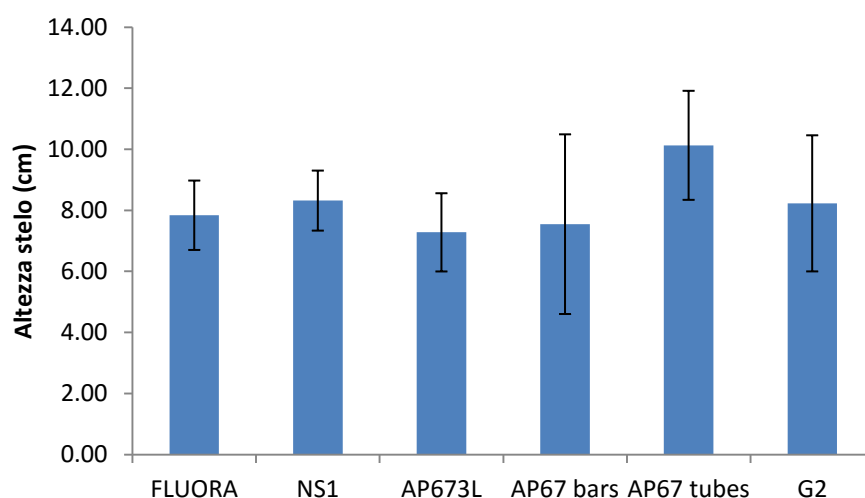
### 3.1.4.3. Coltivazione indoor: analisi dei semenzali

- *Corylus avellana* L.



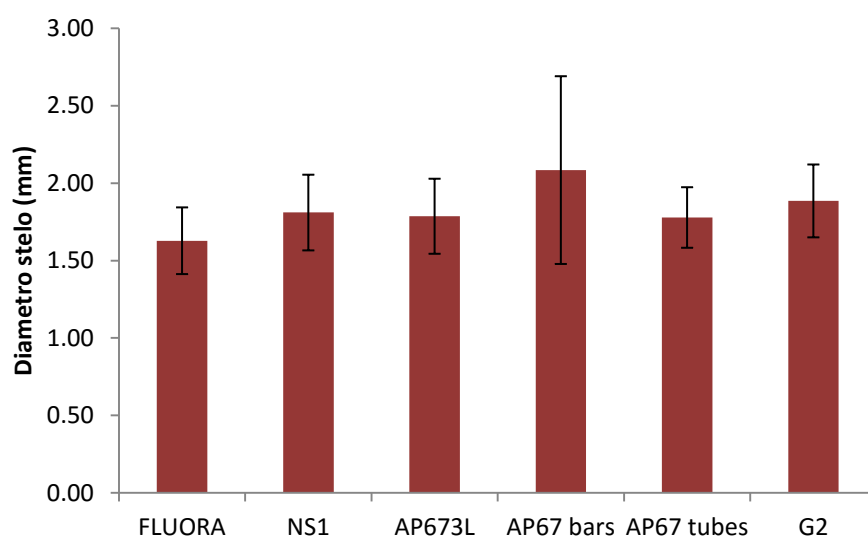
**Figura 68. Curve di crescita di *C. avellana* (indoor)**

Dall'analisi delle curve di crescita indoor, si evince come il nocciolo mostri una tendenza ad un maggior accrescimento sotto lampade LED rispetto alle tradizionali lampade a fluorescenza, fatta eccezione per lo spettro AP673L che ha mostrato risultati compatibili con quelli osservati sotto OSRAM FLUORA. Dei restanti 4 spettri Valoya, il migliore in termini di sviluppo in altezza dei semenzali è risultato essere AP67 bars. Non si notano differenze significative nelle performance di crescita sotto NS1, G2 e AP67 tubes (Fig. 68).

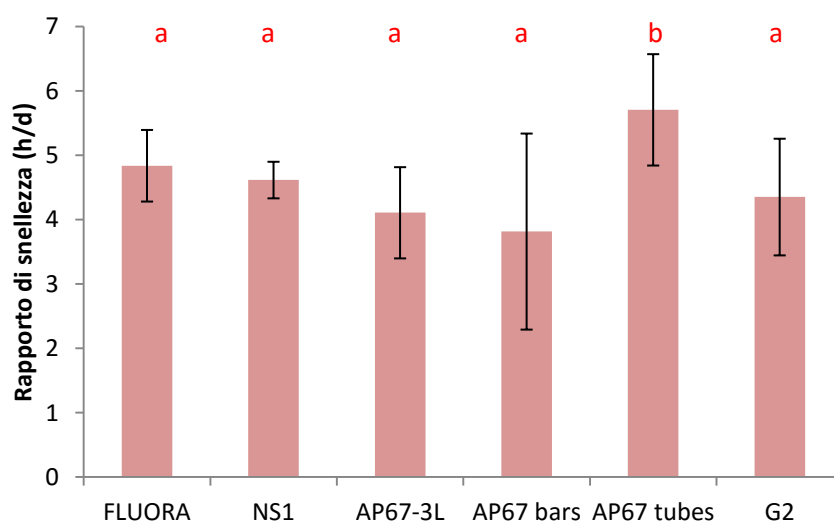


**Figura 69. Altezza dello stelo di *C. avellana* al termine del ciclo indoor**

Dalle analisi morfometriche e distruttive effettuate su un campione di 24 semenzali al termine del mese di coltivazione indoor, in realtà non è stato possibile riscontrare significative differenze in termini di altezza media dei semenzali (Fig. 69). La discostanza dai risultati delle curve di crescita è da attribuirsi alla forte biodiversità dei semenzali derivanti da seme. In entrambi i casi si conferma, ad ogni modo, una performance migliore della specie sotto LED NS1, G2, AP67bars e AP67 tubes e minore accrescimento sotto OSRAM FLUORA e AP67 3L.

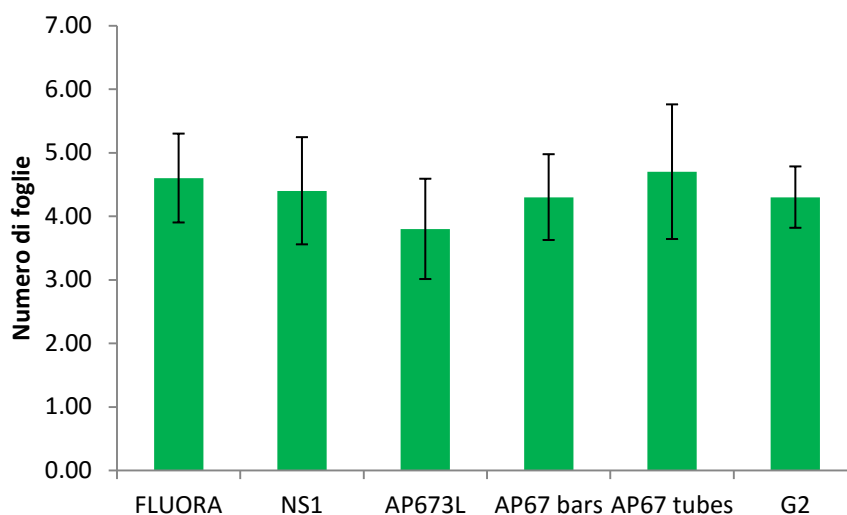


**Figura 70. Diametro dello stelo di *C. avellana* al termine del ciclo indoor**



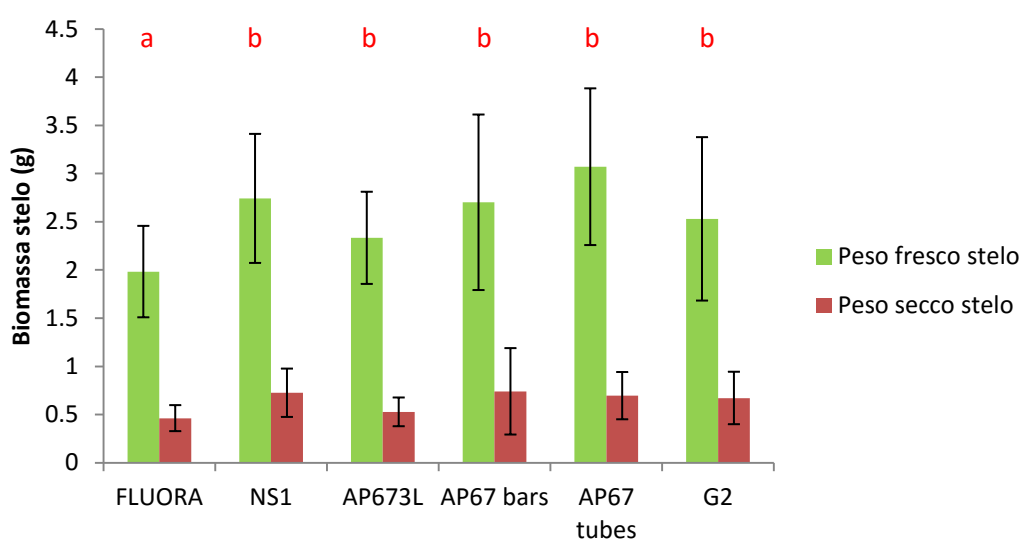
**Figura 71. Rapporto di snellezza di *C. avellana* al termine del ciclo indoor**

Il diametro dello stelo non ha mostrato differenze significative (Fig. 70). A partire dai dati relativi all'altezza dei semenzali e al diametro al colletto è stato ricavato il rapporto di snellezza (Fig. 71). In relazione a tale parametro è stata evidenziata una omogeneità nello sviluppo delle piantine sotto tutti gli spettri, fatta eccezione per AP67 tubes che dà luogo a semenzali più snelli.



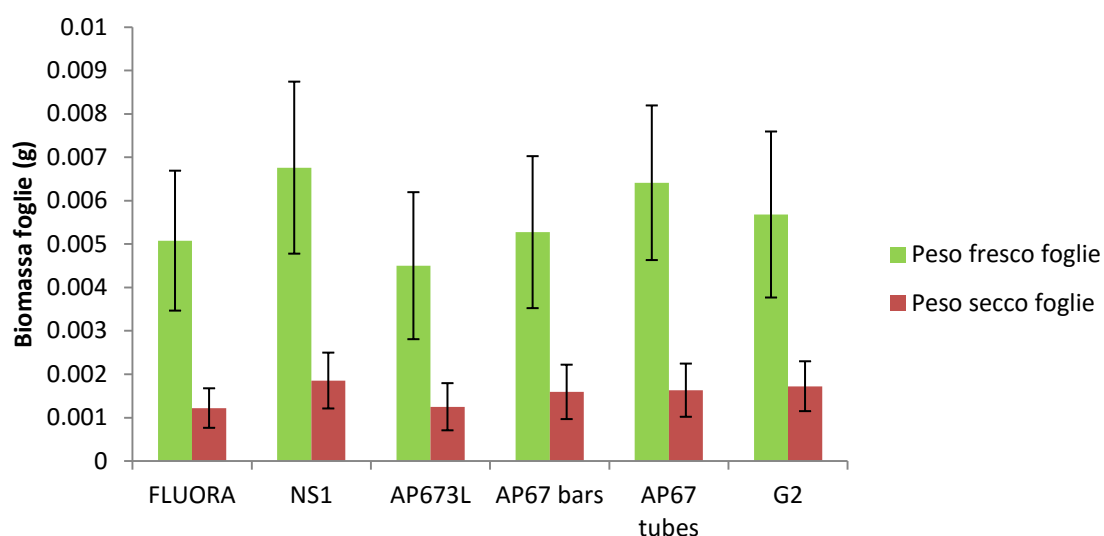
**Figura 72. Numero di foglie di *C. avellana* al termine del ciclo indoor**

Anche nel caso del numero di foglie non sono state rilevate differenze significative tra le varie fonti luminose (Fig. 72).



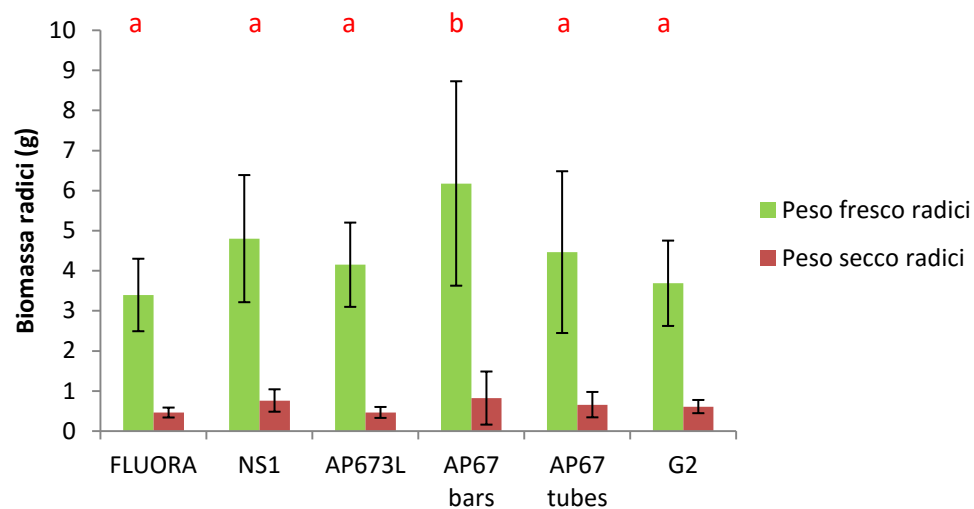
**Figura 73. Biomassa dello stelo di *C. avellana* al termine del ciclo indoor**

Le analisi distruttive hanno mostrato, in termini di biomassa dello stelo, una significativa differenza in peso fresco tra fluorescenza e LED. Nello specifico, il peso è risultato essere significativamente inferiore sotto lampade a fluorescenza. Tale differenza è scomparsa in seguito ad essiccamento e valutazione del peso secco (Fig. 73). La motivazione base potrebbe essere legata alla maggiore evaporazione dei tessuti sotto lampade a fluorescenza, che ne determina una riduzione in peso.



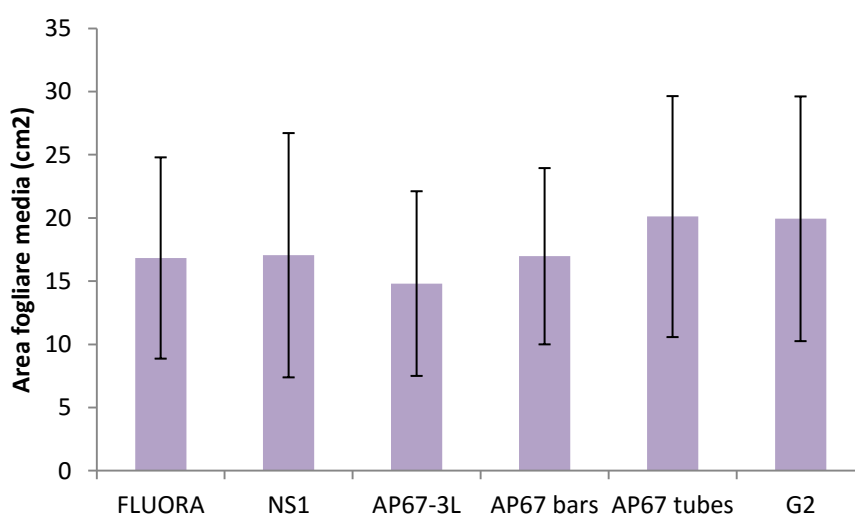
**Figura 74. Biomassa delle foglie di *C. avellana* al termine del ciclo indoor**

In termini di biomassa fogliare, nonostante l'assenza di differenze significative tra i vari spettri, NS1 si è rivelata essere la lampada più promotrice insieme a AP67 tubes, al contrario di FLUORA e AP673L che hanno mostrato i valori minori, sia in termini di peso fresco sia secco (Fig. 74).

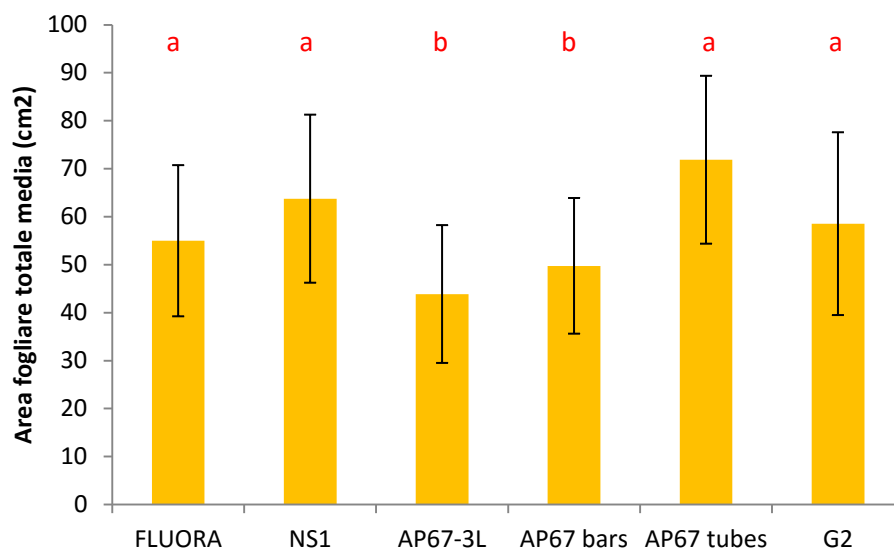


**Figura 75. Biomassa delle radici di *C. avellana* al termine del ciclo indoor**

In termini di biomassa ipogea, AP67 bars è apparsa quale fonte luminosa in grado di potenziare maggiormente lo sviluppo radicale dei semenzali, almeno in termini di peso fresco. Le restanti fonti luminose non hanno mostrato significative differenze. Anche in questo caso, dopo essiccamento e valutazione del peso secco radicale, sono state annullate le differenze tra le varie lampade. In tal caso si potrebbe supporre un effetto positivo da parte di AP67 bars sul grado di assorbimento di acqua dal terreno da parte delle radici (Fig. 75).



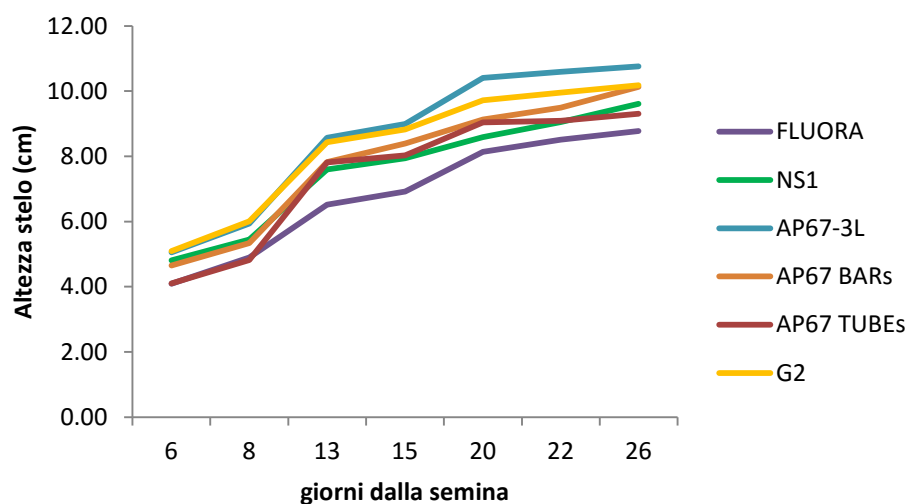
**Figura 76. Area fogliare media di *C. avellana* al termine del ciclo indoor**



**Figura 77. Area fogliare totale media di *C. avellana* al termine del ciclo indoor**

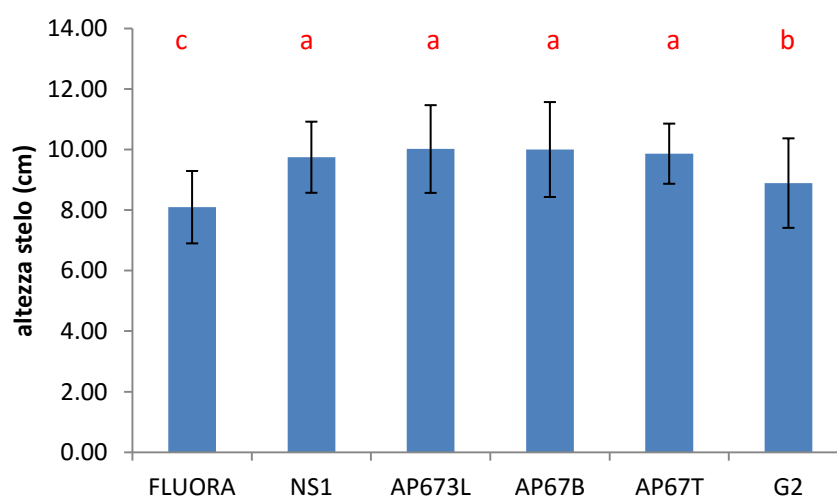
L'area fogliare media non è risultata essere influenzata dalle differenze spettrali. L'elevata deviazione standard deriva dalla presenza, su ciascun semenzale, indipendentemente dunque dallo spettro considerato, di ampie foglie ben sviluppate e piccole foglie in via di sviluppo al termine del primo mese di pre-coltivazione (Fig. 76). La somma delle singole aree fogliari per semenzale ha invece evidenziato un effetto promuovente da parte degli spettri FLUORA, NS1 e AP67 tubes, al contrario di AP67-3L e AP67 bars che hanno mostrato i valori minori di area fogliare totale (Fig. 77). Sebbene non sia stata evidenziata dai risultati dell'analisi statistica una influenza dei differenti spettri sul numero di foglie emesse dai semenzali, osservando attentamente il grafico relativo a tale parametro è possibile notare come AP67-3L e AP67 bars mostrino medie inferiori ai restanti spettri. Medesima condizione può essere osservata nel grafico relativo alle aree fogliari medie. Tali valori, leggermente inferiori alle medie riscontrate sotto i restanti spettri, possono essere i fattori determinanti un'area fogliare totale significativamente inferiore sotto AP67-3L e AP67 bars rispetto che sotto le altre fonti luminose.

- *Fraxinus excelsior* L.



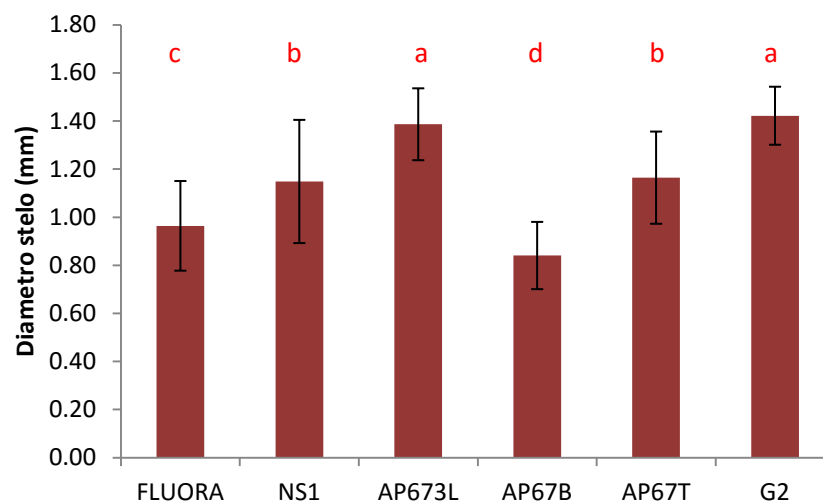
**Figura 78. Curve di crescita di *F. excelsior* (indoor)**

Dall'analisi delle curve di crescita, si evince che i semenzali di *F. excelsior* mostrino un maggior accrescimento sotto lampade LED piuttosto che sotto fluorescenza, senza significative differenze tra i vari spettri LED (Fig. 78).



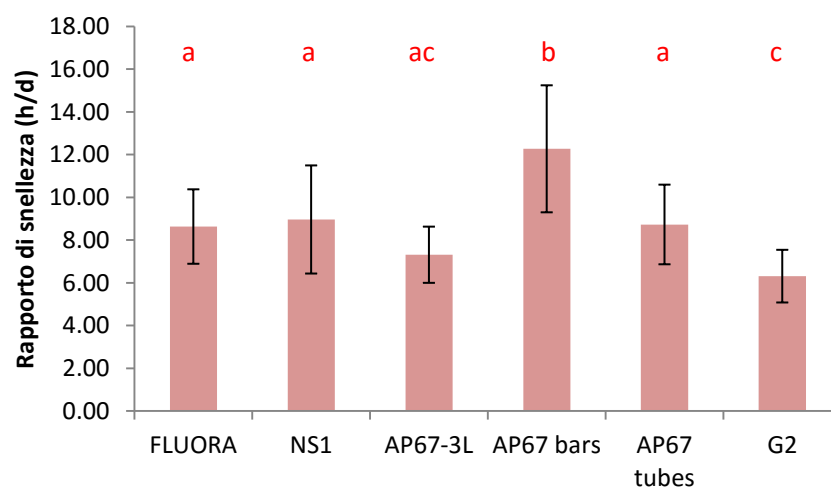
**Figura 79. Altezza dello stelo di *F. excelsior* al termine del ciclo indoor**

Le analisi morfometriche hanno confermato un minore accrescimento dei semenzali sotto lampade a fluorescenza rispetto che sotto LED, con l'eccezione di G2 che ha mostrato un comportamento più simile alla fluorescenza che ai restanti spettri Valoya (Fig. 79).



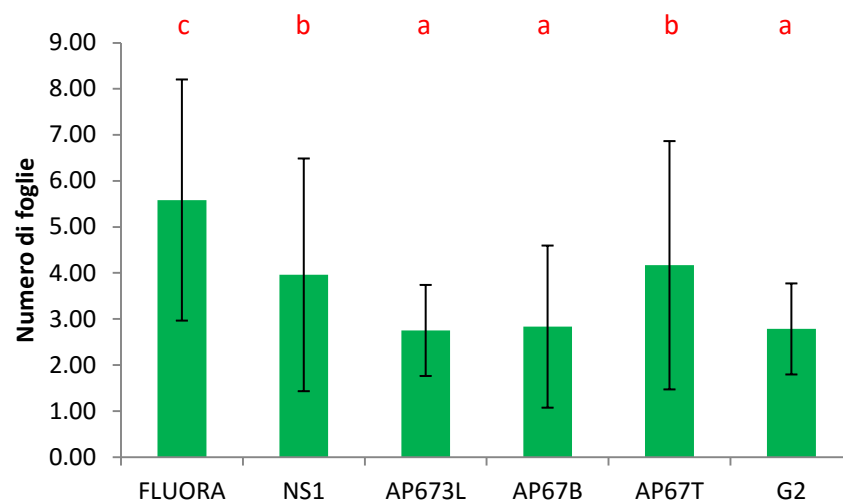
**Figura 80. Diametro dello stelo di *F. excelsior* al termine del ciclo indoor**

I valori medi ottenuti per il diametro al colletto hanno mostrato notevoli differenze tra le varie lampade. Nello specifico i valori più bassi si sono riscontrati sotto FLUORA e AP67 bars, i più elevati sotto G2 e AP673L (Fig. 80).



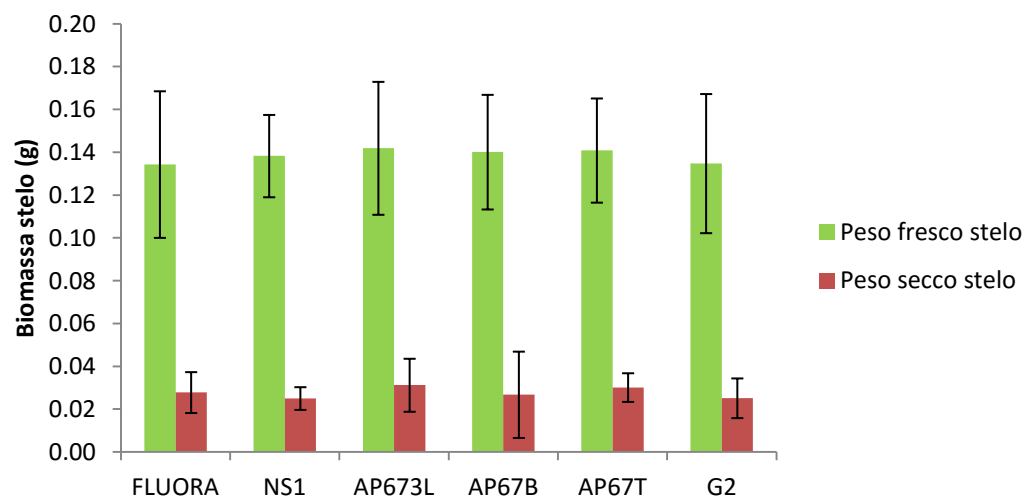
**Figura 81. Rapporto di snellezza di *F. excelsior* al termine del ciclo indoor**

In termini di rapporto di snellezza non sono state riscontrate differenze significative tra fluorescenza e spettri LED NS1, AP67 tubes e AP67-3L. Lo spettro AP67 bars ha condotto a semenzali decisamente più snelli, al contrario di G2 che ha portato allo sviluppo di semenzali bassi e robusti (Fig. 81).



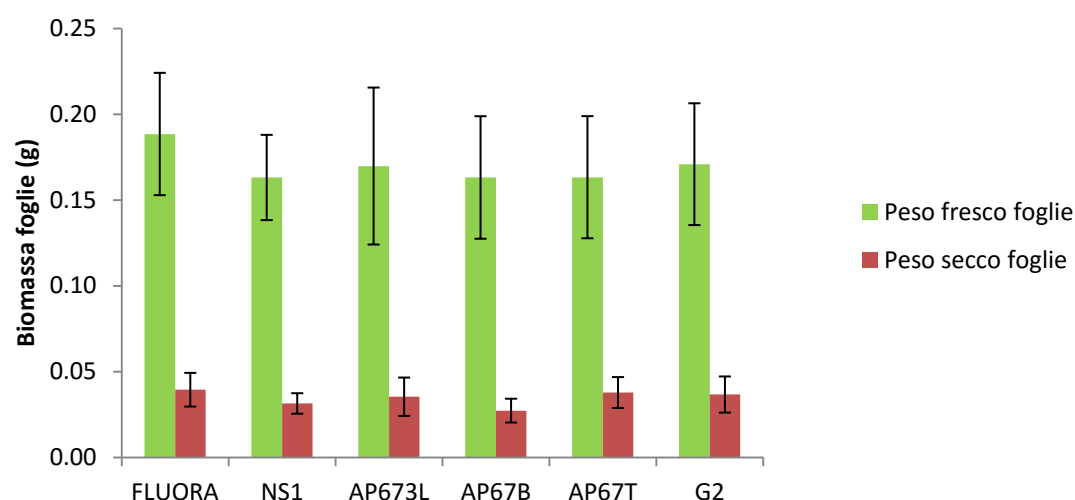
**Figura 82. Numero di foglie di *F. excelsior* al termine del ciclo indoor**

Al contrario dei parametri precedentemente affrontati, il numero di foglie è apparso superiore sotto lampade a fluorescenza. Risultati inferiori ma altrettanto alti sono associati a NS1 e AP67 tubes. Un minor numero di foglie è stato osservato invece sotto AP673L, G2 e AP67 bars (Fig. 82).



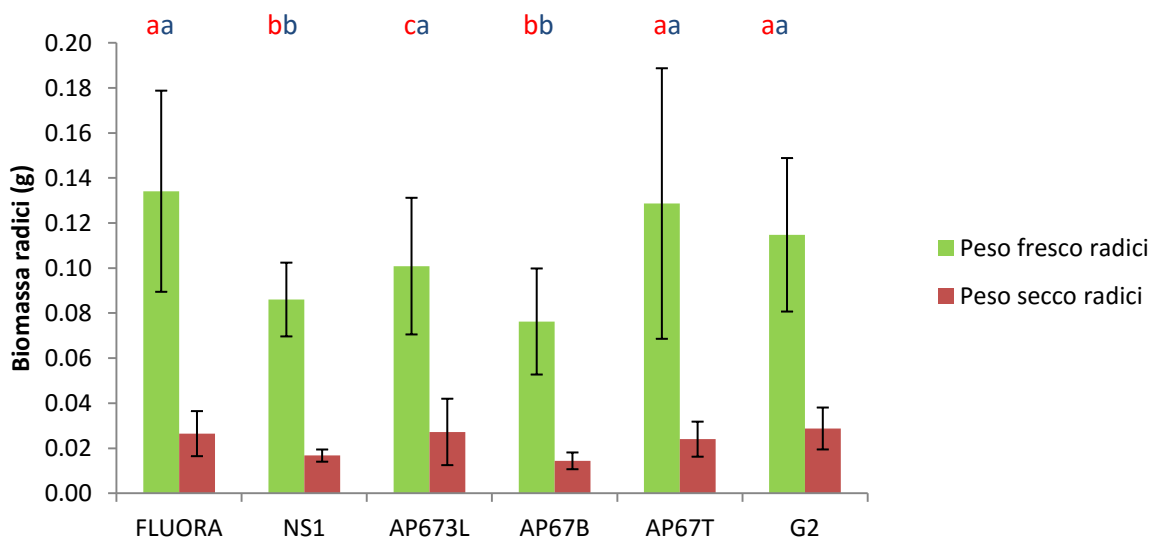
**Figura 83. Biomassa dello stelo di *F. excelsior* al termine del ciclo indoor**

Le prove distruttive non hanno mostrato significative differenze tra le varie fonti luminose, per quanto concerne la biomassa dello stelo dei semenzali, né in termini di peso fresco né secco (Fig. 83).



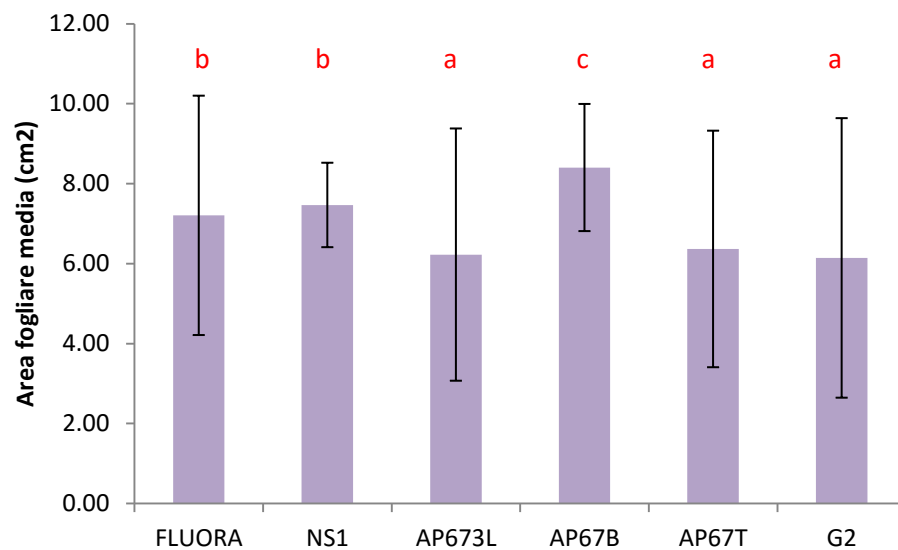
**Figura 84. Biomassa delle foglie di *F. excelsior* al termine del ciclo indoor**

Come osservato per la biomassa dello stelo, anche per quanto concerne le foglie, i semenzali non hanno mostrato significative differenze tra le varie fonti luminose. FLUORA manifesta però il valore medio più alto in termini di peso fresco, come risultato del maggior numero di foglie già osservato in precedenza (Fig. 84).

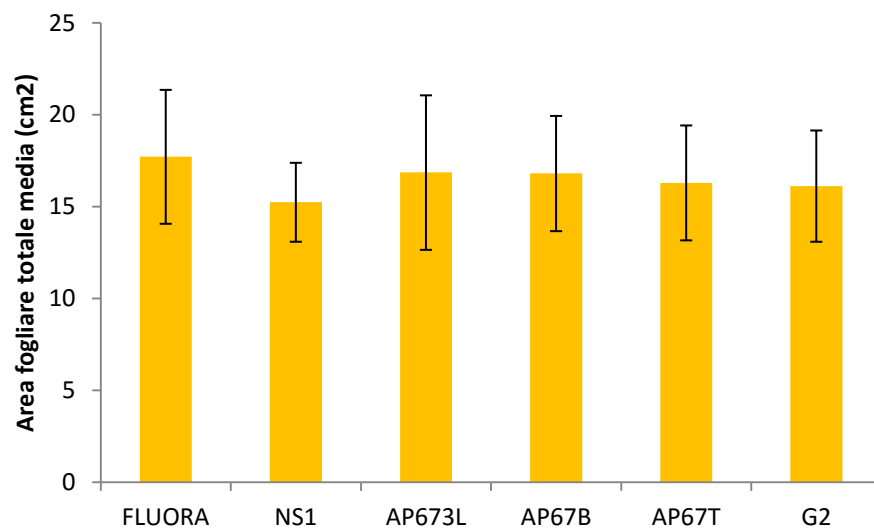


**Figura 85. Biomassa delle radici di *F. excelsior* al termine del ciclo indoor**

Maggiori differenze sono state riscontrate in termini di biomassa ipogea. Le lampade in grado di indurre un maggior sviluppo radicale (in termini di peso fresco) risultano essere FLUORA, AP67 tubes e G2. In termini di peso secco tali lampade si riconfermano quali migliori, con l'aggiunta di AP673L (Fig. 85).



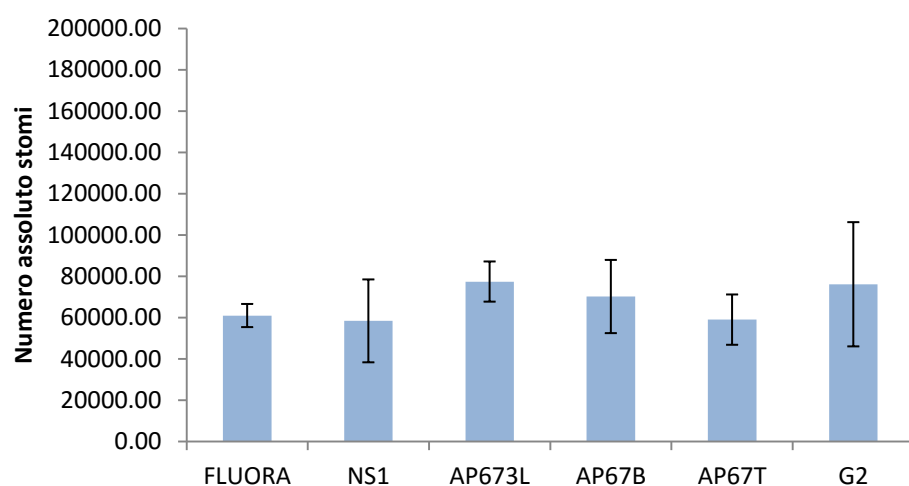
**Figura 86. Area fogliare media di *F. excelsior* al termine del ciclo indoor**



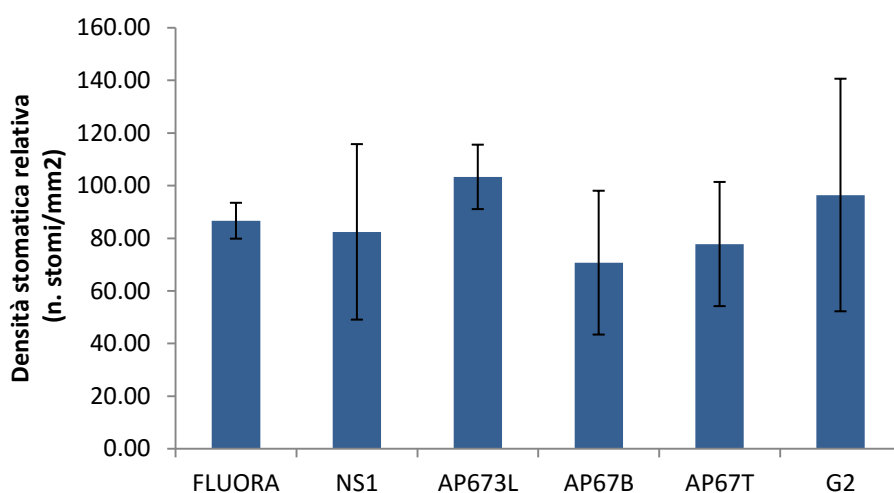
**Figura 87. Area fogliare totale media di *F. excelsior* al termine del ciclo indoor**

L'analisi microscopica delle aree fogliari ha mostrato significative differenze in termini di area media della singola foglia. In particolare si sono riscontrate aree maggiori sotto AP67 bars e minori sotto AP673L, G2 e AP67 tubes (Fig. 86).

Al contrario, considerando l'area fogliare totale della singola pianta, non sono state riscontrate differenze significative tra le varie fonti luminose (Fig. 87).



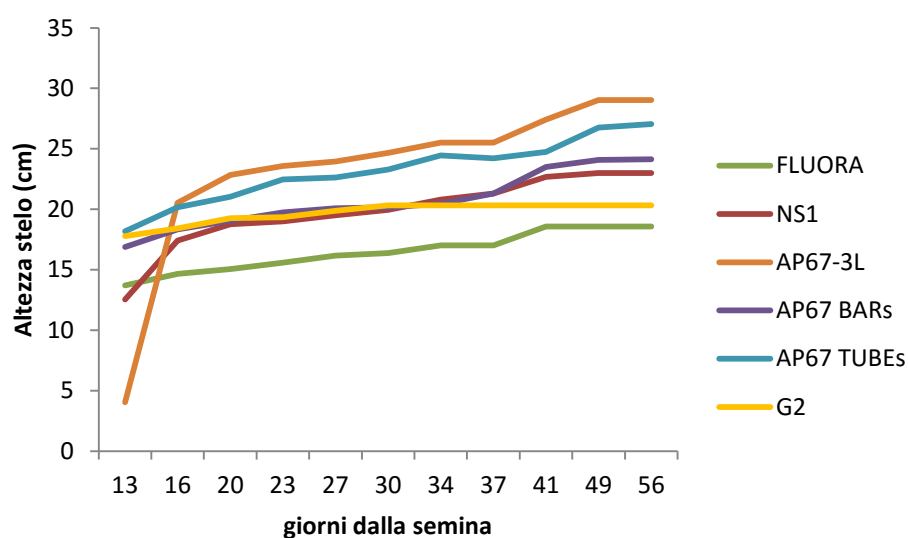
**Figura 88. Numero assoluto di stomi di *F. excelsior* al termine del ciclo indoor**



**Figura 89. Densità stomatica relativa di *F. excelsior* al termine del ciclo indoor**

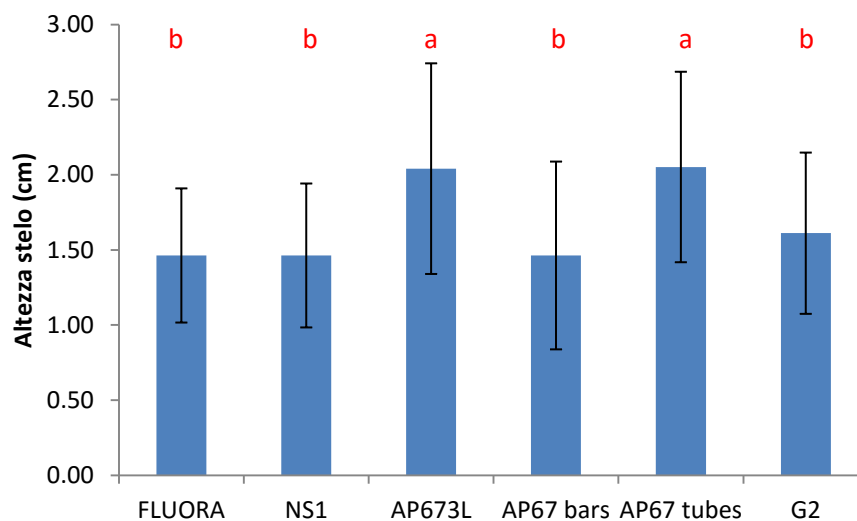
Non sono state inoltre evidenziate differenze significative tra le varie fonti luminose né in termini di numero assoluto di stomi per foglia (Fig. 88) né di densità stomatica relativa (Fig. 89).

○ *Platanus orientalis* L.



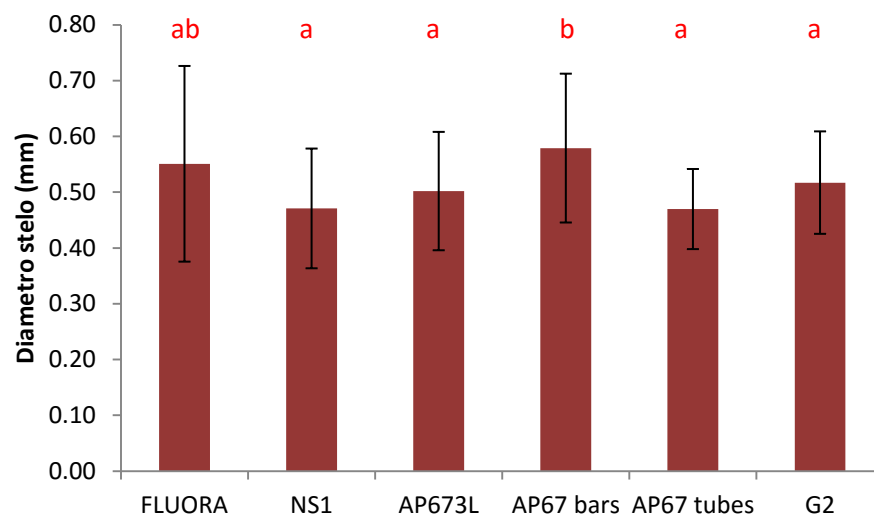
**Figura 90. Curve di crescita di *P. orientalis* (indoor)**

Dalle curve di crescita è risultato evidente come il *P. orientalis* L. mostri un migliore accrescimento sotto lampade LED piuttosto che sotto fluorescenza (Fig. 90).



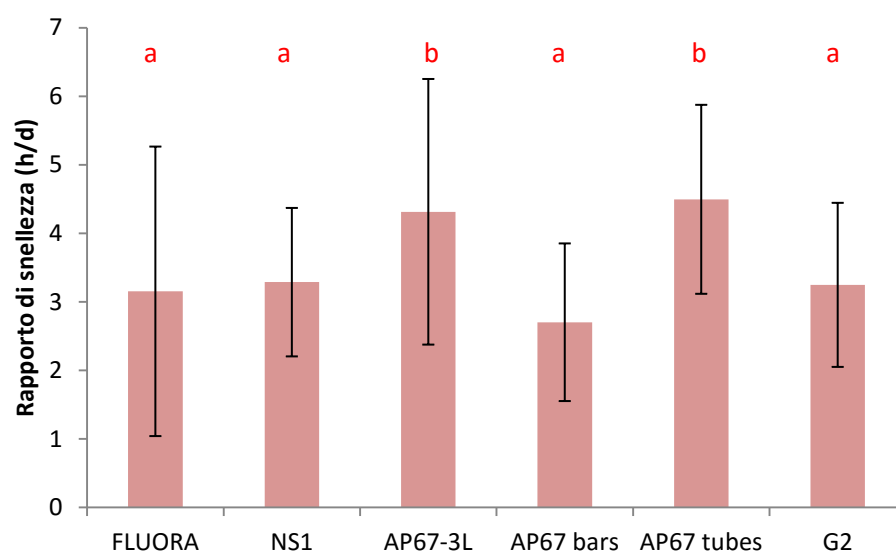
**Figura 91. Altezza dello stelo di *P. orientalis* al termine del ciclo indoor**

Le analisi morfometriche hanno confermato un minore accrescimento dei semenzali sotto FLUORA, così come sotto NS1, AP67 bars e G2. I valori maggiori sono stati rilevati sotto AP673L e AP67 tubes (Fig. 91).



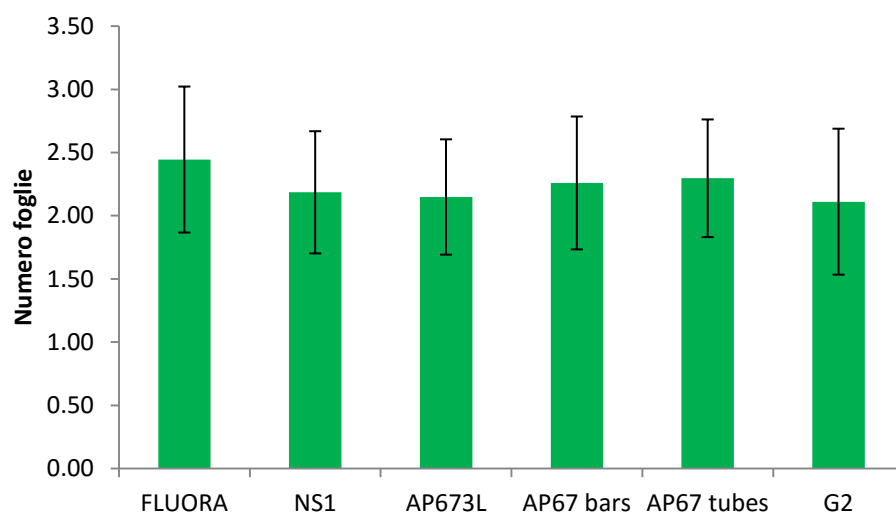
**Figura 92. Diametro dello stelo di *P. orientalis* al termine del ciclo indoor**

Le lampade a fluorescenza hanno mostrato, d'altra parte, di potenziare l'ispessimento dello stelo, raggiungendo risultati relativamente superiori rispetto alle lampade LED, con l'eccezione di AP67 bars (Fig. 92).



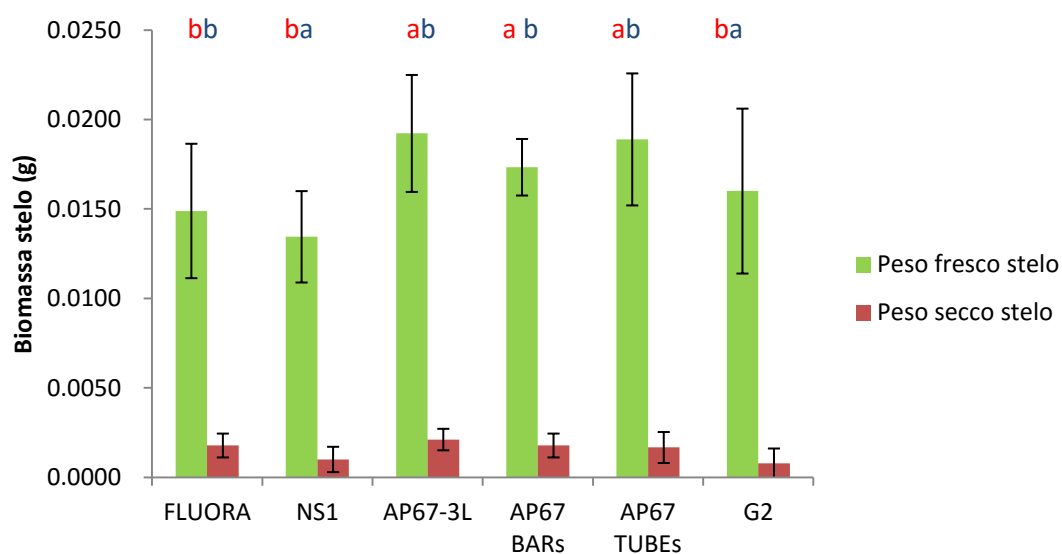
**Figura 93. Rapporto di snellezza di *P. orientalis* al termine del ciclo indoor**

In termini di rapporto di snellezza, lo spettro FLUORA ha condotto allo sviluppo di semenzali più bassi e robusti come nel caso di NS1, AP67 bars e G2. Al contrario, AP67-3L e AP67 tubes hanno favorito lo sviluppo di semenzali più esili e slanciati (Fig. 93).



**Figura 94. Numero di foglie di *P. orientalis* al termine del ciclo indoor**

In termini di numero di foglie non sono state evidenziate differenze significative tra le varie fonti luminose (Fig. 94).

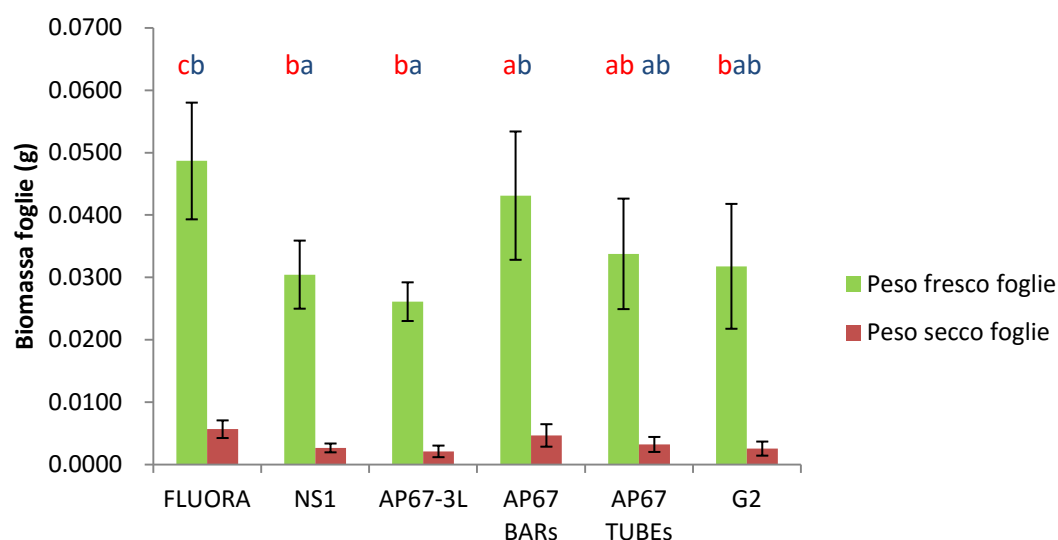


**Figura 95. Biomassa dello stelo di *P. orientalis* al termine del ciclo indoor**

Le prove distruttive hanno evidenziato un effetto promovente sull'incremento di biomassa dello stelo sotto lampade AP673L, AP67 bars e AP67 tubes. Al contrario FLUORA, NS1 e G2 hanno mostrato valori significativamente più bassi.

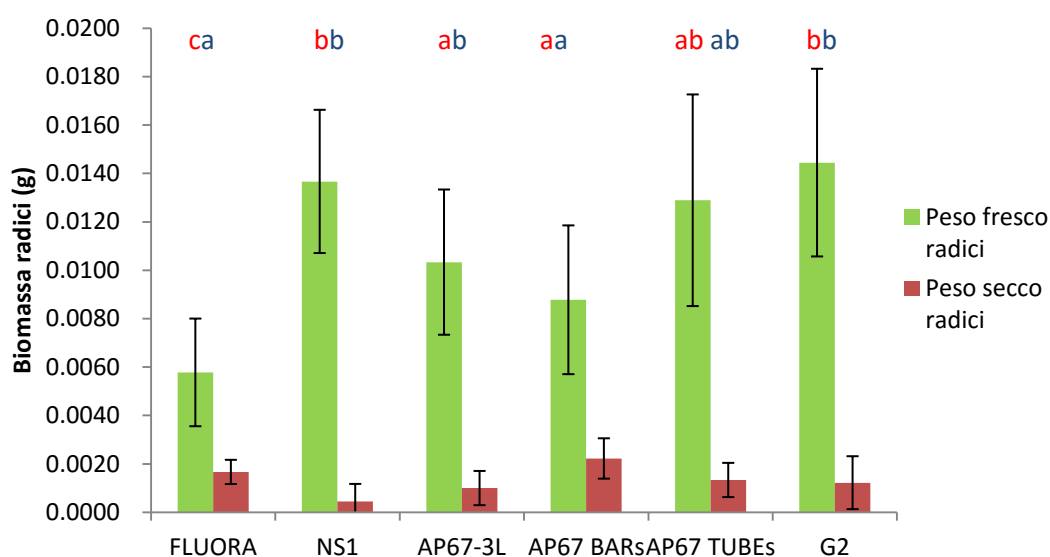
Una volta sottoposti i tessuti a essiccamento, al contrario, FLUORA ha mostrato valori compatibili con AP673L, AP67 bars e AP67 tubes. Ancora una volta è

ipotizzabile che il minor peso fresco dello stelo rilevato sotto FLUORA sia influenzato dalla maggiore evaporazione dei tessuti sotto tale fonte (Fig. 95).



**Figura 96. Biomassa delle foglie di *P. orientalis* al termine del ciclo indoor**

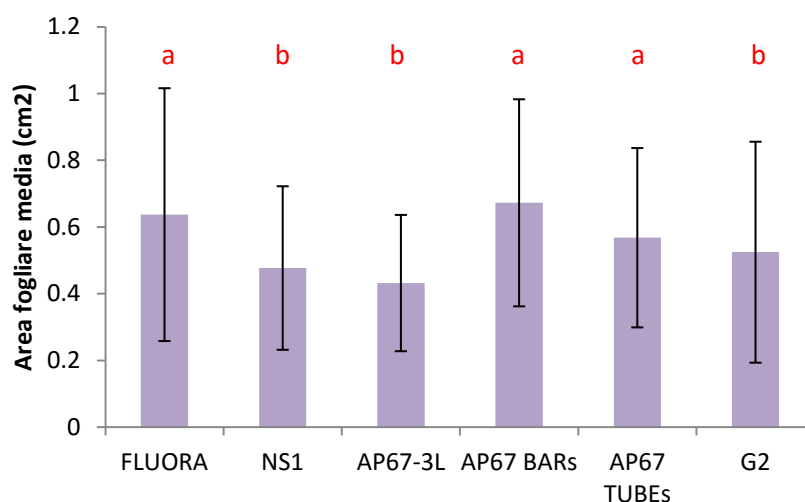
In termini di biomassa delle foglie FLUORA e AP67 bars hanno mostrato i maggiori valori sia in termini di peso fresco sia secco (Fig. 96).



**Figura 97. Biomassa delle radici di *P. orientalis* al termine del ciclo indoor**

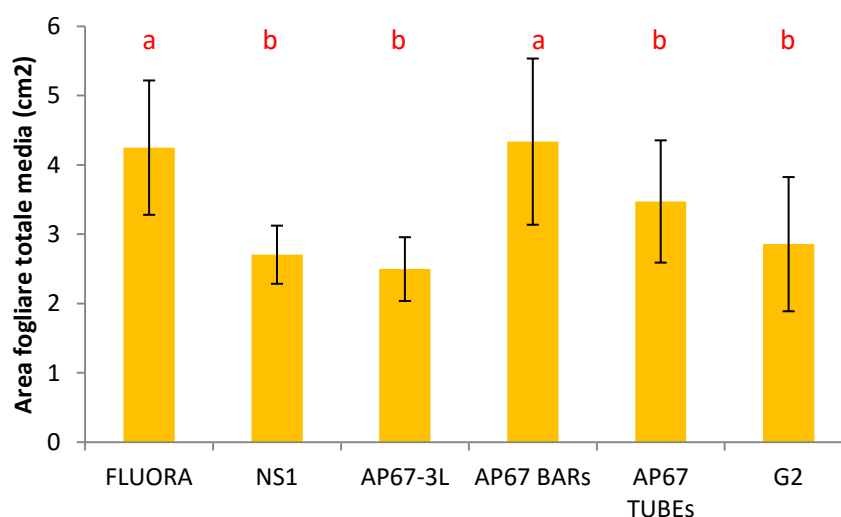
In termini di biomassa radicale, FLUORA ha mostrato i valori minori, in termini di peso fresco, al contrario di NS1, AP67 tubes e G2 che hanno mostrato i valori

più elevati. In termini di peso secco FLUORA ha nuovamente mostrato un comportamento anomalo, con alti valori di biomassa (Fig. 97).

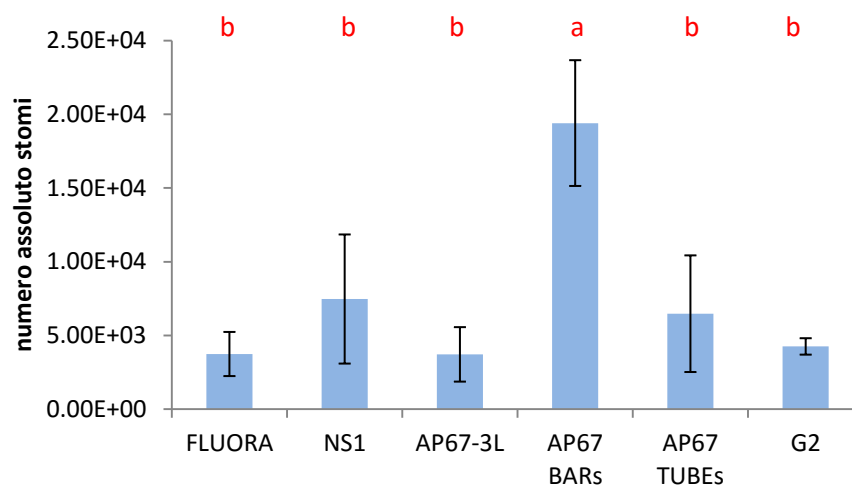


**Figura 98. Area fogliare media di *P. orientalis* al termine del ciclo indoor**

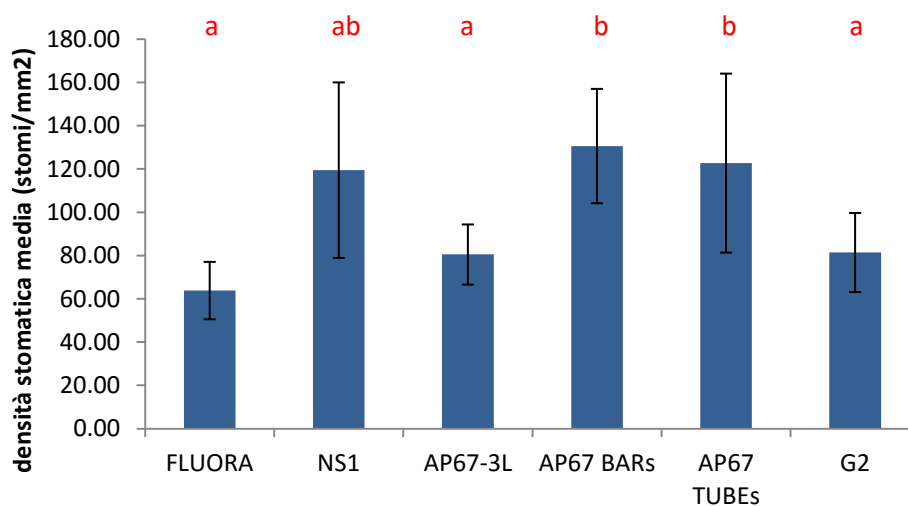
Le analisi microscopiche volte a valutare l'area media fogliare, hanno mostrato la presenza di foglie di maggiori dimensioni sotto FLUORA, AP67bars e AP67 tubes (Fig. 98). Tale superiorità si mantiene anche nella valutazione dell'area totale fogliare per singola pianta. Tali spettri dunque conducono a semenzali dotati di un alto numero di foglie di dimensioni superiori rispetto alle altre fonti luminose (Fig. 99).



**Figura 99. Area fogliare totale media di *P. orientalis* al termine del ciclo indoor**



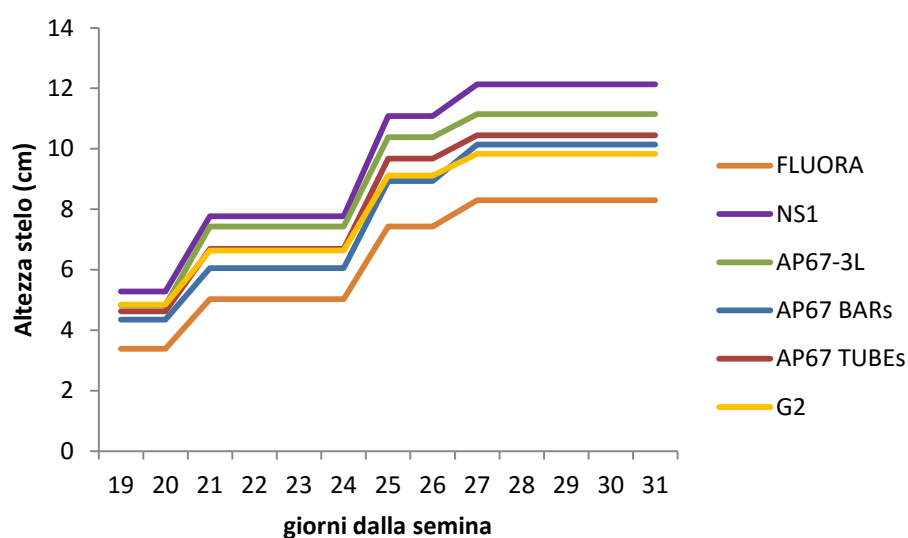
**Figura 100. Numero assoluto degli stomi di *P. orientalis* al termine del ciclo indoor**



**Figura 101. Densità stomatica media di *P. orientalis* al termine del ciclo indoor**

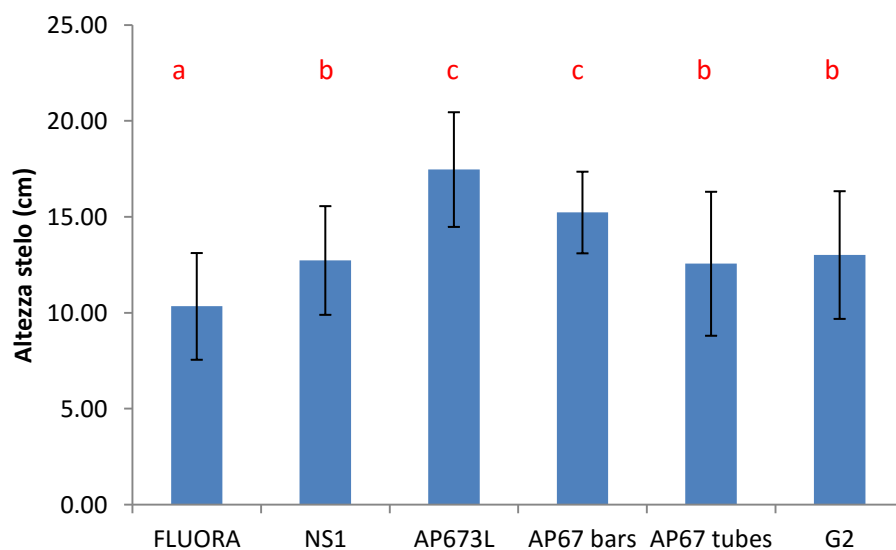
L'analisi stomatica ha mostrato come AP67 bars sviluppi un numero assoluto di stomi significativamente superiore rispetto a tutti gli altri spettri luminosi (Fig. 100). In termini di densità stomatica relativa, accanto ad AP67 bars, anche AP67 tubes e NS1 hanno mostrato alti valori, non differenti in modo significativo dai valori rilevati sotto AP67 bars (Fig. 101)

○ *Quercus suber* L.



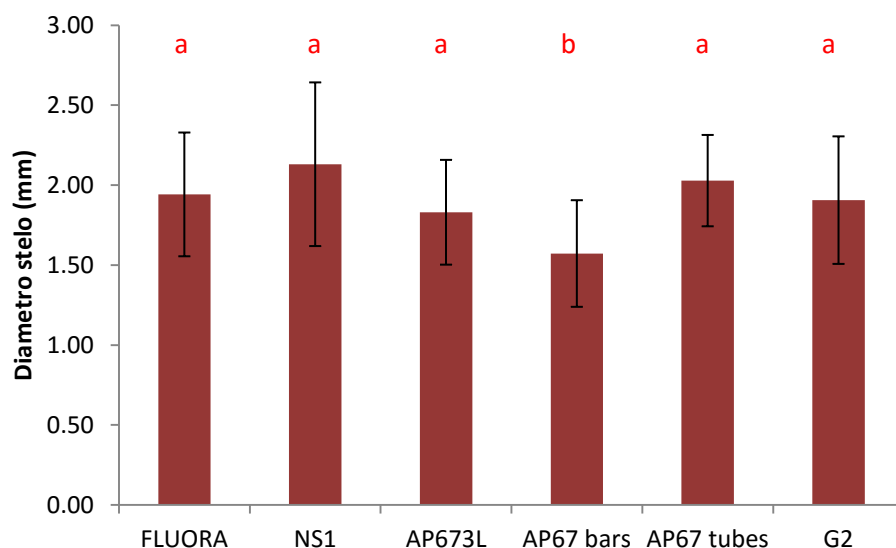
**Figura 102. Curve di crescita di *Q. suber* (indoor)**

Anche i semenzali di *Q. suber* hanno mostrato un maggiore accrescimento sotto lampade LED piuttosto che sotto lampade a fluorescenza (Fig. 102).



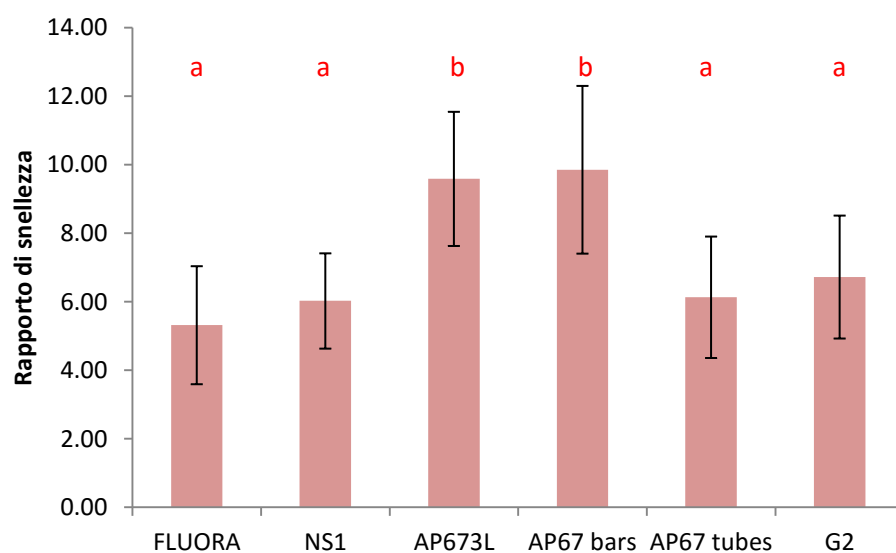
**Figura 103. Altezza dello stelo di *Q. suber* al termine del ciclo indoor**

Dalle analisi morfometriche è risultato come lo spettro AP63L sia il migliore nel promuovere l'accrescimento in altezza dei semenzali. Di contro, FLUORA ha mostrato i risultati minori (Fig. 103).



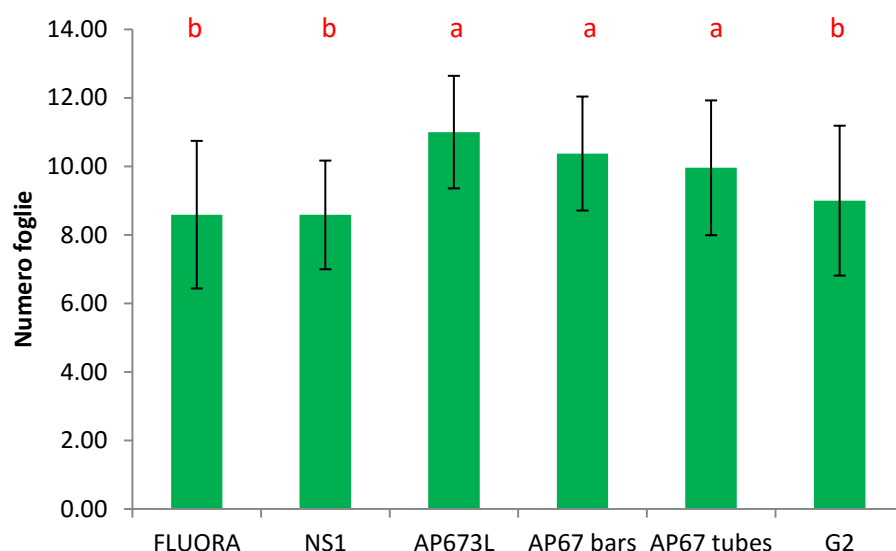
**Figura 104. Diametro dello stelo di *Q. suber* al termine del ciclo indoor**

In termini di diametro al colletto, i vari spettri non hanno mostrato significative differenze fatta eccezione per AP67 bars che ha mostrato valori decisamente più bassi della media (Fig. 104).



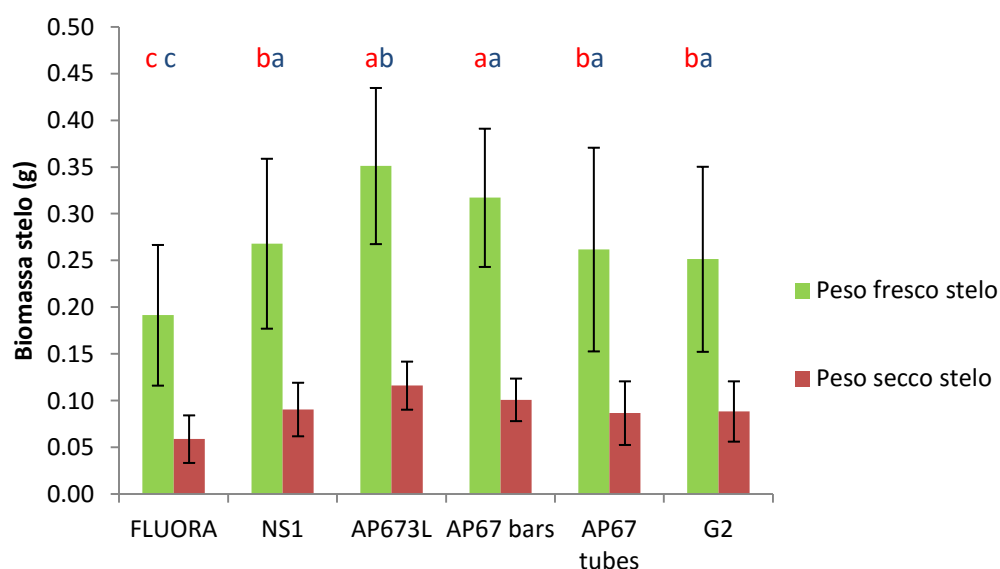
**Figura 105. Rapporto di snellezza di *Q. suber* al termine del ciclo indoor**

In termini di rapporto di snellezza, lo spettro FLUORA ha portato allo sviluppo di semenzali bassi e robusti così come NS1, AP67 tubes e G2. Gli spettri AP67 bars e AP67-3L si sono invece distinti in maniera significativa, conducendo allo sviluppo di semenzali più snelli (Fig. 105).



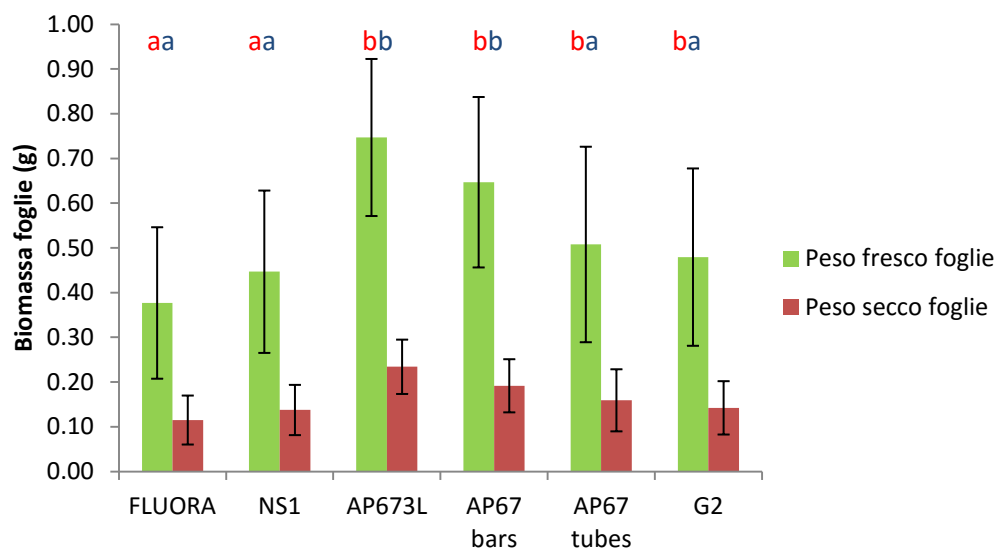
**Figura 106. Numero di foglie di *Q. suber* al termine del ciclo indoor**

Il numero di foglie è apparso positivamente influenzato dagli spettri AP673L, AP67 bars e AP67 tubes (Fig. 106).



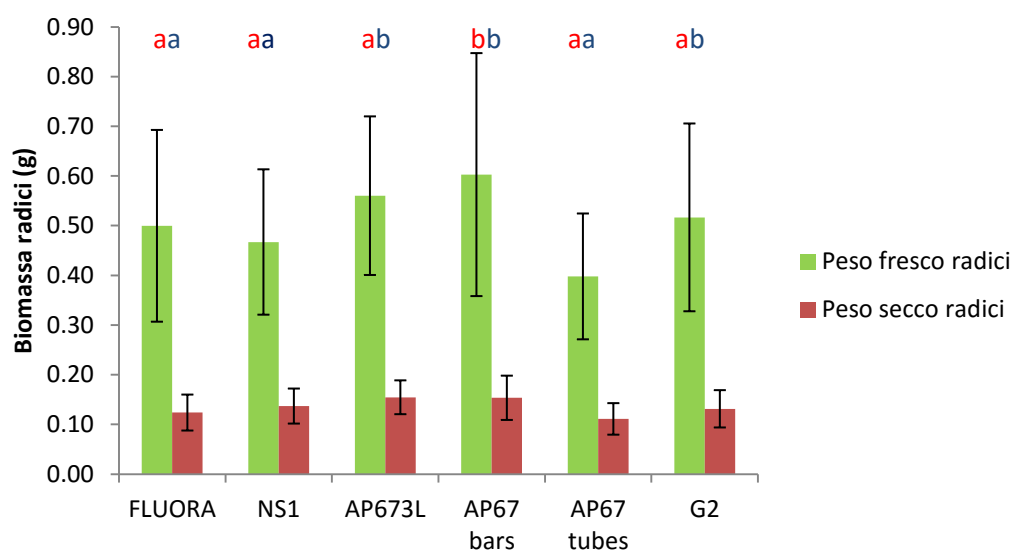
**Figura 107. Biomassa dello stelo di *Q. suber* al termine del ciclo indoor**

Le prove distruttive hanno mostrato significative differenze in termini sia di peso fresco sia di peso secco dello stelo tra fluorescenza e spettri LED. FLUORA ha difatti mostrato i valori più bassi, al contrario di AP67 3L che ha condotto ai risultati migliori (Fig. 107).



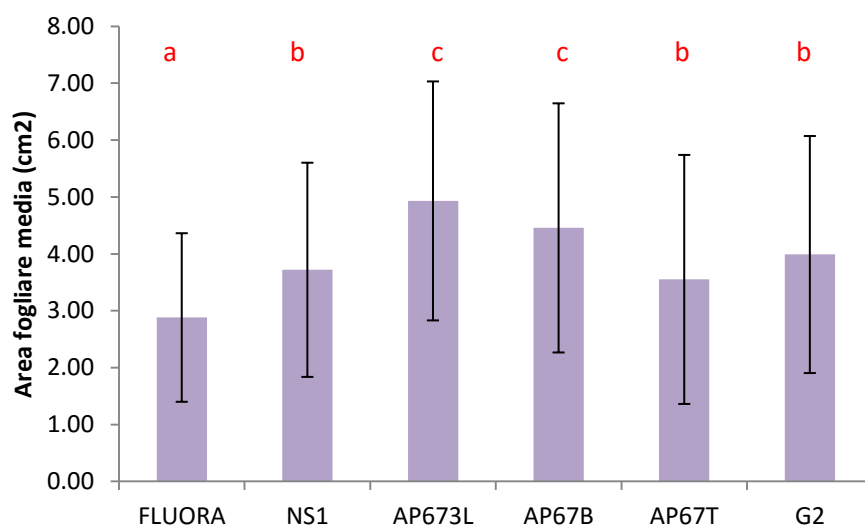
**Figura 108. Biomassa delle foglie di *Q. suber* al termine del ciclo indoor**

Il maggior peso fresco delle foglie è stato riscontrato sotto AP673L, AP67 bars e AP67 tubes, mentre il valore minimo è stato associato a FLUORA. Tale suddivisione è stata confermata con l'analisi del peso secco fogliare (Fig. 108).



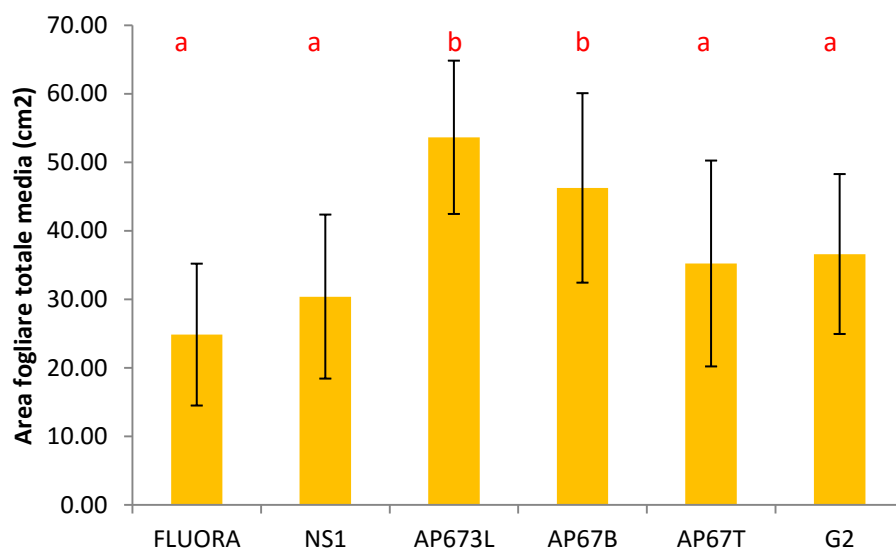
**Figura 109. Biomassa delle radici di *Q. suber* al termine del ciclo indoor**

In termini di peso fresco delle radici, AP67 bars ha mostrato i valori migliori, mentre AP67 tubes i più bassi. In termini di peso secco AP67 bars, AP673L, NS1 e G2 hanno mostrato valori simili tra loro e significativamente superiori a FLUORA e AP67 tubes (Fig. 109).



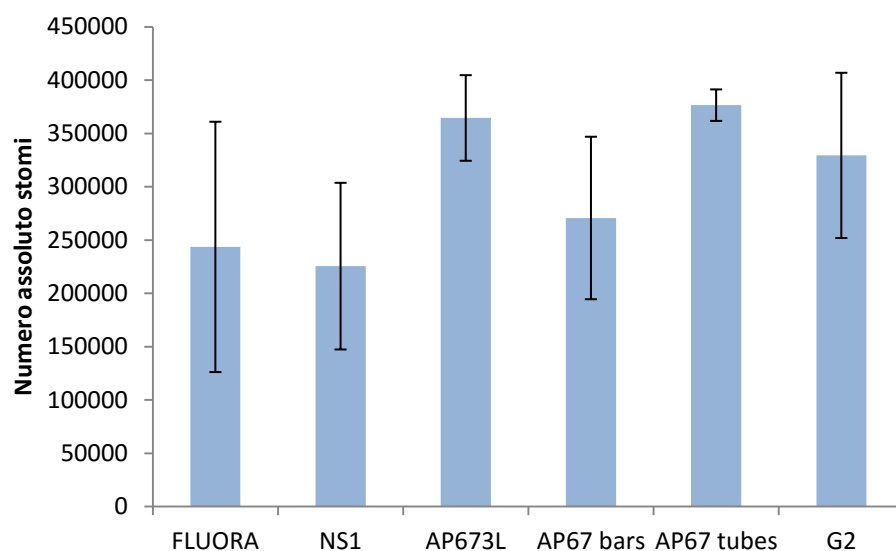
**Figura 110. Area fogliare media di *Q. suber* al termine del ciclo indoor**

AP673L e AP67 bars sono risultati essere spettri promoventi l'incremento dell'area fogliare. FLUORA ha invece mostrato i valori più bassi (Fig. 110).

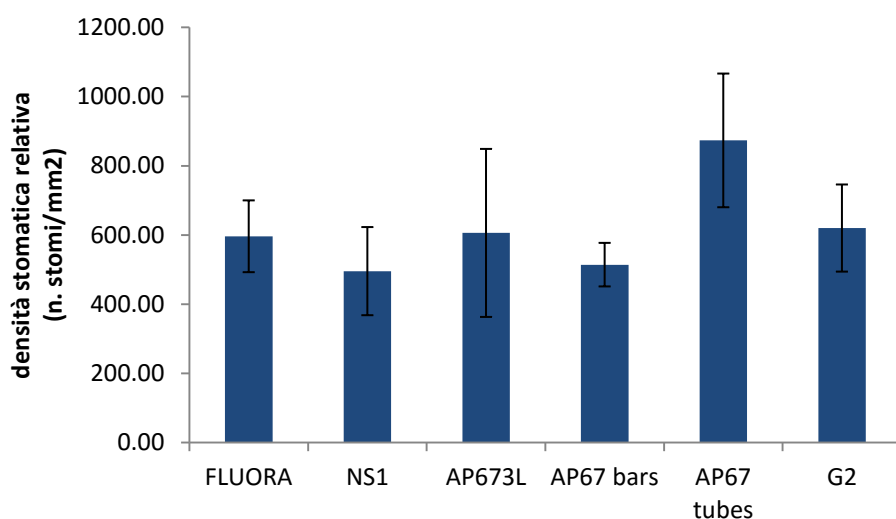


**Figura 111. Area fogliare totale media di *Q. suber* al termine del ciclo indoor**

In termini di superficie fogliare totale per singolo semenzale, AP673L e AP67 bars si sono confermati quali spettri migliori (Fig. 111).



**Figura 112. Numero assoluto degli stomi di *Q. suber* al termine del ciclo indoor**



**Figura 113. Densità stomatica relativa di *Q. suber* al termine del ciclo indoor**

L'analisi degli stomi ha mostrato come i valori maggiori, seppur non statisticamente significativi, siano stati raggiunti sotto AP67 TUBEs, sia in termini di numero assoluto (Fig. 112) che di densità relativa (Fig. 113).

### 3.1.4.4. Trasferimento in serra: analisi dei semenzali

- *Corylus avellana* L.

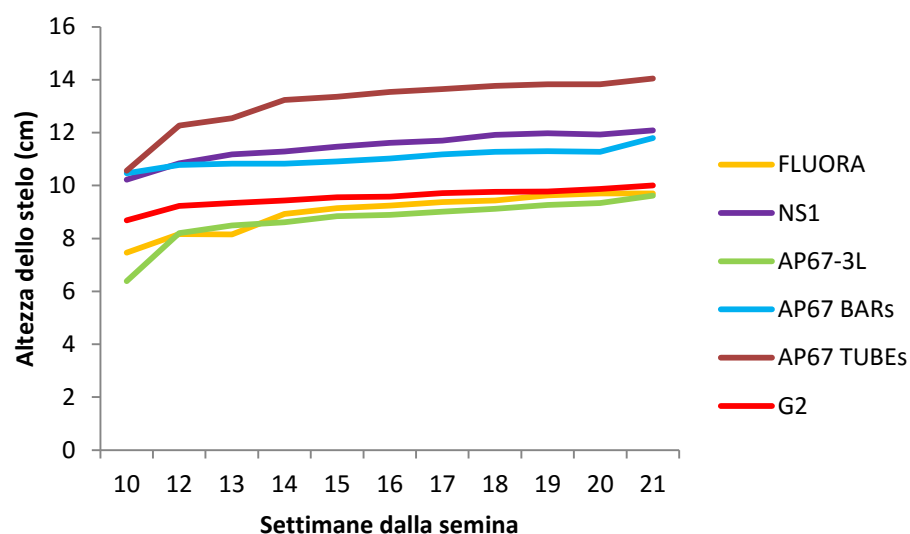


Figura 114. Curve di crescita *C. avellana* (serra)

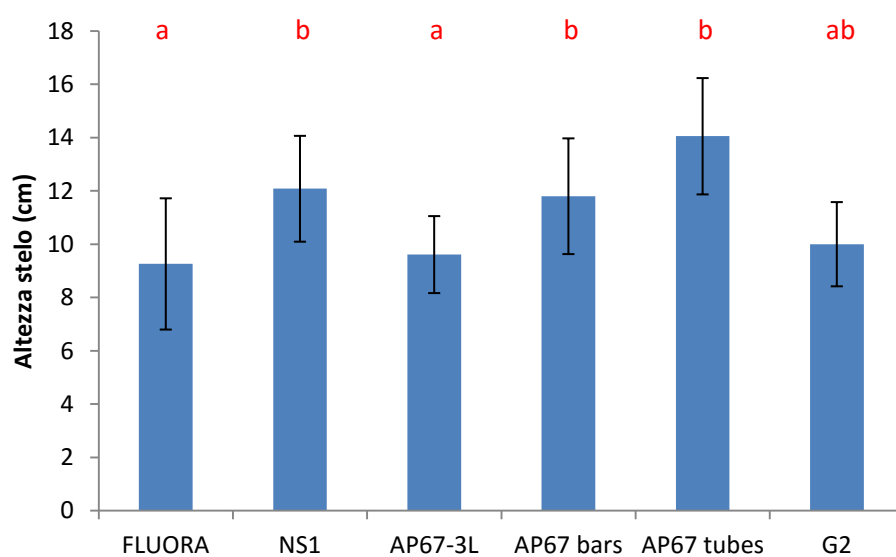


Figura 115. Altezza dello stelo di *C. avellana* al termine del ciclo in serra

Al termine di 30 giorni di crescita indoor, i semenzali di *Corylus avellana* sono stati trapiantati in vassoi di maggiori dimensioni e ne è stata seguita la curva di crescita per 22 settimane, al fine di valutare il mantenersi o meno degli effetti promoventi di alcune fonti luminose rispetto ad altre sull'accrescimento in altezza delle piantine (Fig. 114). Risulta

evidente dal grafico, come FLUORA e AP673L si riconfermano come spettri in grado di stimolare meno la crescita. Al contrario AP67T, che nella fase indoor era risultato tra i migliori LED ma secondo ad AP67 bars, in questa fase è stato in grado di favorire uno sviluppo tale da raggiungere un valore di altezza quasi doppio rispetto a quello ottenuto sotto lampade a fluorescenza (Fig. 115). Nel corso di tale periodo di acclimatamento, i semenzali sono andati incontro a perdita delle foglie, probabilmente legata al passaggio da un fotoperiodo lungo (12L 12D utilizzato indoor) ad un fotoperiodo più breve, presente in ambiente naturale. Il cambiamento delle ore di illuminazione ha, con grande probabilità, portato la specie ad un comportamento “autunnale”. Inizialmente, la perdita di foglie è stata interpretata come un effetto di stress legato al passaggio tra le due condizioni ambientali e si è ipotizzato che le piante non si sarebbero riprese da tale shock. Per tale motivo, non essendo le piante in una condizione di salute ottimale per effettuare confronti con altre specie, si è preferito non effettuarne le prove distruttive. In realtà, dopo aver lasciato per un ulteriore anno tali semenzali in serra, ci si è resi conto del riapparire delle foglie e della ripresa di normali cicli vegetativi. Per tal motivo le piante, ormai irrobustite a sufficienza da poter essere sottoposte ad impianto, sono state trasferite in campo aperto, in condizioni di ombreggiamento al 70%, data la suscettibilità del nocciolo alla luce diretta del sole.

○ *Fraxinus excelsior* L.

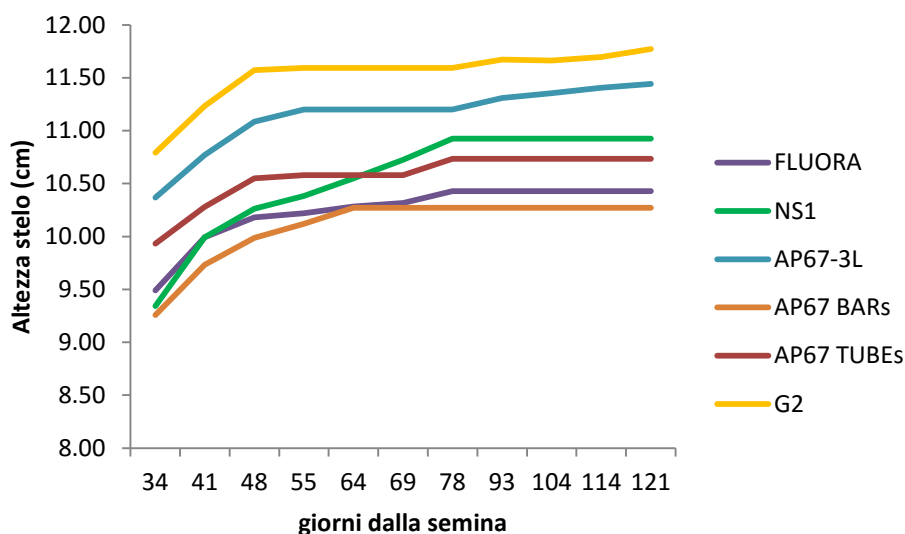
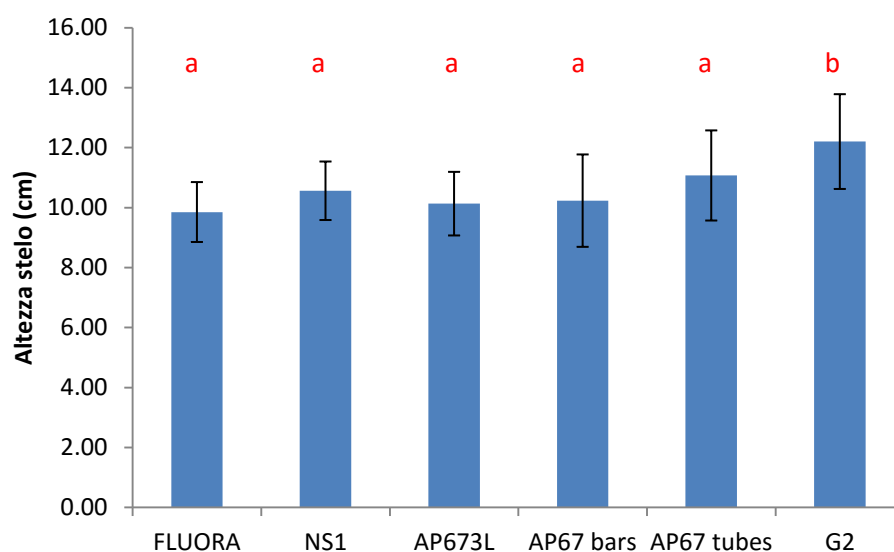


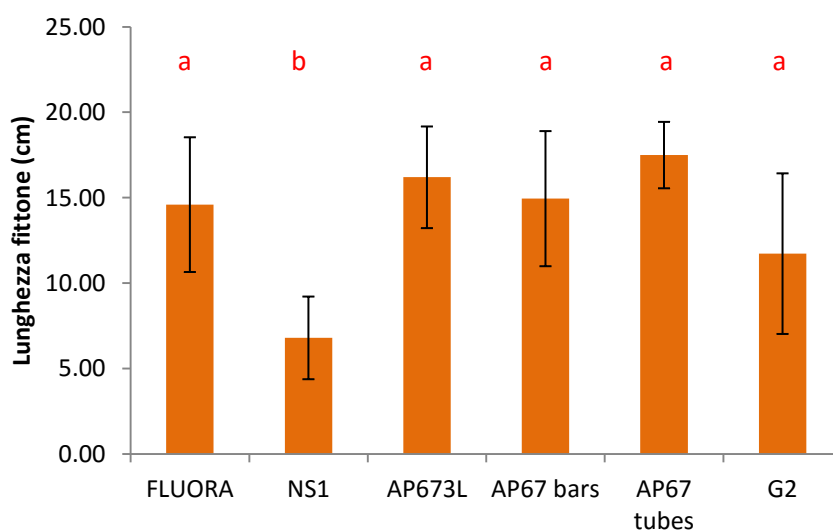
Figura 116. Curve di crescita di *F. excelsior* (serra)



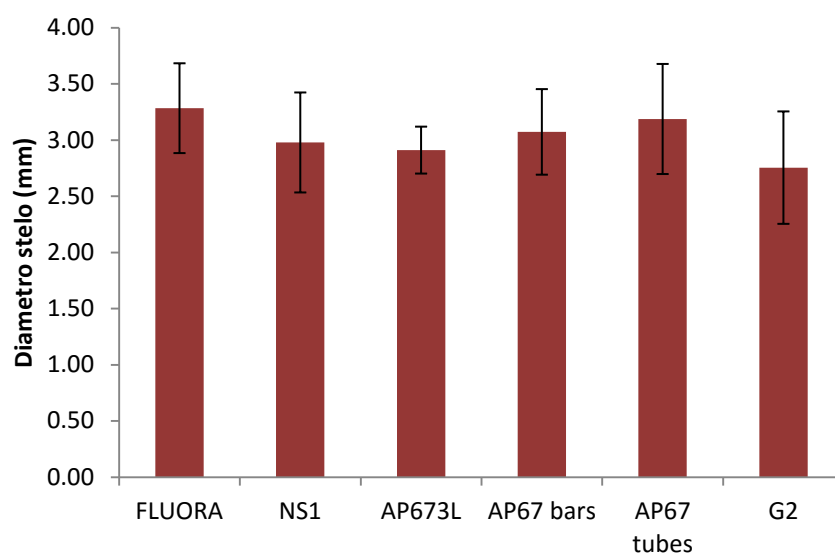
**Figura 117. Altezza dello stelo di *F. excelsior* al termine del ciclo in serra**

Analizzando le curve di crescita relative ai semenzali di *Fraxinus excelsior* cresciuti in serra, è evidente l'effetto di promozione sull'accrescimento epigeo indotto dallo spettro G2 rispetto agli altri spettri (Fig. 116-117).

Mentre i semenzali di *Corylus avellana*, a causa del numero limitato, sono stati trapiantati in campo aperto senza essere sottoposti a prove distruttive, il frassino è stato invece analizzato morfometricamente. È stata valutata la lunghezza del fittone, osservando un effetto positivo su tale parametro da parte di tutti gli spettri fatta eccezione per NS1 che ha mostrato un effetto inibitorio sull'accrescimento radicale (Fig. 118).

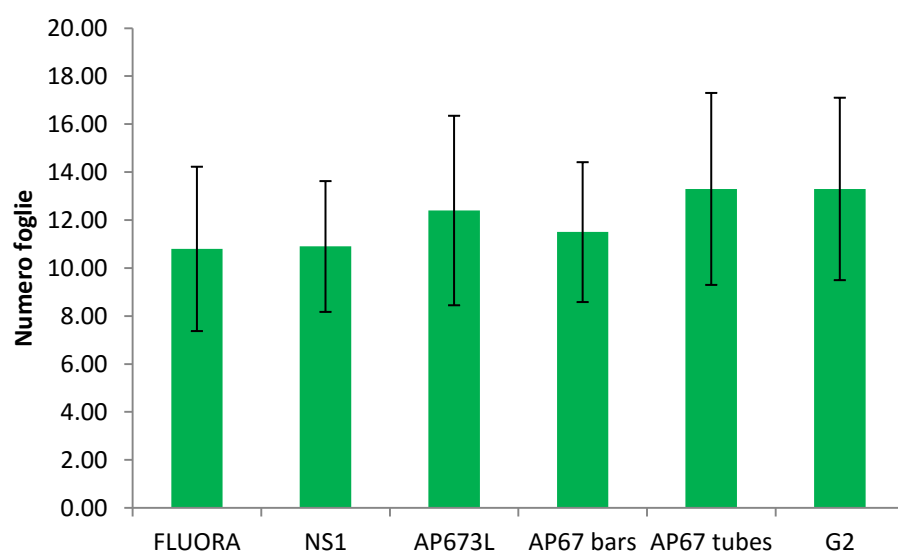


**Figura 118. Lunghezza del fittone di *F. excelsior* al termine del ciclo in serra**

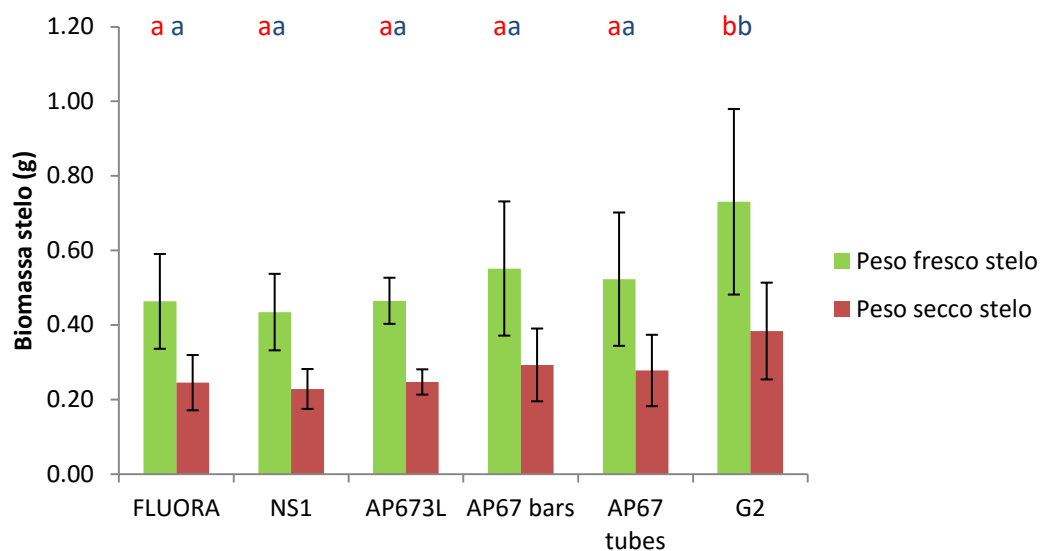


**Figura 119. Diametro dello stelo di *F. excelsior* al termine del ciclo in serra**

In termini di diametro al colletto (Fig. 119) così come di numero di foglie (Fig. 120), non sono state rilevate differenze significative tra i vari spettri.

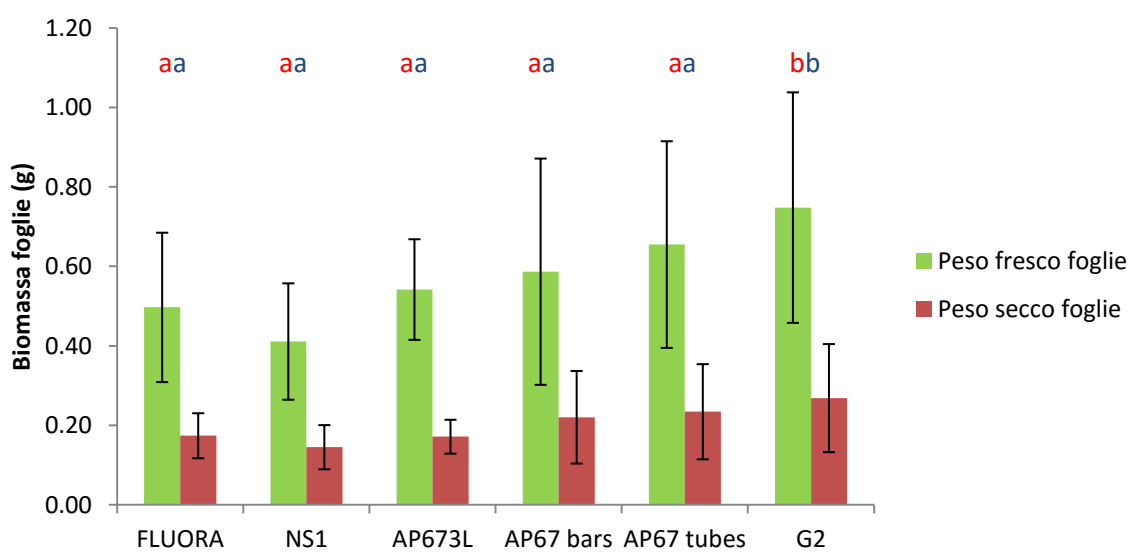


**Figura 120. Numero di foglie di *F. excelsior* al termine del ciclo in serra**

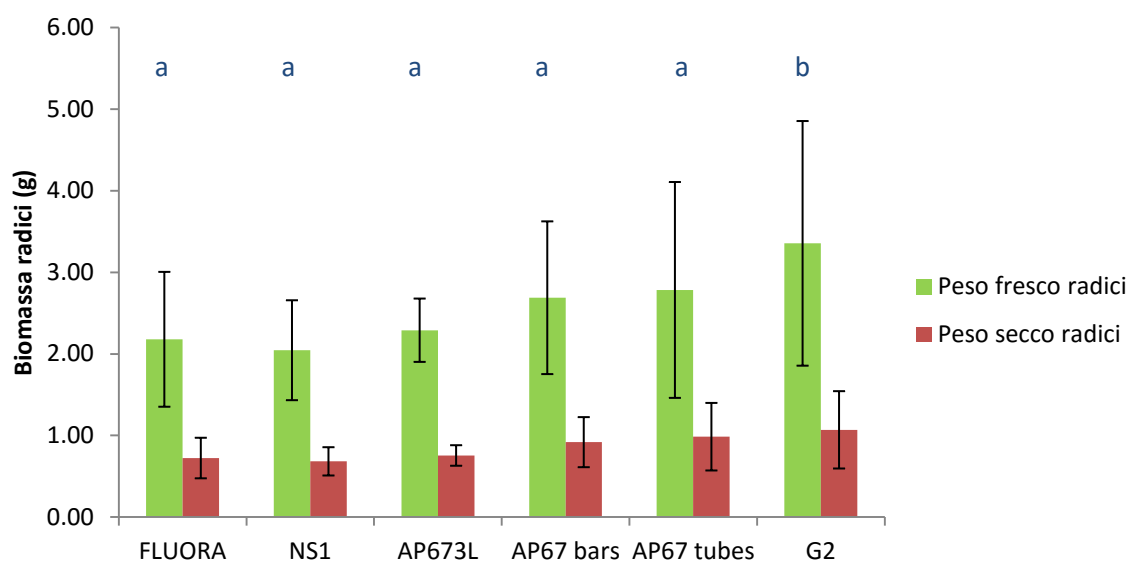


**Figura 121. Biomassa dello stelo di *F. excelsior* al termine del ciclo in serra**

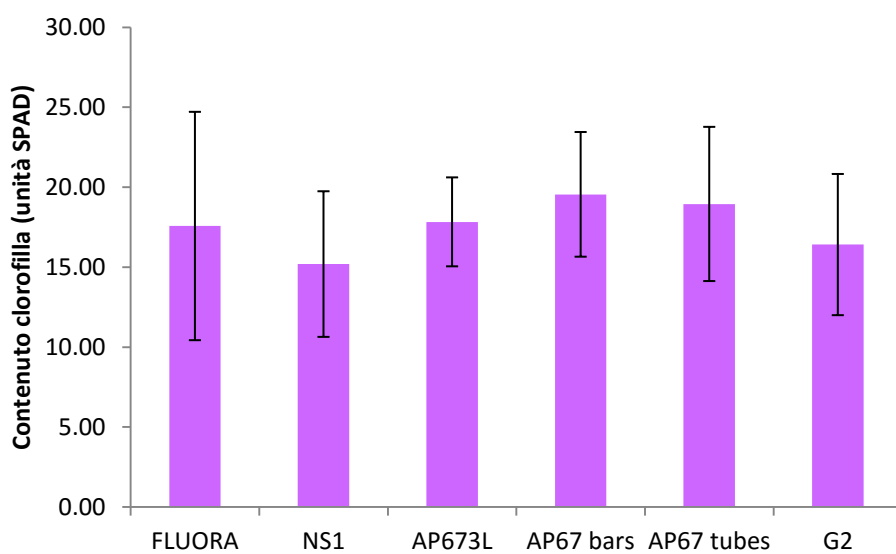
Le analisi distruttive hanno mostrato un effetto promovente sull'accrescimento della biomassa epigea (Fig. 121-122) ed ipogea (Fig. 123) da parte di G2.



**Figura 122. Biomassa delle foglie di *F. excelsior* al termine del ciclo in serra**

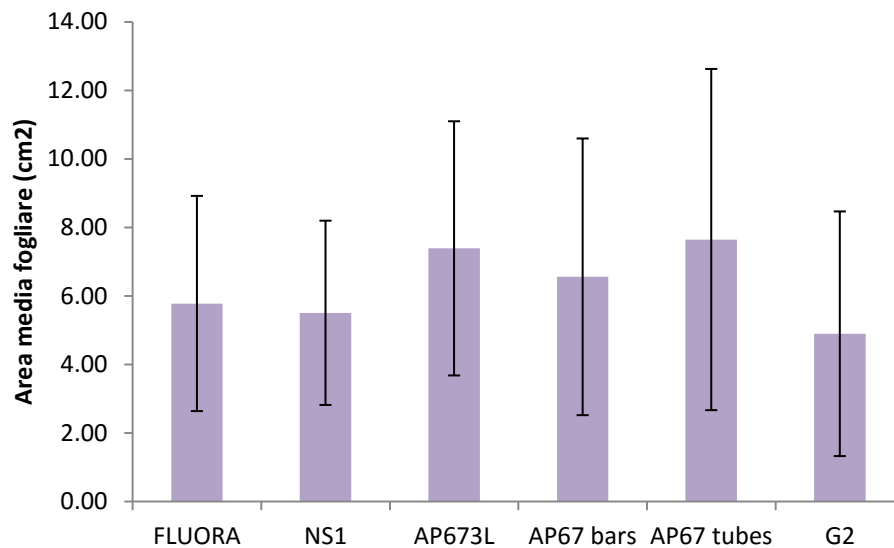


**Figura 123. Biomassa delle radici di *F. excelsior* al termine del ciclo in serra**

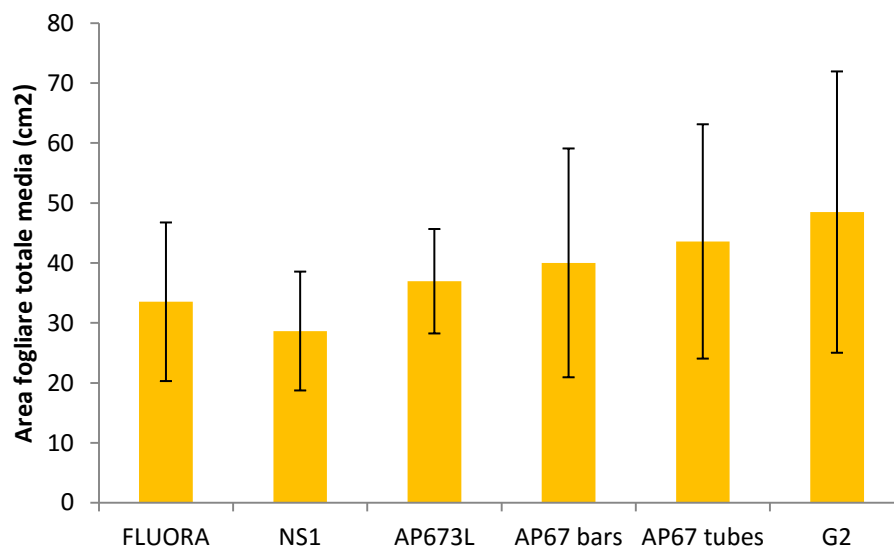


**Figura 124. Contenuto in clorofilla di *F. excelsior* al termine del ciclo in serra**

Il contenuto in clorofilla al termine del periodo in serra non ha mostrato differenze significative tra le varie fonti luminose, come conseguenza di un adattamento delle piante alla nuova fonte luminosa naturale (Fig. 124).



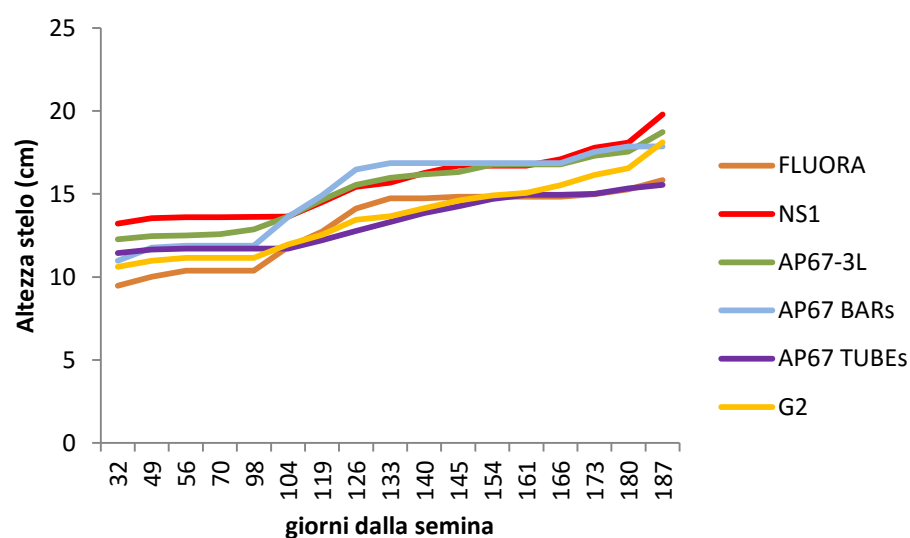
**Figura 125. Area media fogliare di *F. excelsior* al termine del ciclo in serra**



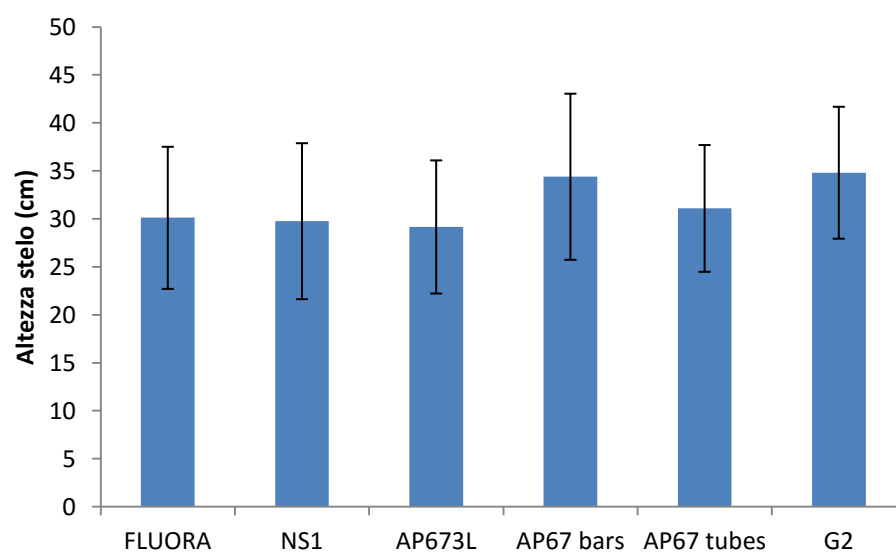
**Figura 126. Area fogliare totale media di *F. excelsior* al termine del ciclo in serra**

Anche l'analisi microscopica delle foglie ha confermato che, in ambiente seminaturale, la dimensione delle foglie non risulta più influenzata dagli spettri artificiali (Fig. 125-126).

○ *Quercus suber* L.



**Figura 127. Curve di crescita di *Q. suber* (serra)**

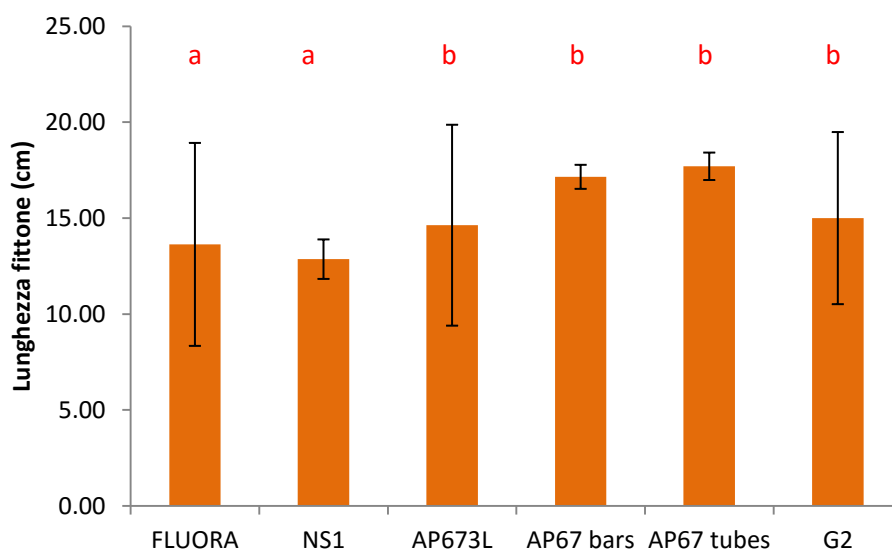


**Figura 128. Altezza dello stelo di *Q. suber* al termine del ciclo in serra**

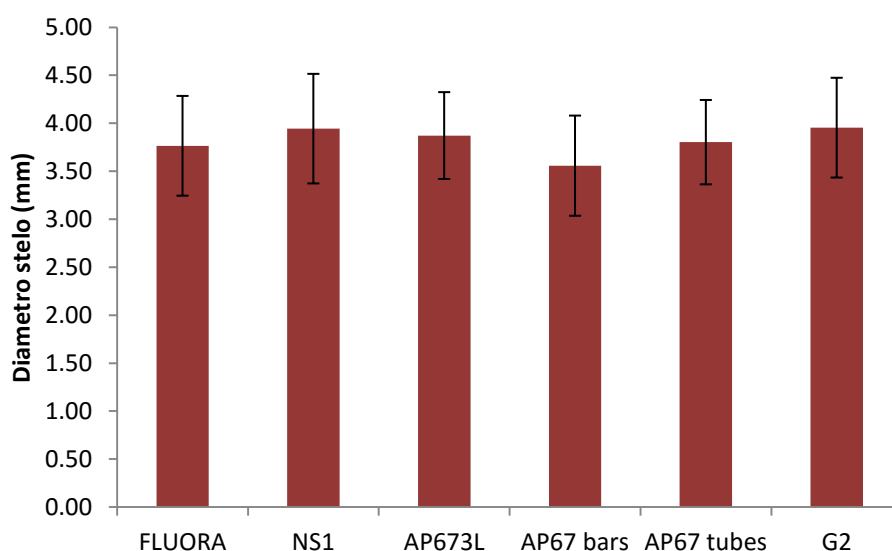
I semenzali di *Q. suber* trasferiti in serra hanno mostrato un rapido adattamento alle nuove condizioni luminose, perdendo l'influenza dei differenti spettri sull'accrescimento epigeo. Non sono state difatti rilevate significative differenze tra le varie lampade in termini di altezza dello stelo (Fig. 127-128), così come per il diametro al colletto (Fig. 130) ed il numero delle foglie (Fig. 131). Anche la concentrazione di clorofilla non ha mostrato differenze legate agli spettri (Fig. 135).

Differenze significative sono invece state rilevate a livello ipogeo, dove la lampada NS1 ha mostrato, come già osservato per *F. excelsior*, un effetto inibitorio sull'allungamento del fittone (Fig. 129).

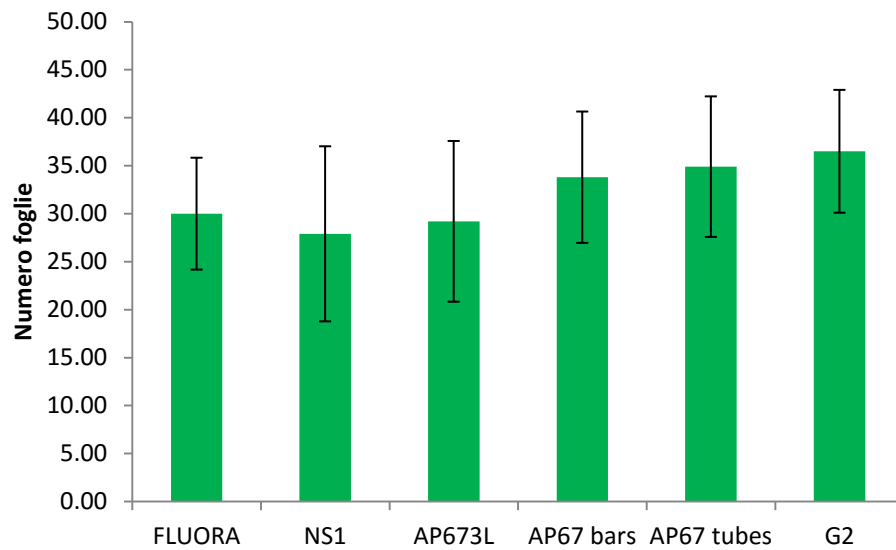
Le prove distruttive non hanno mostrato differenze significative né in termini di biomassa epigea né ipogea tra i vari spettri (Fig. 132-133-134).



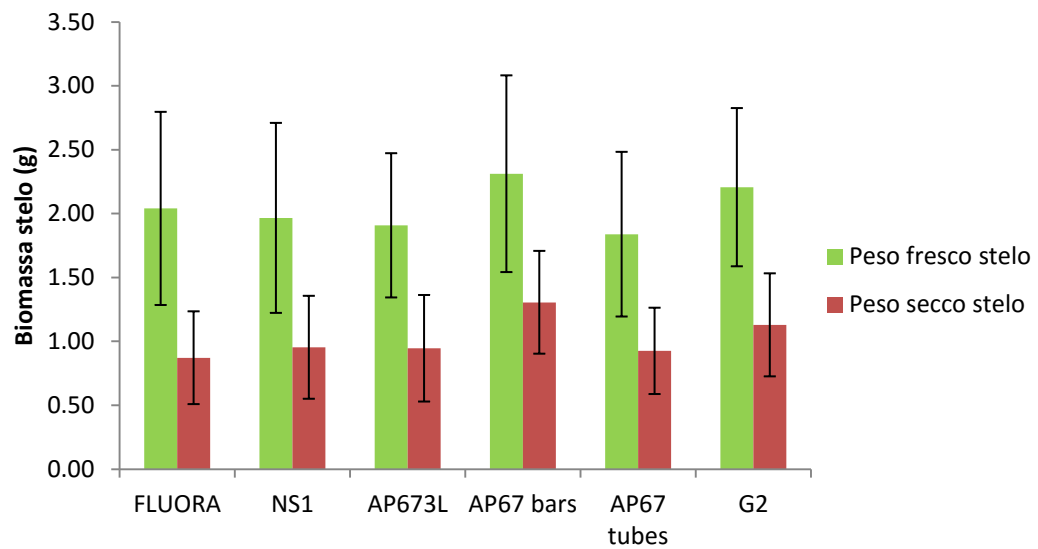
**Figura 129. Lunghezza del fittone di *Q. suber* al termine del ciclo in serra**



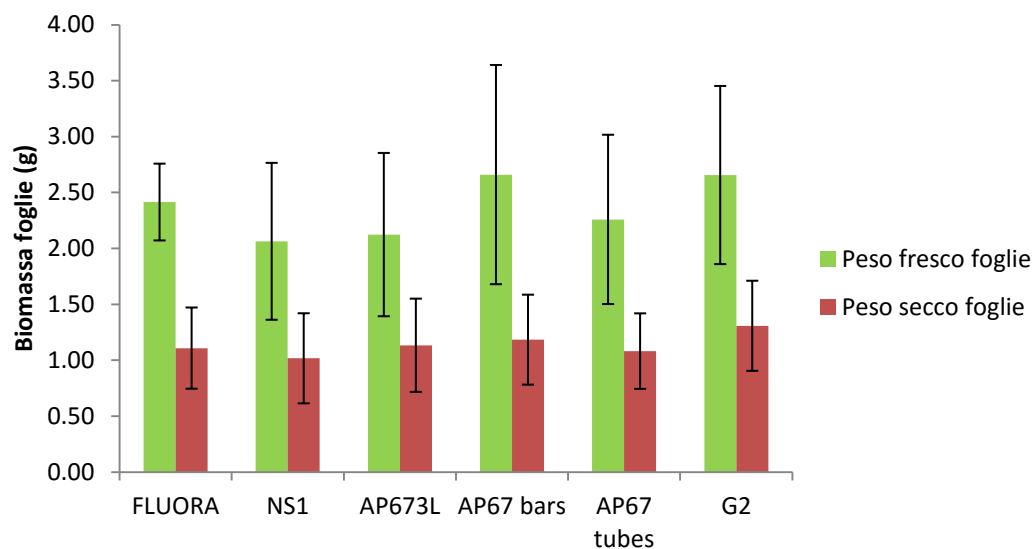
**Figura 130. Diametro dello stelo di *Q. suber* al termine del ciclo in serra**



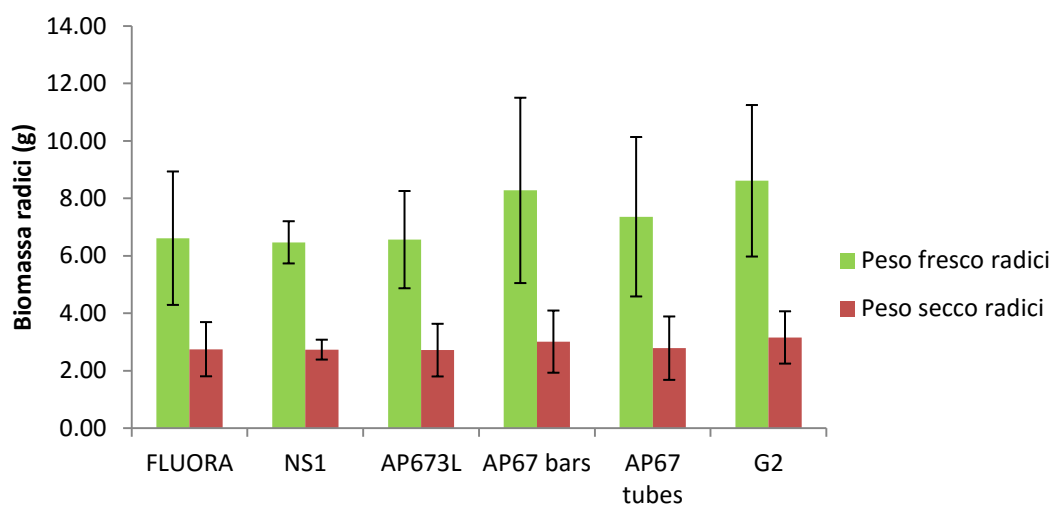
**Figura 131. Numero di foglie di *Q. suber* al termine del ciclo in serra**



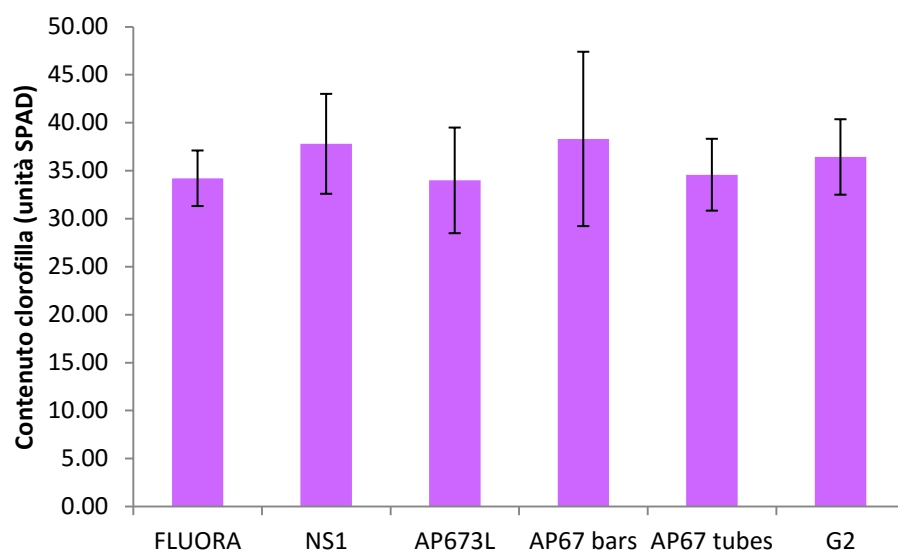
**Figura 132. Biomassa dello stelo di *Q. suber* al termine del ciclo in serra**



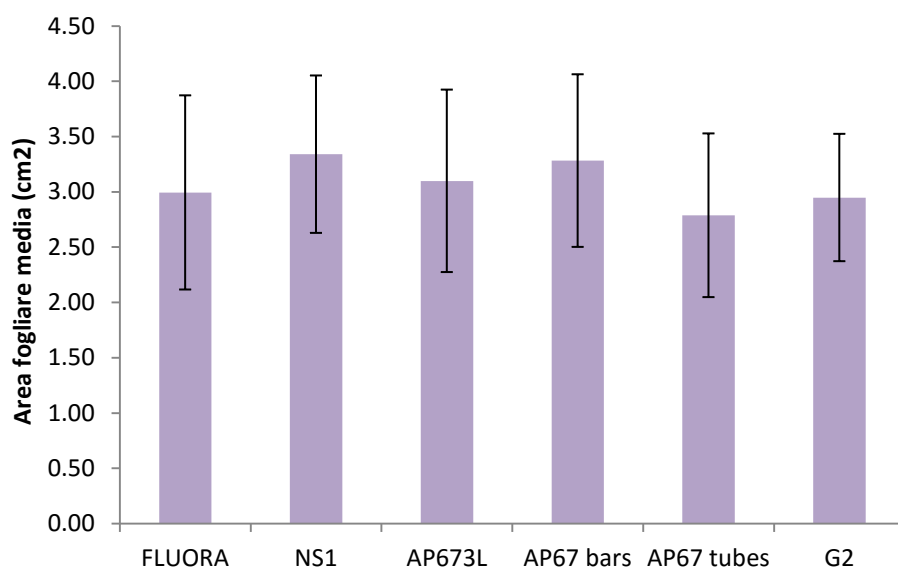
**Figura 133. Biomassa delle foglie di *Q. suber* al termine del ciclo in serra**



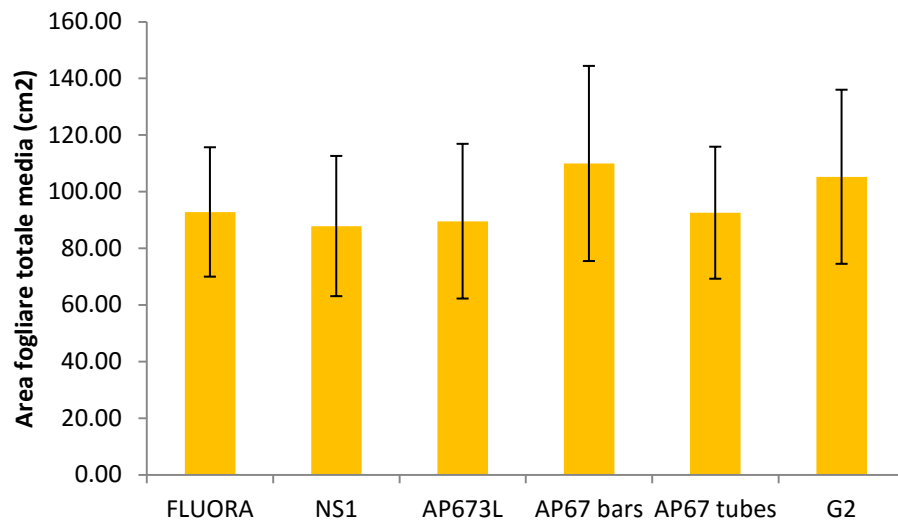
**Figura 134. Biomassa delle radici di *Q. suber* al termine del ciclo in serra**



**Figura 135. Contenuto in clorofilla di *Q. suber* al termine del ciclo in serra**



**Figura 136. Area fogliare media di *Q. suber* al termine del ciclo in serra**

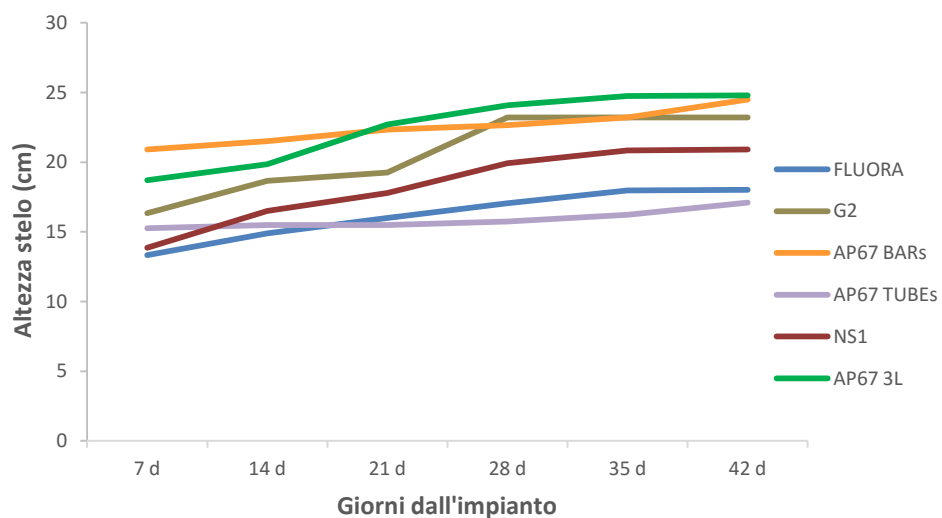


**Figura 137. Area fogliare totale media di *Q. suber* al termine del ciclo in serra**

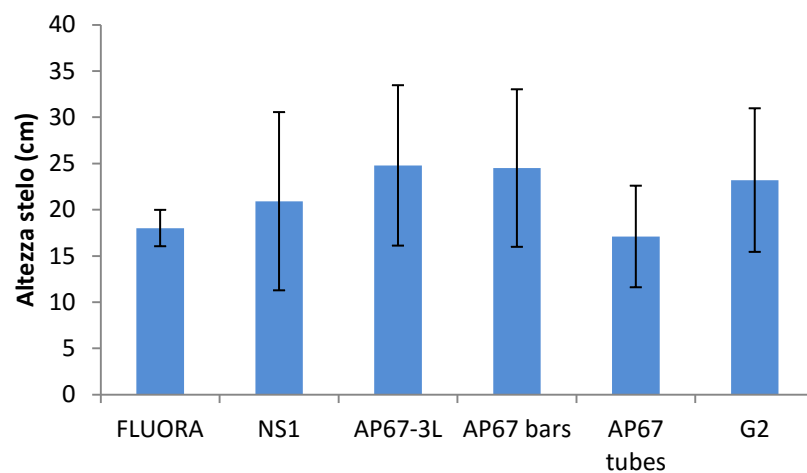
Anche nel caso di *Q. suber*, le analisi microscopiche effettuate sulle foglie dei semenzali non hanno evidenziato influenze persistenti da parte dei differenti spettri sull'area media e totale delle foglie (Fig. 136-137).

### 3.1.4.5. Impianto in campo aperto

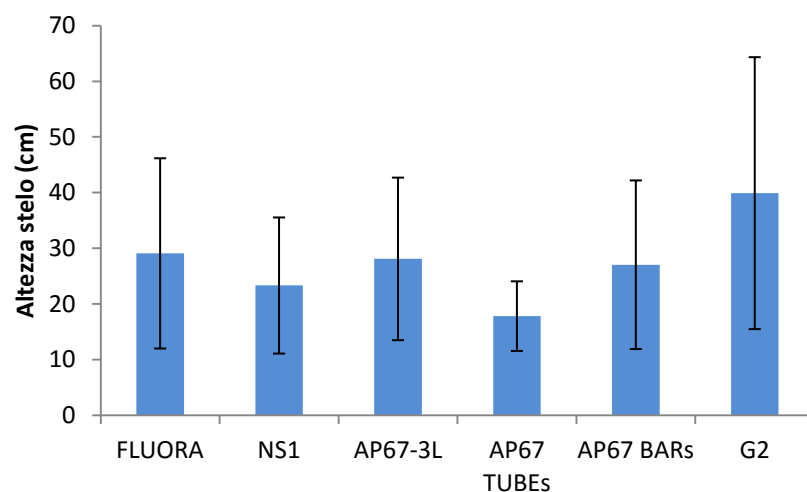
○ *Corylus avellana* L.



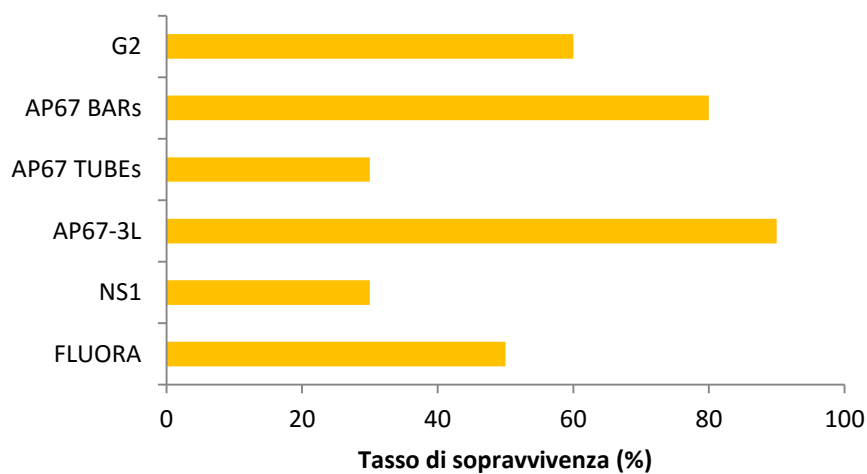
**Figura 138. Curve di crescita di *C. avellana* (campo aperto)**



**Figura 139. Altezza dello stelo di *C. avellana* a 42 giorni dall'impianto in campo aperto**



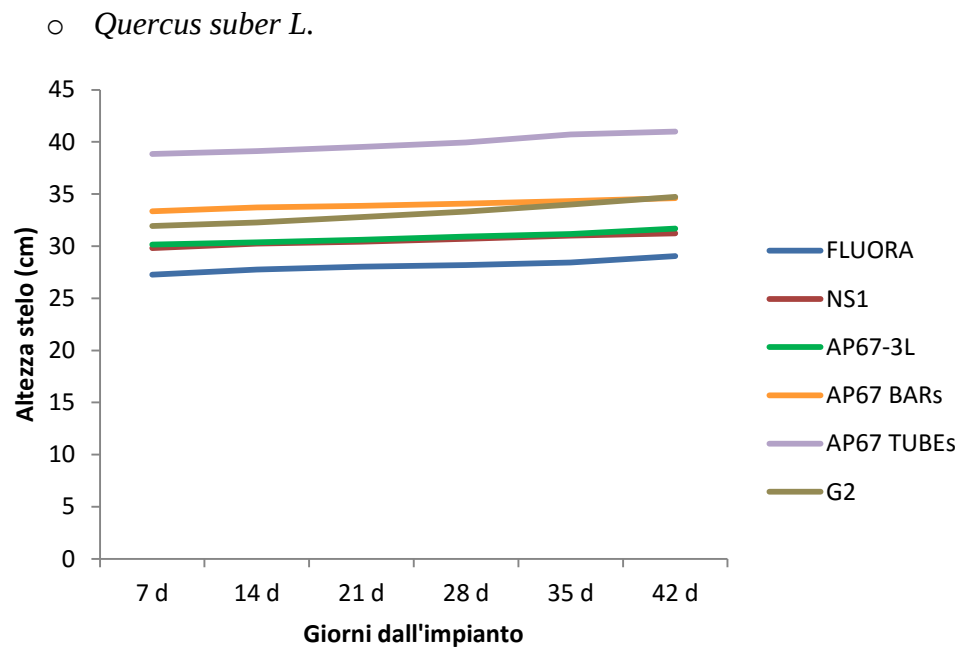
**Figura 140. Altezza dello stelo di *C. avellana* 1 anno dopo l'impianto**



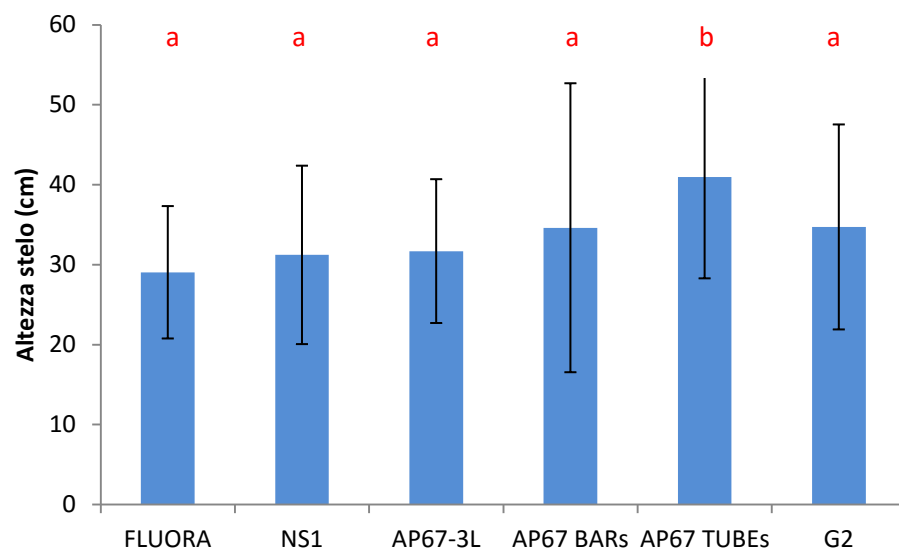
**Figura 141. Tasso di sopravvivenza dei semenzali di *C. avellana* 1 anno dopo l'impianto**



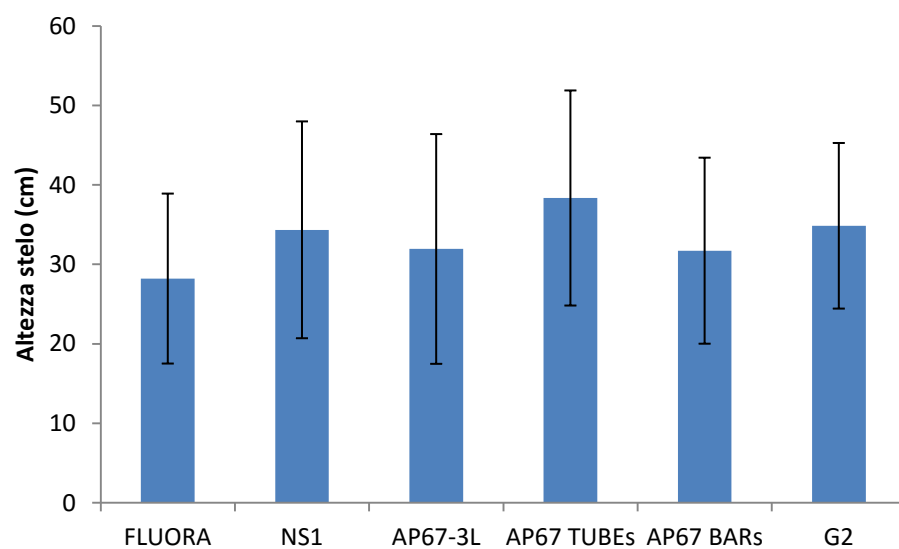
**Figura 142. Semenzali di *C. avellana* 1 anno dopo l'impianto**



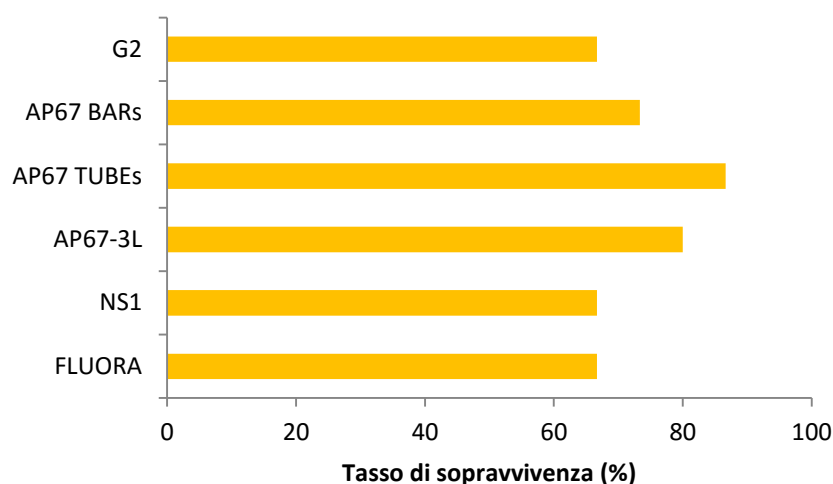
**Figura 143. Curve di crescita di *Q. suber* (campo aperto)**



**Figura 144. Altezza dello stelo di *Q. suber* a 42 giorni dall'impianto in campo aperto**



**Figura 145. Altezza dello stelo di *Q. suber* 1 anno dopo l'impianto**



**Figura 146. Tasso di sopravvivenza dei semenzali di *Q. suber* 1 anno dopo l'impianto**



**Figura 147. Semenzali di *Q. suber* 1 anno dopo l'impianto**

Dal momento che gli impianti sono stati effettuati nel mese di giugno 2015, ovvero ad estate iniziata, i semenzali sottoposti allo stress da trapianto sommato allo stress termico del periodo, hanno mostrato un accrescimento molto lento e costante nel corso delle settimane (Fig. 138-143).

Dopo 42 giorni dall'impianto, i semenzali di nocciolo e di sughera hanno mostrato una sopravvivenza del 100%. In termini di accrescimento, è possibile osservare come i semenzali di nocciolo cresciuti sotto AP673L, AP67 bars e G2 abbiano mostrato i valori di altezza più elevati. Nonostante tali apparenti differenze, l'analisi statistica non ha evidenziato differenze significative tra i valori delle altezze raggiunte (Fig. 139). Nel caso dei semenzali di sughera, al contrario, lo spettro AP67 tubes ha comportato il

raggiungimento di un'altezza media significativamente superiore ai restanti spettri (Fig. 144).

Dopo un anno dall'impianto in campo aperto, sia i semenzali di nocciolo che di sughera non hanno mostrato differenze significative in termini di altezza, correlabili agli spettri utilizzati per la pre-coltivazione (Fig. 140-142-145-147).

In termini di tasso di sopravvivenza, AP673L e AP67 BARs hanno mostrato le percentuali più elevate ( $\geq 80\%$ ), mentre NS1 e AP67 TUBEs i valori più bassi ( $\sim 30\%$ ) (Fig. 141).

Nel caso della sughera, tutti gli spettri hanno mostrato tassi superiori al 60% con il valore più alto ( $> 80\%$ ) associato allo spettro AP67 TUBEs (Fig. 146).

### 3.1.5. Studi quali-quantitativi della luce in foreste naturali

#### 3.1.5.1. Il plataneto della Valle dell'Anapo

##### 3.1.5.1.1. Analisi della luce

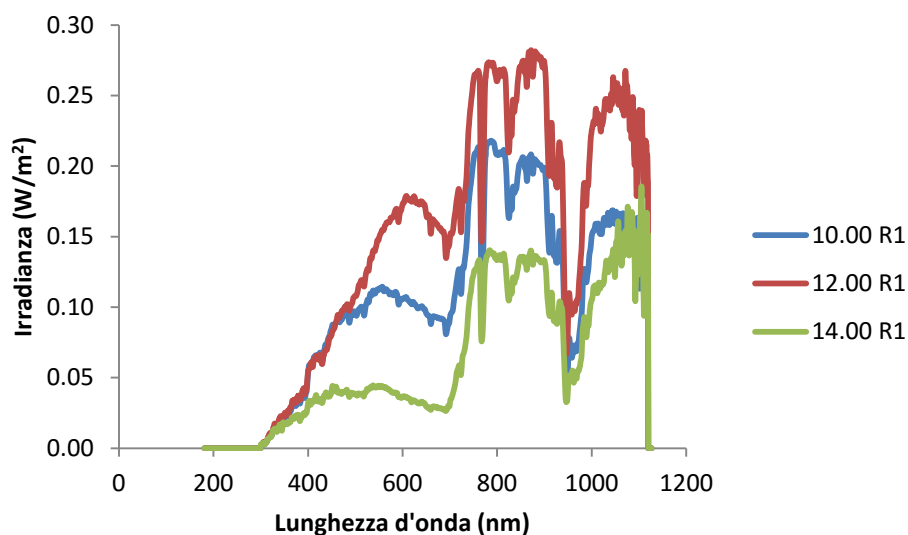
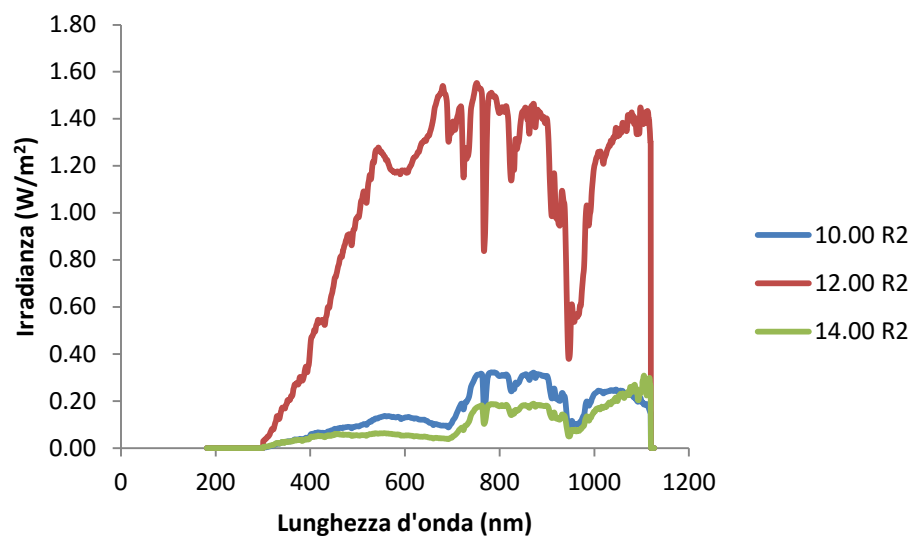
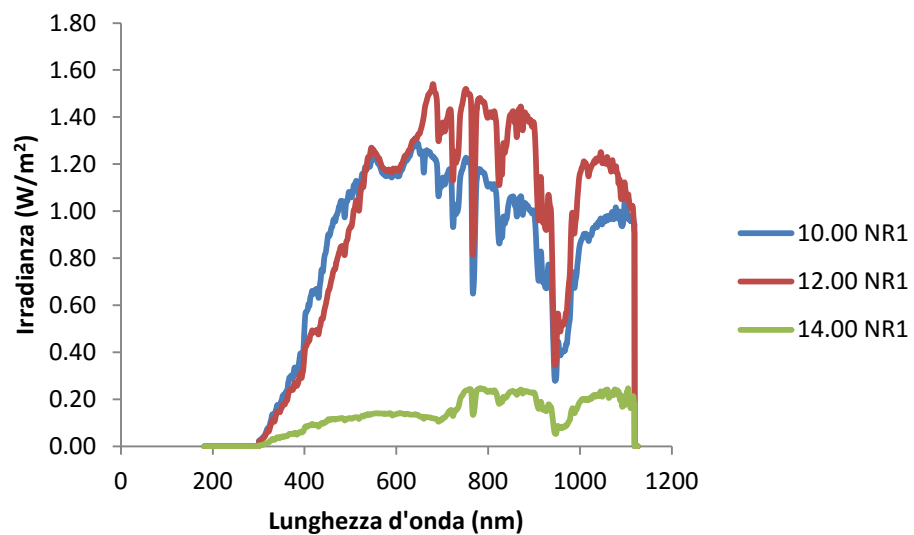


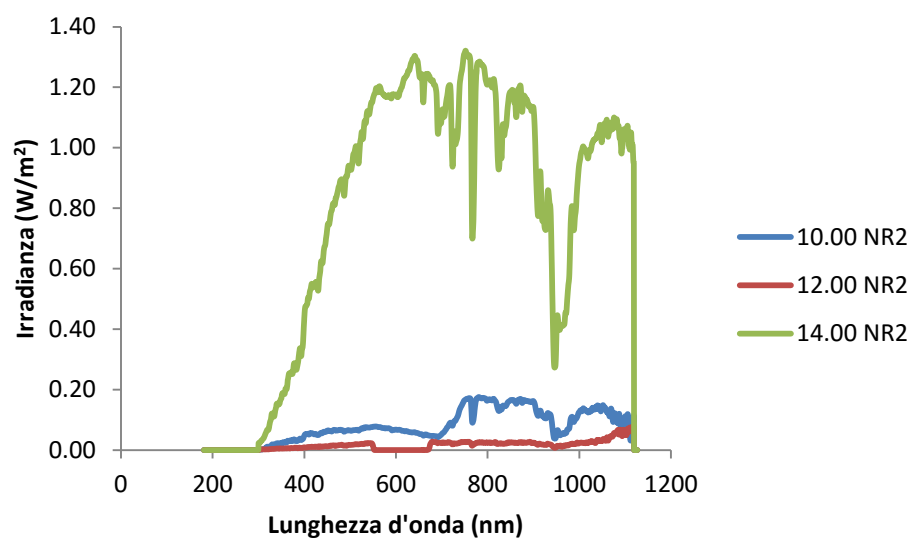
Figura 148. Spettri luminosi raccolti al punto R1 alle ore 10-12-14



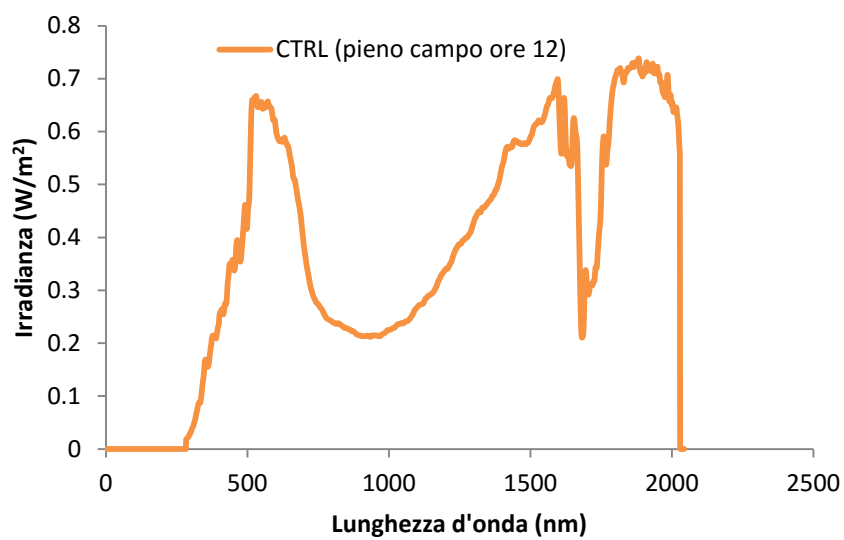
**Figura 149. Spettri luminosi raccolti al punto R2 alle ore 10-12-14**



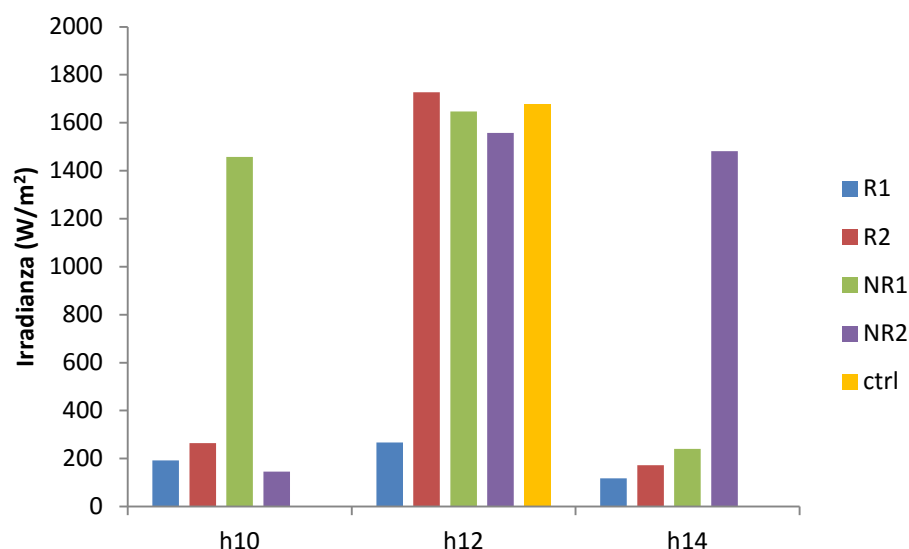
**Figura 150. Spettri luminosi raccolti al punto NR1 alle ore 10-12-14**



**Figura 151. Spettri luminosi raccolti al punto NR2 alle ore 10-12-14**



**Figura 152. Spettro di controllo raccolto in pieno campo alle ore 12**



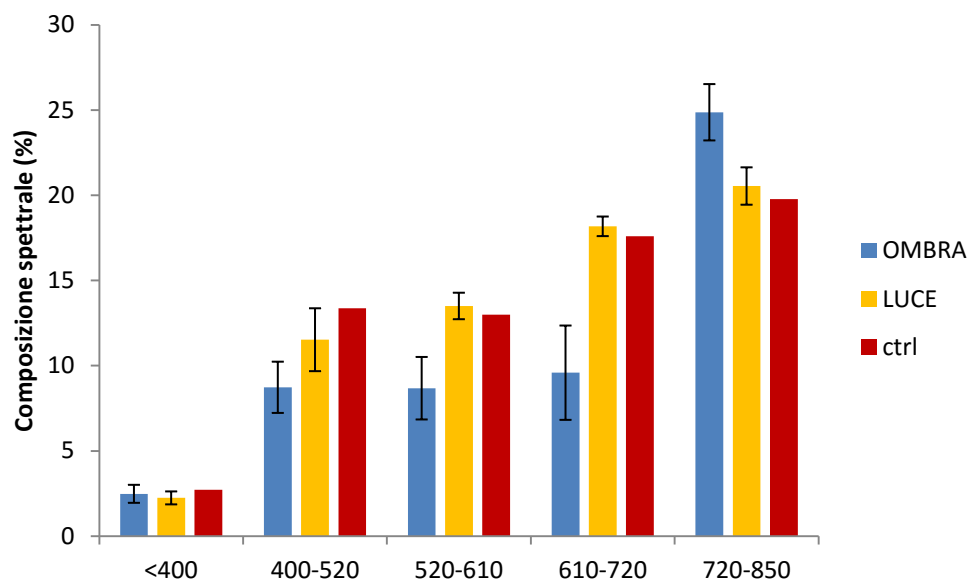
**Figura 153. Andamento dell'irradianza nei punti R1-R2-NR1-NR2 alle ore 10-12-14 (in giallo lo spettro di controllo raccolto alle ore 12 in campo aperto)**

Dall'analisi statistica dei dati relativi all'andamento dell'intensità luminosa nel corso delle ore del giorno in punti con e senza rinnovazione, non è stata rilevata alcuna significativa differenza (Fig. 148-149-150-151-152-153). A tutte le ore considerate, difatti, è stato possibile riscontrare differenze di assolazione maggiori tra due punti della medesima categoria (rinnovazione/non rinnovazione) piuttosto che tra punti di categorie diversi. Analizzando ora per ora tale affermazione, il discorso risulta più semplice da elucidare:

- Alle ore 10, entrambi i punti R1 e R2 appaiono in ombra, così come il punto NR2. Si discosta da tale comportamento il punto NR1 che appare invece illuminato da luce diretta (come è possibile osservare confrontando la banda verde di NR1 ore 10 con la banda gialla di controllo h12).
- Alle ore 12 i punti senza rinnovazione NR1 e NR2 appaiono entrambi illuminati da luce diretta, mentre dei punti con rinnovazione R1 continua a restare in condizione di ombreggiamento.
- Alle ore 14 R1 e R2 sono nuovamente in ombra, così come NR1 mentre NR2 appare ancora illuminato dal Sole.

Tali dati non consentono dunque di associare il grado differente di rinnovazione tra un punto e l'altro del bosco esclusivamente ad un parametro di apertura delle chiome, da cui

conseguono un maggiore o minore ombreggiamento durante le ore centrali della giornata. E' difatti evidente che i punti caratterizzati da rinnovazione, si ritrovano più spesso in ombra dei punti senza rinnovazione, il che sembrerebbe entrare in contrasto con la definizione classica del *Platanus orientalis* L. come specie eliofila. I semi del platano risultano dunque germogliare e accrescersi, in una prima fase di vita, in punti del bosco caratterizzati da condizioni di illuminazione alternante, né in punti a totale ombreggiamento né in punti a totale assoluzione. Tale fenomeno potrebbe essere legato più all'importanza che il parametro "acqua" riveste per la specie. Il platano cresce infatti su substrati sabbiosi, altamente drenanti, laddove una esposizione protratta al sole può causare maggiori stress idrici a causa della eccessiva evapotraspirazione rispetto che in una zona soggetta ad alternanza di momenti di luce e di ombra. Tra l'altro c'è da aggiungere, che aree totalmente assolate sono reperibili esclusivamente al limitare dei boschi di platano, nel periodo della germinazione e del primo accrescimento (primavera-estate), in quanto le ampie foglie delle piante madri tendono a costituire una volta abbastanza omogenea ma suscettibile ai venti anche più deboli, in virtù del loro alto rapporto superficie/peso, con una sorta di "effetto aquilone". Tali spostamenti inducono la formazione nel sottobosco di brevi sunflecks, ovvero colpi di luce ad alta intensità che vanno dunque in maniera frequente ma di breve durata a colpire i semi caduti sul terreno. Il concetto di eliofilia del platano è forse dunque da distinguersi in una eliofilia vera e propria caratteristica delle piante madri le cui chiome sono esposte in maniera continuativa ad alte intensità luminose, ed una eliofilia "relativa" dei germogli, che sopportano sì alte intensità luminose, ma somministrata sotto forma di colpi di luce, alternati a momenti di ombra. Tali sunflecks sono probabilmente sufficienti ad indurre un ottimale sviluppo fisiologico del semenzale. L'omogeneità delle condizioni luminose del sottobosco fa sì che la mancata rinnovazione nei punti NR1 e NR2 sia piuttosto da ascrivere a parametri non valutati nel corso di tale studio, legati alla tipologia di substrato (es. presenza di substrato roccioso difficilmente penetrabile dalle radichette) o semplicemente al movimento casuale di caduta dei semi dotati di piumino a una certa distanza dalla pianta madre, non prevedibile.



|            |                              | OMBRA   | LUCE    | ctrl    |
|------------|------------------------------|---------|---------|---------|
| <400       | UV                           | 2.48 %  | 2.24 %  | 2.72%   |
| 400-520 nm | BLU                          | 8.73 %  | 11.52 % | 13.36 % |
| 520-610 nm | VERDE-<br>GIALLO-<br>ARANCIO | 8.67 %  | 13.50 % | 12.99 % |
| 610-720 nm | ROSSO<br>VICINO              | 9.58 %  | 18.17 % | 17.58 % |
| 720-850 nm | ROSSO<br>LONTANO             | 24.87 % | 20.54 % | 19.76 % |

**Figura 154. Analisi qualitativa degli spettri luminosi raccolti in punti assolati o ombreggiati del plataneto (in rosso lo spettro di controllo raccolto alle ore 12 in campo aperto)**

Chiarito che ogni semenzale sia esposto alternativamente a condizioni di luce ed ombra nel corso della giornata, si è voluto approfondire quali siano qualitativamente le differenze tra le due condizioni suddette.

L'analisi qualitativa degli spettri luminosi dei punti in ombra e luce nel plataneto, confrontati con lo spettro solare raccolto in una radura alle ore 12 come controllo (Fig. 154), ha condotto alle seguenti osservazioni:

- I raggi UV ( $< 400$  nm) non mostrano differenze significative tra condizioni di luce e ombra all'interno del bosco nè in comparazione con la luce piena in radura (ctrl)
- La percentuale di luce blu (400-520 nm) così come quella del verde (520-610 nm) e del rosso (610-720 nm) risulta ridotta in condizioni di ombra a confronto con condizioni di luce sia in bosco sia in radura
- La percentuale di rosso lontano (720-850 nm) risulta incrementata in condizioni di ombra

### 3.1.5.2. La sughereta di Toscana

#### 3.1.5.2.1. Analisi della luce

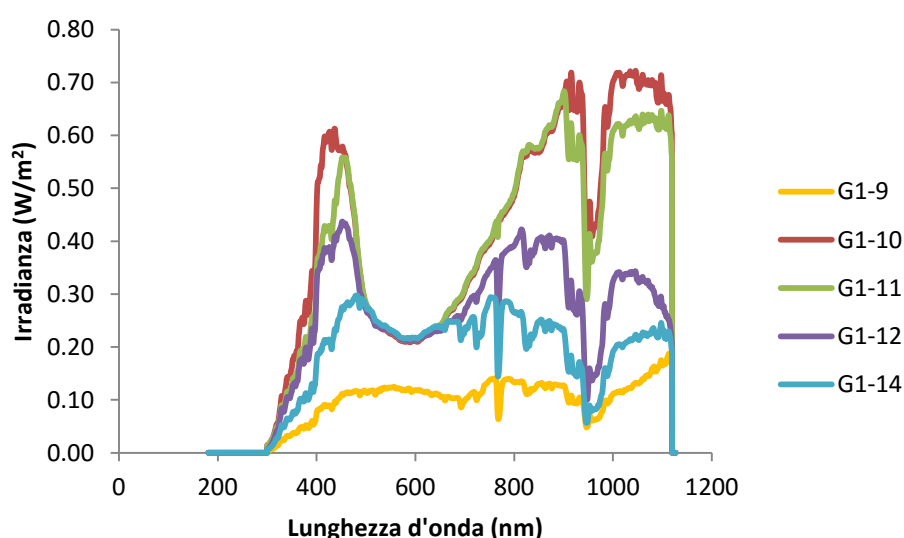
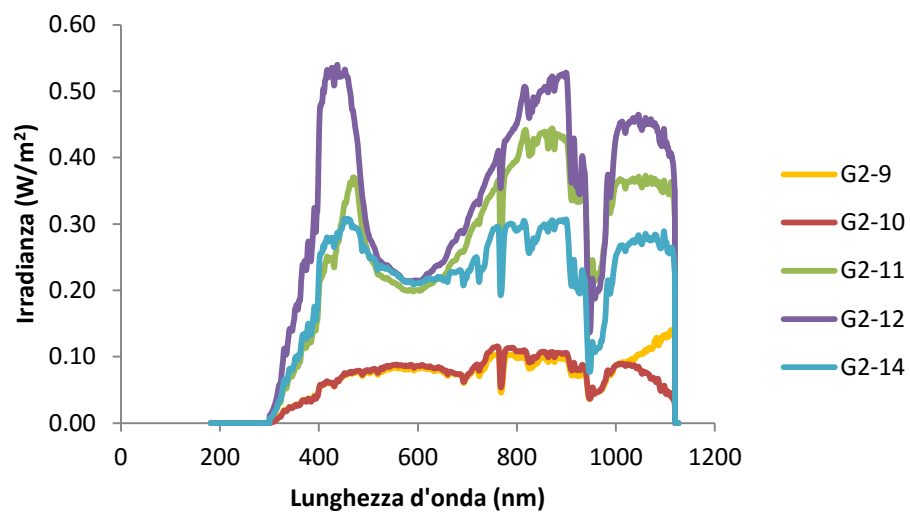
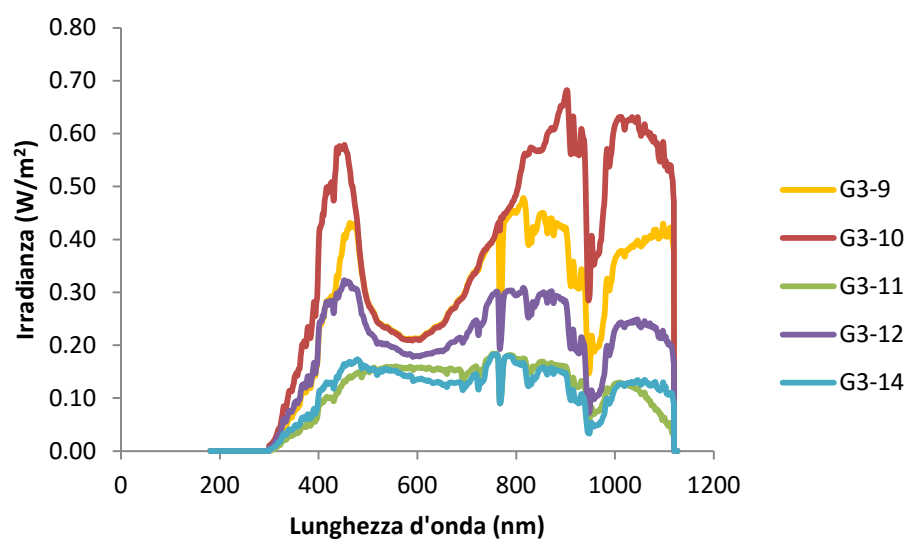


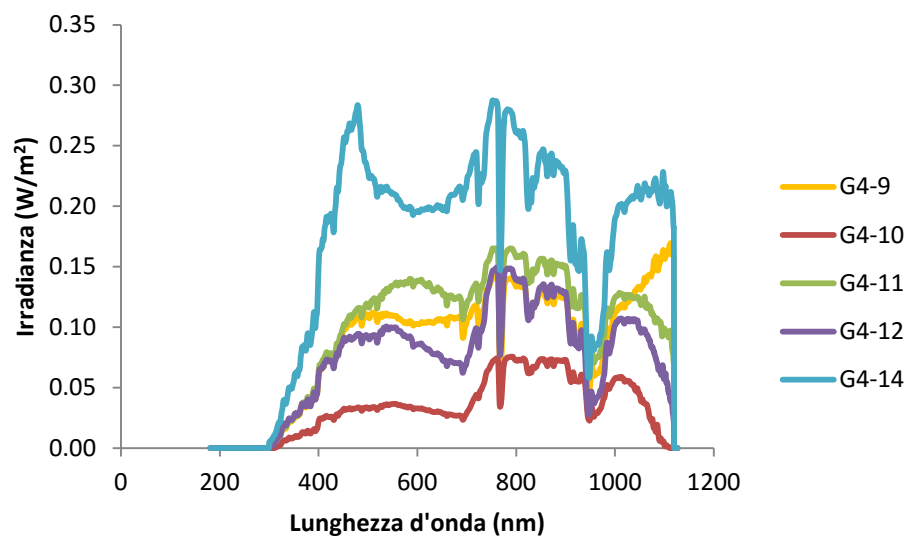
Figura 155. Spettri luminosi raccolti al punto G1 alle ore 9-10-11-12-14



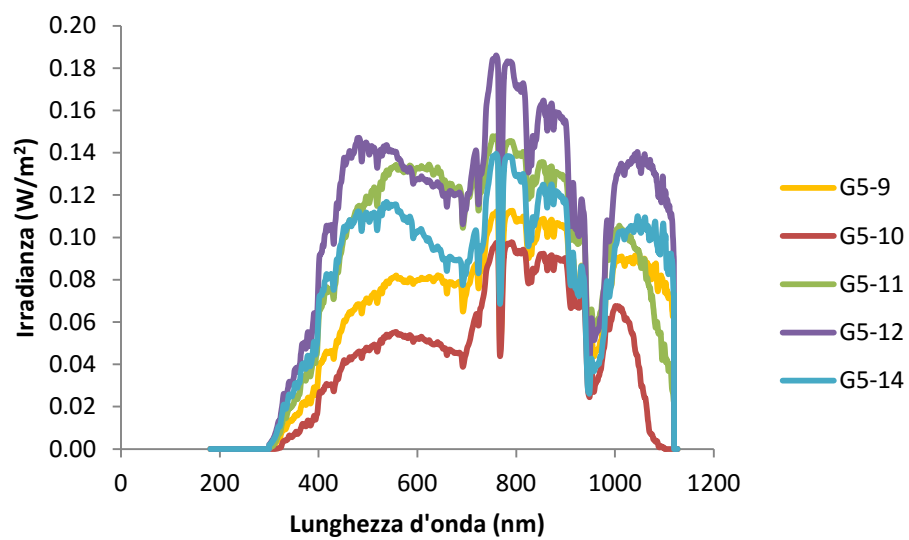
**Figura 156. Spettri luminosi raccolti al punto G2 alle ore 9-10-11-12-14**



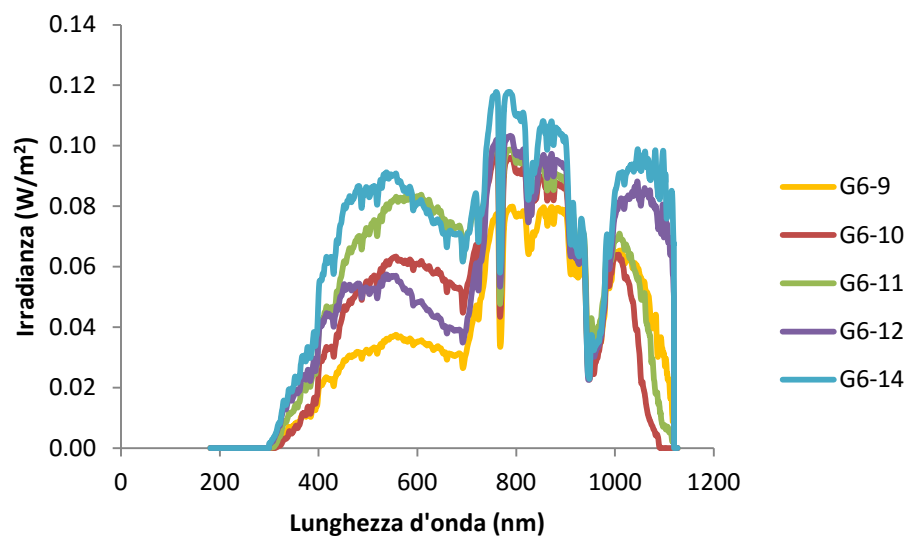
**Figura 157. Spettri luminosi raccolti al punto G3 alle ore 9-10-11-12-14**



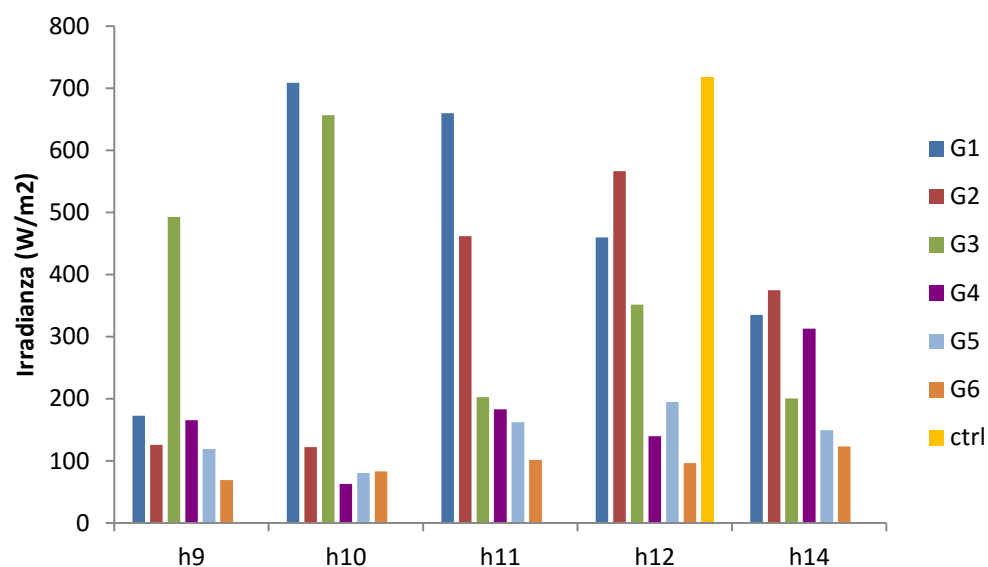
**Figura 158. Spettri luminosi raccolti al punto G4 alle ore 9-10-11-12-14**



**Figura 159. Spettri luminosi raccolti al punto G5 alle ore 9-10-11-12-14**



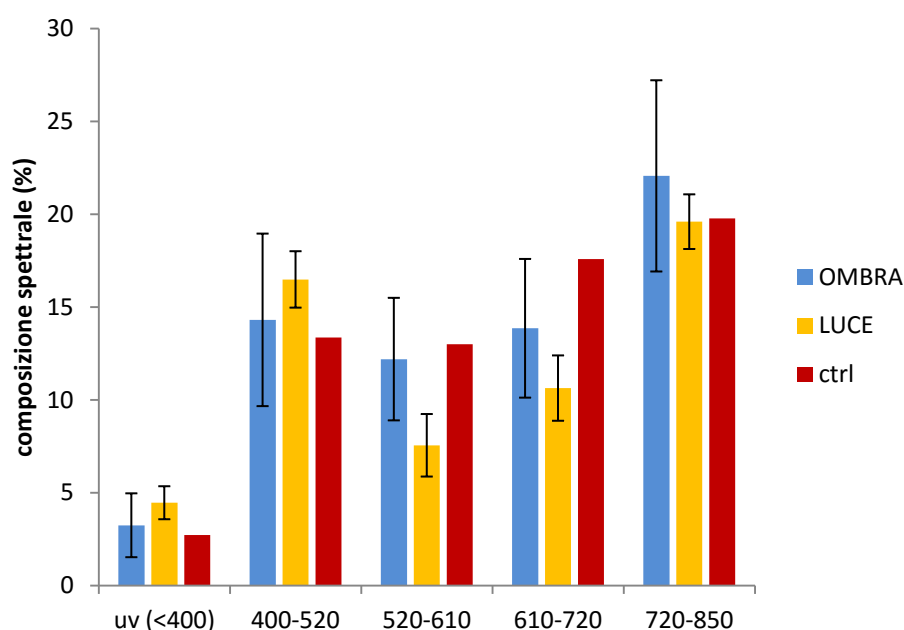
**Figura 160. Spettri luminosi raccolti al punto G6 alle ore 9-10-11-12-14**



**Figura 161. Andamento dell'irradianza nei punti G1-G2-G3-G4-G5-G6 alle ore 9-10-11-12-14 (in giallo lo spettro di controllo raccolto alle ore 12 in campo aperto)**

Le gabbiette classificate come gabbiette di luce (G luce: G1-G2-G3) e quelle di ombra (G ombra: G4-G5-G6) sono state confrontate in termini di intensità luminosa media alle ore 9, 10, 11, 12 e 14 (Fig. 155-156-157-158-159-160-161). Nel corso della giornata, ogni gabbietta, attraversa vari gradi di ombreggiamento. Non vi sono in sintesi gabbiette esposte in maniera continua ad ombra intensa o a sole pieno, per la medesima ragione già descritta nel precedente paragrafo in relazione al bosco di platano, ovvero a causa della

folta copertura vegetativa e al movimento delle foglie sospinte dal vento. La differenza sostanziale riscontrata tra le gabbiette di luce e di ombra è il range di intensità cui esse possono essere esposte durante le ore centrali del giorno. Le gabbiette che a mezzogiorno appaiono in ombra, tra le ore 9 e le ore 14 attraversano vari gradi di ombreggiamento, in un range che va da circa 50 a circa 350 W/m<sup>2</sup>. Al contrario le gabbiette che sono esposte alla luce alle ore 12, mostrano tra le 9 e le 14 vari gradi di ombreggiamento di minore intensità, probabilmente legato alla differente esposizione e al differente grado di copertura vegetativa che le caratterizza rispetto alle gabbiette di ombra, in un range che varia da 100 W/m<sup>2</sup> ad oltre 700 W/m<sup>2</sup>, paragonabili al valore rilevato in una zona aperta del bosco alle ore 12. Tale condizione di illuminazione diretta è temporanea, in quanto nessuna delle gabbiette di sole ha mostrato di essere esposta in maniera continua alla luce solare dalle 9 alle 14. A seconda dell'orientamento del Sole rispetto alla Terra, una singola gabbietta si trova illuminata in maniera diretta in una particolare fase della giornata. Nelle ore restanti essa è invece soggetta a gradi di ombreggiamento variabile.



|                   |                                       | <b>OMBRA</b> | <b>LUCE</b> | <b>ctrl</b> |
|-------------------|---------------------------------------|--------------|-------------|-------------|
| <b>&lt;400 nm</b> | <b>UV</b>                             | 3.25 %       | 4.46 %      | 2.72 %      |
| <b>400-520 nm</b> | <b>BLU</b>                            | 14.31 %      | 16.48 %     | 13.36 %     |
| <b>520-610 nm</b> | <b>VERDE-<br/>GIALLO-<br/>ARANCIO</b> | 12.19 %      | 7.55 %      | 12.99 %     |
| <b>610-720 nm</b> | <b>ROSSO<br/>VICINO</b>               | 13.85 %      | 10.63 %     | 17.59 %     |
| <b>720-850 nm</b> | <b>ROSSO<br/>LONTANO</b>              | 22.06 %      | 19.59 %     | 19.77 %     |

**Figura 162. Analisi qualitativa degli spettri luminosi raccolti in punti assolati o ombreggiati della sughereta (in rosso lo spettro di controllo raccolto alle ore 12 in campo aperto)**

Le condizioni medie di luce ed ombra all'interno del bosco di Tuscania sono state qualitativamente confrontate con uno spettro di controllo rilevato alle ore 12 in una zona aperta al limitare della sughereta (Fig. 162), giungendo alle seguenti osservazioni:

- I raggi UV (< 400 nm) non mostrano differenze significative tra condizioni di luce e ombra all'interno del bosco nè in comparazione con la luce piena in radura (ctrl)
- Le foglie della chioma abbattano parte delle radiazioni blu incidenti, inducendo una discreta riduzione di questa componente dello spettro in condizioni di ombreggiamento.
- Al contrario di quanto rilevato nella valle dell'anapo, la probabile differente conformazione delle foglie della sughera rispetto a quelle del platano, comporta un incremento delle percentuali di verde e rosso in condizioni di ombra rispetto a

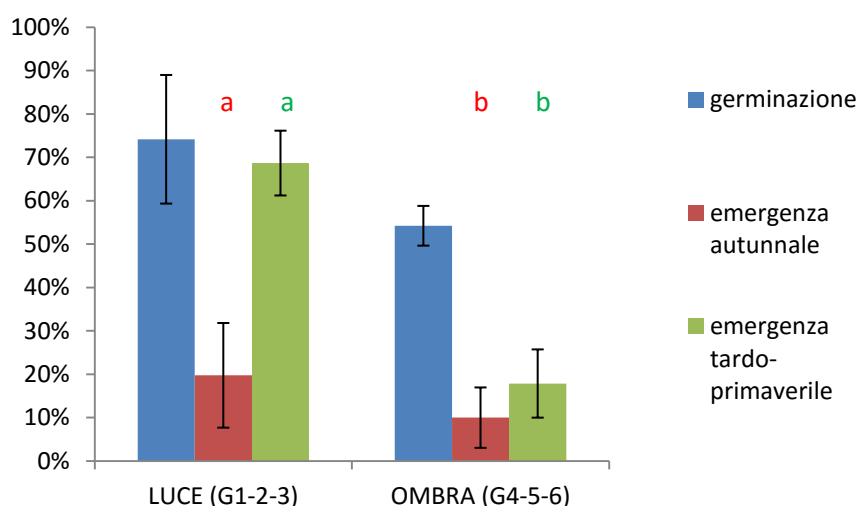
condizioni di soleggiamento. Tali percentuali corrispondono a quelle rilevabili nella zona di controllo.

- Come osservato presso la Valle dell'Anapo, la percentuale di rosso lontano appare incrementata in condizioni di ombra.

### 3.1.5.2.2. Analisi dei semenzali

In termini di percentuale di germinazione, rilevata all'inizio della primavera 2015, non sono state rilevate significative differenze tra gabbiette di luce e di ombra, seppur la germinazione nelle gabbiette di luce sia risultata lievemente superiore (circa 75% contro circa 60% nelle gabbiette d'ombra). Al contrario, la percentuale di emergenza sia autunnale (novembre) sia tardo-primaverile (maggio), è risultata statisticamente differente tra le due tipologie di esposizioni, con un valore medio del 20% nelle gabbiette di luce e del 10% in quelle di ombra in fase autunnale e del 70% contro un 20% in fase tardo-primaverile (Fig. 163).

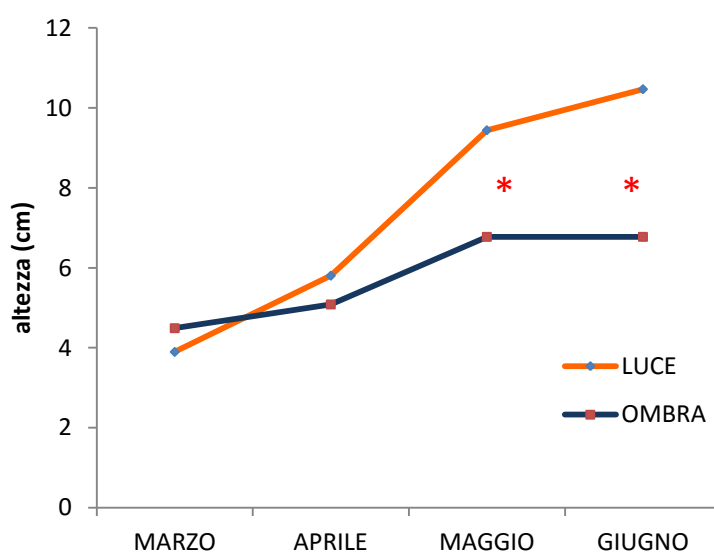
N.B. La percentuale di emergenza tardo-primaverile è data dalla sommatoria delle emergenze verificatesi prima dell'inizio della stagione invernale e in concomitanza con il rialzo termico primaverile.



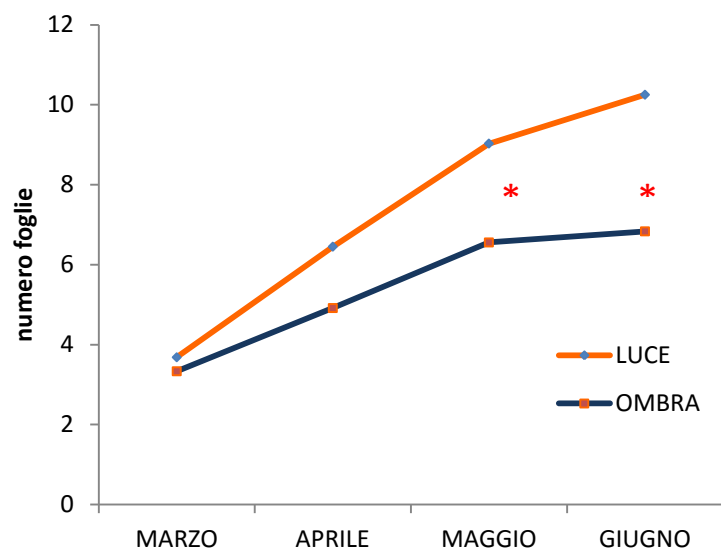
**Figura 163. Percentuale di germinazione, emergenza autunnale e emergenza tardo-primaverile in gabbiette esposte alla luce e all'ombra**

In seguito all'emergenza dell'apice caulinare, i semenzali in accrescimento nelle due tipologie di gabbiette sono stati monitorati, rilevando significative differenze nell'incremento di altezza (Fig. 164) e numero di foglie (Fig. 165) tra gabbiette di luce e di ombra soprattutto a partire da maggio, ovvero nella fase di incremento termico medio delle temperature stagionali. In entrambi i casi i semenzali delle gabbiette di luce hanno mostrato valori superiori. Al contrario non sono state rilevate differenze significative nello sviluppo della clorofilla nel corso dei mesi (Fig. 167).

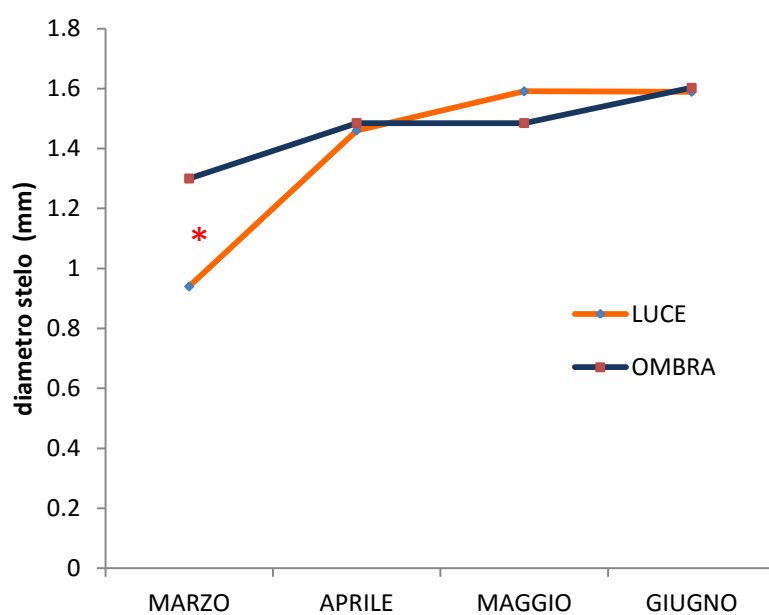
Il diametro dello stelo ha invece mostrato un comportamento in antitesi con i parametri precedentemente descritti di altezza e numero delle foglie, raggiungendo inizialmente (marzo) valori più elevati nei semenzali delle gabbiette d'ombra per poi raggiungere un medesimo valore medio senza differenze tra le due condizioni a partire dal mese di aprile, condizione rimasta invariata nei mesi successivi (Fig. 166).



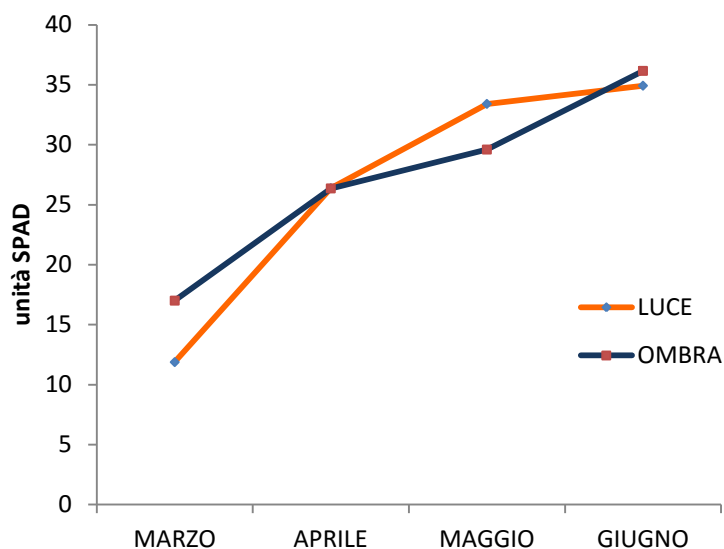
**Figura 164. Andamento dell'altezza dello stelo nelle gabbiette alla luce e in ombra tra marzo e giugno (gli asterischi indicano differenze statisticamente significative con  $P < 0.05$ )**



**Figura 165. Andamento del numero di foglie nelle gabbiette alla luce e in ombra tra marzo e giugno (gli asterischi indicano differenze statisticamente significative con  $P < 0.05$ )**

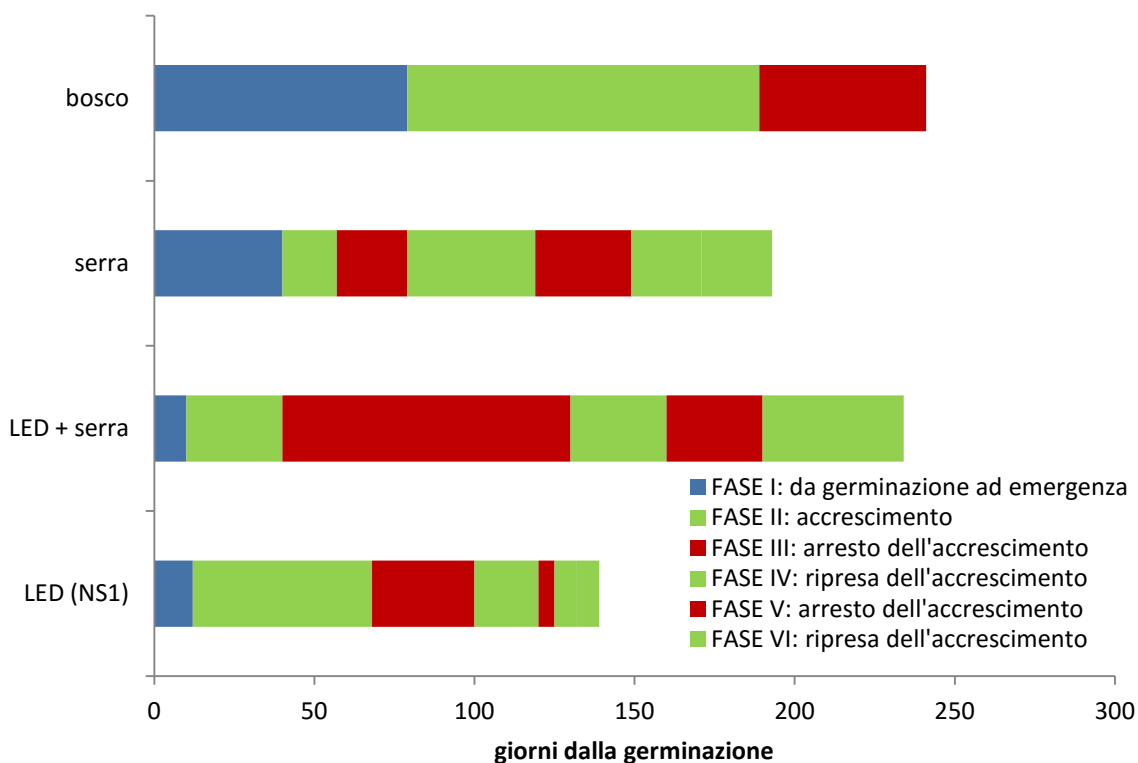


**Figura 166. Andamento del diametro dello stelo nelle gabbiette alla luce o in ombra tra marzo e giugno (gli asterischi indicano differenze statisticamente significative con  $P < 0.05$ )**



**Figura 167. Andamento della concentrazione di clorofilla nelle gabbiette alla luce o in ombra tra marzo e giugno**

### 3.1.5.2.3. Analisi della fenologia dei semenzali di sughera



**Figura 168. Analisi fenologica dei semenzali di sughera in ambiente naturale (bosco), seminaturale (serra; germinazione sotto luci LED seguita da trasferimento in serra) e artificiale (camera di crescita con luci LED NS1)**

L'analisi fenologica delle ghiande di sughera germinate e cresciute in ambiente naturale (bosco), seminaturale controllato (serra) e artificiale (camera di crescita), ha mostrato profonde differenze nella estensione delle singole fasi fenologiche (fase I: da germinazione ad emergenza; fase II: prima fase di accrescimento; III fase: primo arresto nell'accrescimento) nonché nel numero di fasi fenologiche riscontrabili nel medesimo periodo di analisi (novembre 2014 - luglio 2015) tra i vari ambienti (Fig. 168).

Prendendo in considerazione l'ambiente naturale (bosco) è possibile osservare come la fase I abbia avuto una durata di circa 80 giorni (inizio emergenza: metà gennaio 2015). La prima fase di accrescimento è durata circa 110 giorni (da gennaio a maggio) seguita dalla stasi vegetativa estiva che si è protratta fino al mese di settembre (non considerato nel grafico).

In contemporanea, le condizioni più miti consentite dalla coltivazione in serra, hanno portato ad una riduzione della durata della prima fase da 80 a 40 giorni. La fase di accrescimento si è protratta per soli 17 giorni, seguita da una fase di stasi vegetativa di 22 giorni. Una seconda fase di crescita vegetativa della durata di 40 giorni è iniziata a fine aprile 2015, per interrompersi in concomitanza con la stasi vegetativa estiva di giugno rilevata anche in bosco. A differenza del bosco, una ripresa della crescita vegetativa è avvenuta dopo soli 30 giorni di stasi vegetativa, nel corso del mese di luglio.

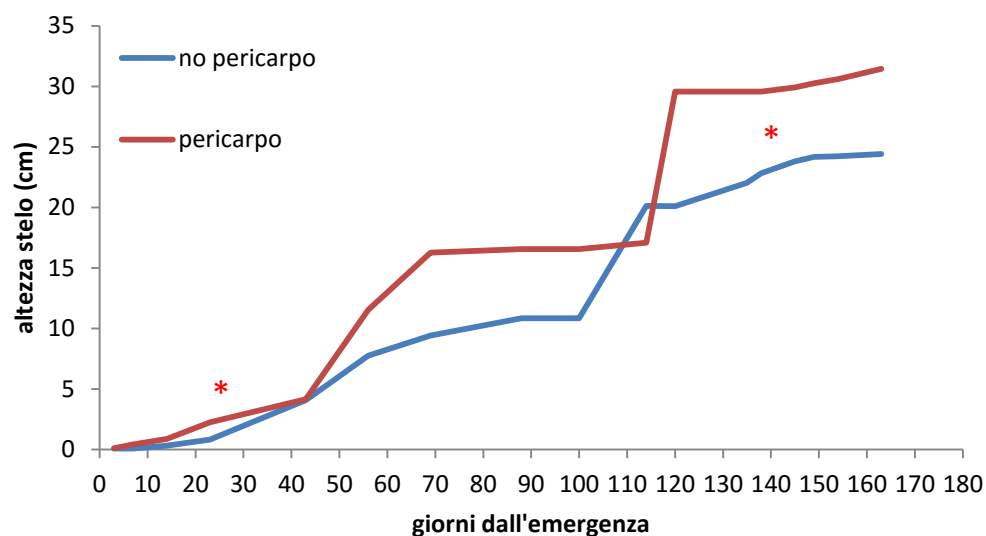
Da notare è che la semina contemporanea in serra di ghiande pregerminate sotto lampade LED, è in grado di accelerare la fase di emergenza, che viene così ridotta da 40 a 10 giorni. La prima fase di accrescimento ha durata di 30 giorni, seguita da una lunga stasi di 90 giorni. Una seconda fase di crescita vegetativa è iniziata ad aprile 2014, protrandosi per 30 giorni, seguita da 30 giorni di stasi vegetativa e da una terza fase di accrescimento, così come per le ghiande germinate direttamente in serra, iniziata a luglio 2015.

La coltivazione indoor della sughera ha mostrato una estrema riduzione della durata delle suddette fasi fenologiche, richiedendo soltanto 10 giorni per l'emergenza dell'apice caulinare, 56 giorni per il primo ciclo di accrescimento seguito da 32 giorni di stasi vegetativa e da un secondo ciclo di crescita vegetativa della durata di 20 giorni. A seguito di tale fase è stato riscontrato un minimo periodo di stasi vegetativa (5 giorni) interrotto rapidamente da un nuovo ciclo di crescita. L'assenza dell'influenza dei normali ritmi stagionali presenti in bosco e, seppur attenuati, anche in serra, determinano dunque una

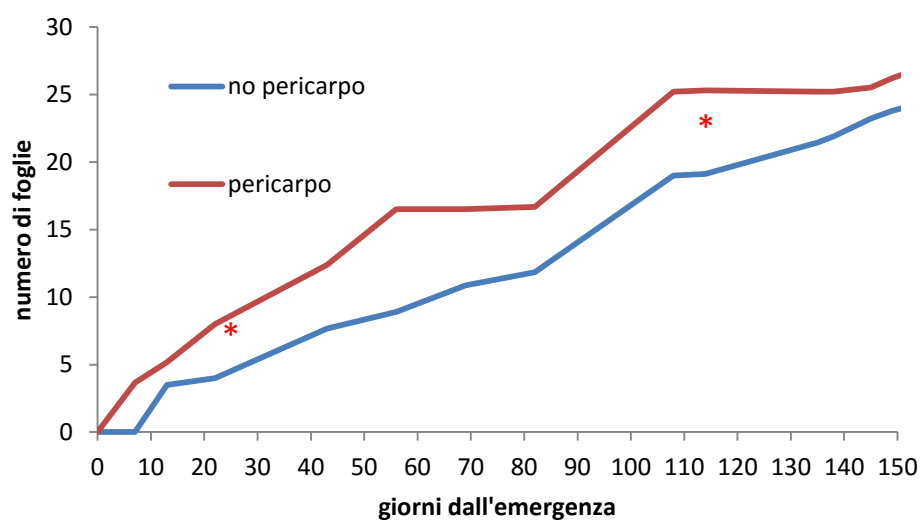
alterazione della dinamica fenologica delle piante, garantendo un accrescimento maggiore in un minor tempo.

Lo studio dell'effetto dell'influenza del pericarpo delle ghiande sui ritmi fenologici indoor, ha dimostrato che:

- L'accrescimento del semenzale è favorita dalla conservazione del pericarpo nel corso della crescita. In particolare tale effetto di promozione si manifesta in maniera evidente a partire da circa 50 giorni dopo l'emergenza dell'apice caulinare. Tra i 50 e i 100 giorni i semenzali che conservano il pericarpo mostrano un'altezza doppia rispetto ai semenzali derivanti da ghiande sottoposte ad escissione del pericarpo prima della semina. Attorno al 120° giorno, a causa di un rallentamento nella crescita dei semenzali da ghianda con pericarpo e da una contemporanea accelerazione di quelli da ghianda senza pericarpo, si assiste al raggiungimento di un valore medio simile tra le due categorie, attorno a 15 cm di altezza. A partire da questa fase si ha una nuova fase di crescita esponenziale dei semenzali da ghianda con pericarpo, che conduce ad un'altezza finale (valutata a 170 giorni) di circa 30 cm, contro una media di 25 cm per i semenzali da ghianda priva di pericarpo (Fig. 169).
- Per quanto riguarda il ritmo di emissione delle foglie, anch'esso appare influenzato positivamente dalla conservazione del pericarpo, con valori doppi nel numero di foglie per i semenzali derivanti da ghiande con pericarpo rispetto a quelli da ghianda priva, fino ad 80 giorni dall'emergenza. A partire da tale fase, come osservato anche per lo sviluppo in altezza, si ha un rallentamento nell'accrescimento dei semenzali da ghianda con pericarpo, così che i valori medi nel numero di foglie tra le due categorie tendono ad avvicinarsi. Attorno ai 150 giorni la differenza nel numero di foglie non risulta significativa, con un valore medio di 24 per i semenzali da ghiande senza pericarpo contro un valore di 26 per i semenzali da ghianda con pericarpo (Fig. 170).

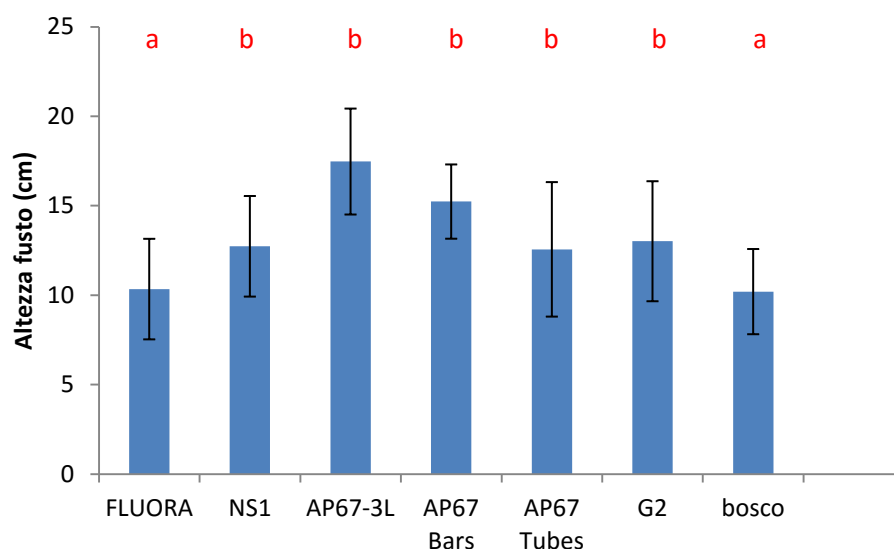


**Figura 169.** Andamento dell'altezza dello stelo in semenzali derivanti da ghiande seminate con e senza pericarpo (gli asterischi indicano differenze statisticamente significative con  $P < 0.05$ )



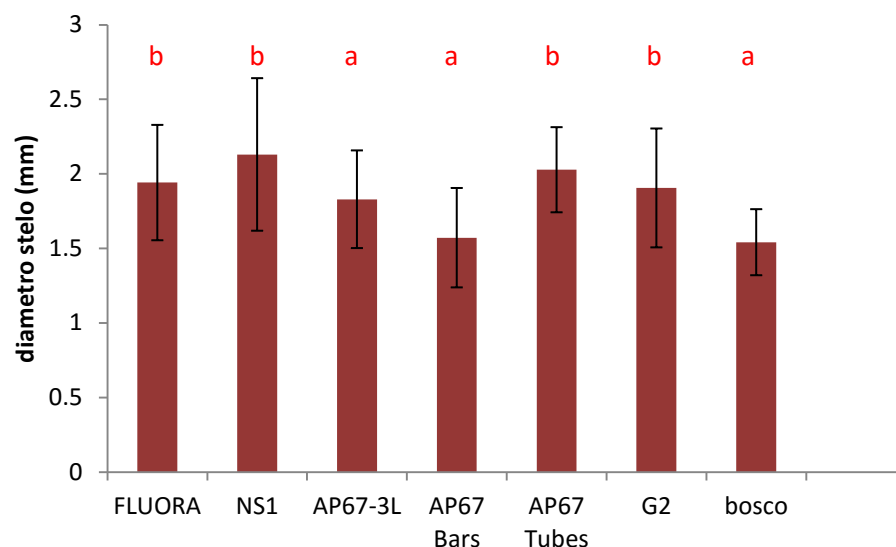
**Figura 170.** Andamento del numero di foglie in semenzali derivanti da ghiande seminate con e senza pericarpo (gli asterischi indicano differenze statisticamente significative con  $P < 0.05$ )

### 3.1.5.2.4. Confronto morfometrico tra semenzali cresciuti in bosco e camera di crescita



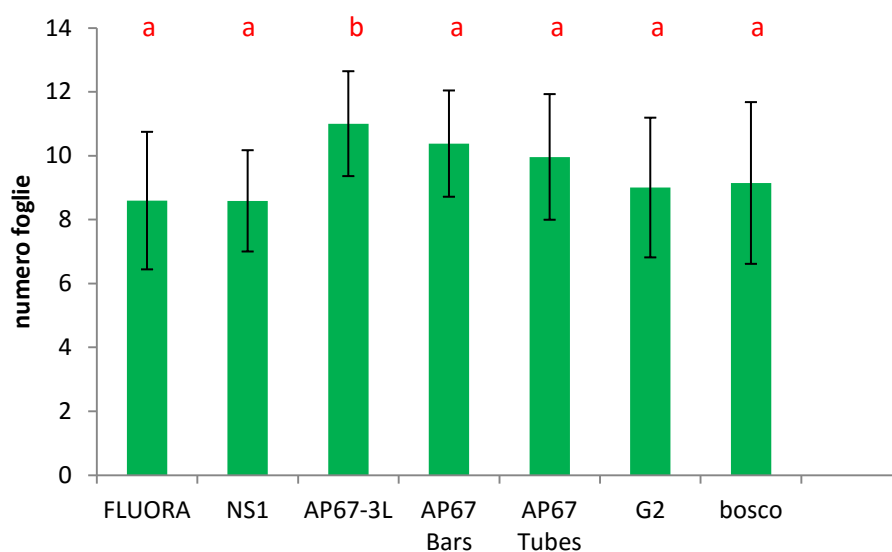
**Figura 171. Altezza dello stelo di *Q. suber* al termine di un ciclo di coltivazione indoor di 30 giorni sotto spettri FLUORA-NS1-AP673L-AP67 bars AP67 tubes-G2 a confronto con il valore medio rilevato in bosco all'inizio della stagione estiva**

In soli 30 giorni di crescita in ambiente controllato, i semenzali di sughera hanno raggiunto dimensioni compatibili se non superiori a quelle mediamente riscontrabili presso la sughereta di Tuscania al termine della prima stagione vegetativa, ovvero al sopraggiungere della stasi vegetativa estiva nel corso del mese di Giugno. Nello specifico, per quanto concerne l'altezza dello stelo, tutti gli spettri LED hanno condotto a valori superiori a quelli riscontrabili in bosco. Al contrario, le lampade a fluorescenza hanno comportato lo sviluppo di semenzali di dimensioni più contenute, paragonabili a quelle dei semenzali presenti in bosco a Giugno (Fig. 171).



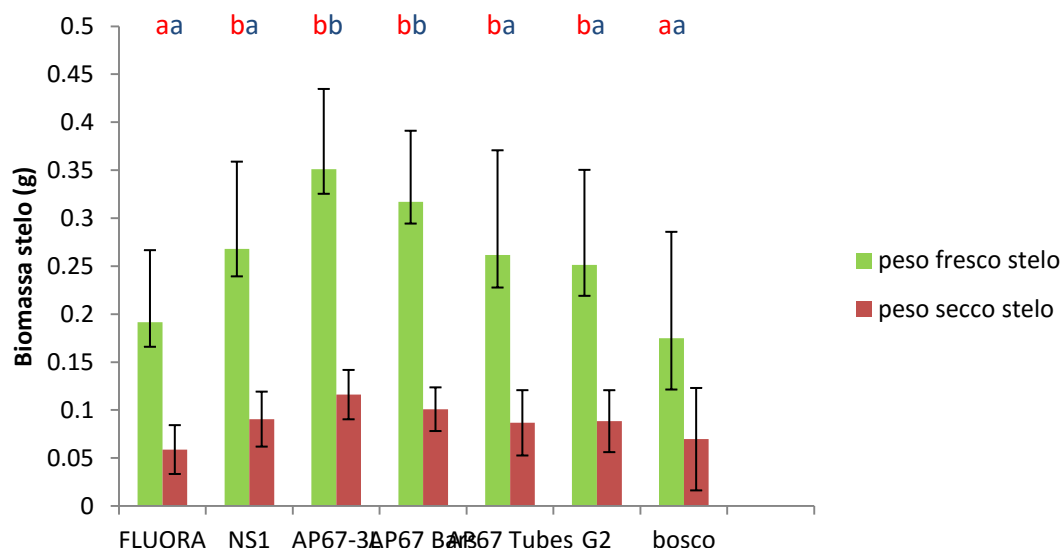
**Figura 172. Diametro dello stelo di *Q. suber* al termine di un ciclo di coltivazione indoor di 30 giorni sotto spettri FLUORA-NS1-AP673L-AP67 bars AP67 tubes-G2 a confronto con il valore medio rilevato in bosco all'inizio della stagione estiva**

In termini di diametro dello stelo, gli spettri LED AP67-3L e AP67 bars hanno portato allo sviluppo di semenzali più esili, con valori compatibili con quelli misurati in bosco, al contrario di FLUORA, NS1, G2 e AP67 tubes, che hanno mostrato valori significativamente superiori (Fig. 172).



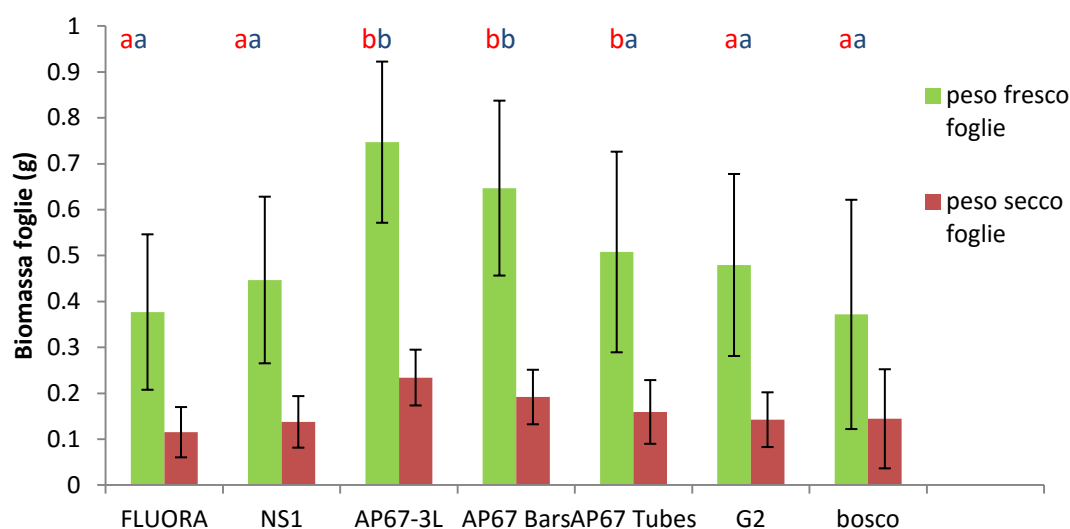
**Figura 173. Numero di foglie di *Q. suber* al termine di un ciclo di coltivazione indoor di 30 giorni sotto spettri FLUORA-NS1-AP673L-AP67 bars AP67 tubes-G2 a confronto con il valore medio rilevato in bosco all'inizio della stagione estiva**

Per quanto concerne il numero di foglie, non sono state riscontrate differenze statisticamente significative tra valori raccolti in bosco e in camera di crescita, fatta eccezione per lo spettro AP67-3L, che ha manifestato la capacità di indurre una maggiore emissione di foglie rispetto a tutti gli altri spettri (Fig. 173).



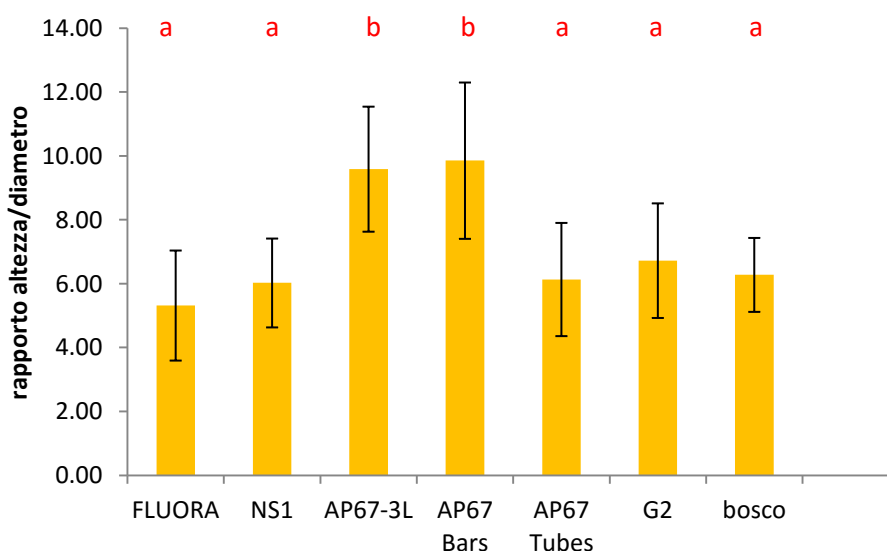
**Figura 174. Biomassa dello stelo di *Q. suber* al termine di un ciclo di coltivazione indoor di 30 giorni sotto spettri FLUORA-NS1-AP673L-AP67 bars AP67 tubes-G2 a confronto con il valore medio rilevato in bosco all'inizio della stagione estiva**

L'analisi del peso fresco dello stelo ha sottolineato la maggiore capacità delle luci LED rispetto alle lampade a fluorescenza di favorire l'accumulo di biomassa a livello dello stelo. FLUORA è stato difatti l'unico spettro caratterizzato da valori compatibili con quelli riscontrabili in bosco. In termini di peso secco invece si è evidenziata una significativa differenza con i pesi medi relativi al bosco, soltanto nei semenzali cresciuti sotto AP67-3L e AP67 bars, che risultano dunque essere i migliori spettri in termini di induzione dell'accumulo di biomassa a livello epigeo (Fig. 174).



**Figura 175. Numero di foglie di *Q. suber* al termine di un ciclo di coltivazione indoor di 30 giorni sotto spettri FLUORA-NS1-AP673L-AP67 bars AP67 tubes-G2 a confronto con il valore medio rilevato in bosco all'inizio della stagione estiva**

L'analisi del peso fresco delle foglie ha evidenziato la capacità degli spettri AP67-3L, AP67 bars e AP67 tubes, di indurre un accumulo di biomassa a livello fogliare. Anche in questo caso, come osservato per il peso secco dello stelo, AP67-3L e AP67 bars si sono distinti quali spettri in grado di incrementare significativamente l'accumulo di biomassa a livello epigeo (Fig. 175).



**Figura 176. Rapporto di snellezza di *Q. suber* al termine di un ciclo di coltivazione indoor di 30 giorni sotto spettri FLUORA-NS1-AP673L-AP67 bars AP67 tubes-G2 a confronto con il valore medio rilevato in bosco all'inizio della stagione estiva**

I semenzali cresciuti in bosco hanno mostrato rapporti di snellezza simili a quelli rilevati sotto gli spettri FLUORA, NS1, AP67 tubes e G2. AP67-3L e AP67 bars hanno mostrato invece valori superiori, derivanti dalla promozione dell'accrescimento in altezza dello stelo indotta da tali spettri (Fig. 176).

#### **4. Discussione**

Come affermato nell'introduzione di questa tesi, l'agricoltura in ambiente controllato ha avuto un vasto sviluppo nel corso dell'ultimo secolo, in virtù di una serie di vantaggi rispetto alle tecniche tradizionali di coltivazioni in terra. In primo luogo non vi è produzione di reflui; inoltre consente una produzione continua 12 mesi l'anno; vi è un risparmio idrico stimato tra il 70-80%; i sistemi sono totalmente indipendenti dalle condizioni meteorologiche esterne e non vengono interessati da eventi estremi quali alluvioni, stagioni siccitose o tornado. Elemento importante è che esse possono essere installate ovunque, in quanto non necessitano di suolo per le coltivazioni. Le coltivazioni in terra sono poi soggette ad attacchi microbici o di insetti dannosi, che determinano ingenti perdite di raccolto annuale, il che consente di minimizzare se non eliminare possibili perdite senza l'utilizzo di pesticidi tossici.

Con la realizzazione del progetto Zephyr si è mirato a trasferire tutti tali vantaggi nell'ambito della vivaistica forestale, valutando l'applicabilità delle metodologie di coltivazione indoor ormai in fase di espansione esponenziale nel Nord Europa, Nord America e Giappone, a specie forestali della fascia temperata, molte delle quali caratterizzate da difficoltà germinative o alta competizione con specie invasive. Obiettivo fondamentale del lavoro, al di là dell'automazione del sistema, che consente di minimizzare il ruolo dell'operatore nella gestione delle coltivazioni, è stata dunque la ricerca di protocolli di germinazione, prima ancora che di crescita, tali da ottenere un elevato numero di semenzali da utilizzare a scopo di rimboschimento, primariamente, nonché a scopo ornamentale.

La molteplicità di specie testate ha comportato, in un primo momento, la necessità di selezione di un modello di vassoio multiplug universale e di un substrato unico per tutte le specie. Sebbene questa ultima osservazione possa risultare un controsenso, date le necessità delle singole specie in termini di caratteristiche del suolo, bisogna sottolineare come, nel campo delle coltivazioni idroponiche, non si parli più di suolo ma di substrato. Il substrato

non è che un supporto materiale per la radicazione del semenzale, che può essere arricchito in nutrienti prima del trasferimento in vassoio (pre-charged) direttamente dall'azienda produttrice (es. Jiffy Preforma) oppure mediante utilizzo di una soluzione nutriente che viene utilizzata al posto dell'acqua di irrigazione. Il substrato deve dunque rispondere a caratteristiche peculiari per le quali si rimanda al capitolo introduttivo, che ne garantiscano la stabilità ma allo stesso tempo un'ottimale capacità drenante e di idratazione. Il substrato migliore è quello che consente un lento e continuo rilascio dell'acqua alle radici delle piante, evitando stadi di disidratazione eccessiva o saturazione con conseguenziale anossia radicale.

Il substrato Jiffy Preforma è stato scelto quale ottimale per il prototipo in quanto facile da programmare in maniera automatizzata per le fasi di irrigazioni del sistema. Il tempo di reidratazione dei panetti risulta essere difatti molto breve, di circa 120 secondi, il che consente di prevedere un ciclo di irrigazione in rotazione per i dieci vassoi del prototipo decisamente rapido, in cui ogni vassoio permanga per 120 secondi nel reservoir dell'acqua posizionato nella zona basale della cella di crescita.

La disidratazione del panetto risulta essere invece molto lenta, consentendo un graduale rilascio dell'acqua alle piante. Senza piante all'interno del vasetto, è stato calcolato un range di 24-48 ore perché il panetto raggiunga il limite inferiore del range EAW. Considerando che la presenza di una pianta con evapotraspirazione attiva possa andare a ridurre tale periodo, è stata valutata la necessità di minimo un ciclo di irrigazione al giorno, da incrementarsi in funzione dell'accrescimento della pianta nonché della sua fisiologia, con l'ausilio dei sensori di umidità del suolo.

Il substrato Jiffy Preforma si presta dunque bene all'utilizzo in un sistema automatizzato ma risulta difficile da controllare in una fase di ricerca sperimentale in cui l'operatore sia il diretto responsabile dell'irrigazione manuale dei panetti. La necessità di una irrigazione giornaliera comporterebbe o l'installazione di un sistema di irrigazione automatico o la presenza di un operatore 7 giorni su 7 nei laboratori.

Per difficoltà di installazione di sistemi automatizzati nella camera di crescita Zephyr allestita presso i laboratori Unitus, si è optato per una soluzione alternativa, ovvero la sostituzione con un differente substrato misto a base di torba, caratterizzato da minore velocità di assorbimento e disidratazione, per la fase sperimentale di messa a punto dei protocolli di crescita.

La prima fase del lavoro sperimentale, finalizzato alla definizione di protocolli di germinazione idonei per le varie specie trattate, ha condotto a buoni risultati di germinazione solo per parte delle specie, caratterizzate da dormienza meno profonda, mediante applicazione di metodologie termiche o ormonali (*Corylus avellana* L., *Fraxinus excelsior* L., *Fraxinus ornus* L., *Hypericum foliosum* Aiton, *Laurus azorica* (Seub.) Franco, *Platanus orientalis* L., *Quercus suber* L.).

Nello specifico *C. avellana* e *F. excelsior* hanno mostrato alti tassi di germinazione (80-100%) in seguito a pretrattamento termico (stratificazione a freddo) mentre per *F. ornus* si è raggiunta una germinazione del 100% in seguito a pretrattamento ormonale.

*H. foliosum* ha dato ottimi risultati sia in risposta a pretrattamenti termici sia a combinazioni di pretrattamenti termici e ormonali, raggiungendo il 100% di germinazione sia in seguito a 30/60 giorni di stratificazione a freddo sia a trattamento con gibberelline seguito da stratificazione a freddo per 60 giorni. L'utilizzo di gibberelline risulta dunque superfluo nell'induzione della germinazione in tale specie. Al contrario, nel caso di *L. azorica* la maggiore percentuale di germinazione è stata ottenuta associando il pretrattamento con gibberelline a 60 giorni di stratificazione (72%).

Specie a dormienza molto profonda necessitano di pretrattamenti di lunga durata che sarebbero andati ben oltre i tempi concessi dal progetto, oppure di combinazioni di pretrattamenti meccanici-ormonali-chimici-termici che avrebbero necessitato di un ulteriore periodo di studio non disponibile (*Taxus baccata*, Zhiri *et al.*, 1994; Zarek, 2007; *Morella faya*, Walker, 1990, La Rosa, 1985; *Frangula azorica*).

Tutte le specie selezionate tra quelle caratterizzate da alti tassi germinativi per la successiva coltivazione indoor (*Corylus avellana* L., *Fraxinus excelsior* L., *Platanus orientalis* L., *Quercus suber* L.) hanno mostrato un buon accrescimento sotto lampade artificiali, senza sviluppare sintomi di stress, fatta eccezione per il *P. orientalis* (di cui si tratterà in dettaglio più avanti nel testo).

|                   | Blu        | Giallo-verde | Rosso vicino | Rosso lontano |
|-------------------|------------|--------------|--------------|---------------|
|                   | 400-500 nm | 500-600 nm   | 600-700 nm   | 700-800 nm    |
| <b>AP673L</b>     | 11.9 %     | 19.3 %       | 60.5 %       | 8.3 %         |
| <b>AP67 bars</b>  | 13.8 %     | 15.1 %       | 53 %         | 18.1 %        |
| <b>G2</b>         | 7.7 %      | 2.4 %        | 64.4 %       | 25.5 %        |
| <b>NS1</b>        | 20.2 %     | 38.9 %       | 35.7 %       | 5.2 %         |
| <b>AP67 tubes</b> | 10.5 %     | 26.2 %       | 48.9 %       | 14.4 %        |
| <b>Fluora</b>     | 34.8 %     | 24.1 %       | 36.7 %       | 4.4 %         |

In particolare le performance di crescita si sono rivelate significativamente migliori sotto spettri LED che sotto lampade tradizionali a fluorescenza.

Prendendo dunque in considerazione lo spettro FLUORA come spettro di controllo, è possibile analizzare i singoli parametri presi in considerazione nel corso del mese di coltivazione indoor e valutare quali di essi siano maggiormente e positivamente influenzati dagli innovativi spettri LED della ditta Valoya®:

- Altezza dello stelo: fatta eccezione per il nocciolo, che non ha mostrato differenze significative tra i differenti spettri LED né tra LED e lampade a fluorescenza, le altre tre specie testate hanno mostrato maggiori accrescimenti sotto lampade LED. Nel caso del frassino, lo spettro FLUORA ha portato allo sviluppo di semenzali di dimensioni significativamente inferiori rispetto a tutti gli spettri LED, tra i quali invece non sono state rilevate differenze significative; nel caso del platano, soltanto gli spettri AP673L e AP67 tubes hanno mostrato un accrescimento significativamente superiore alla fluorescenza, così come per la sughera nel caso di AP673L e AP67 bars.
- Diametro dello stelo: anche relativamente a questo parametro, il nocciolo non ha mostrato differenze significative tra i 6 spettri. Il frassino ha mostrato accrescimenti diametrici significativamente maggiori rispetto alla fluorescenza sotto tutti gli spettri LED eccetto AP67 bars. Tale spettro ha mostrato il medesimo

comportamento nel caso della sughera, al contrario del platano che invece sotto AP67 bars ha raggiunto valori diametrici significativamente superiori a tutti gli spettri LED e a fluorescenza.

- Rapporto di snellezza: il nocciolo ha mostrato un rapporto di snellezza significativamente superiore a quello ottenuto sotto fluorescenza soltanto sotto AP67 tubes. Nel caso del platano, AP67 tubes si è confermato quale spettro promovente l'accrescimento di semenzali esili e filati, assieme a AP673L. Nel caso del frassino, lo spettro AP67 bars ha portato allo sviluppo di semenzali significativamente più snelli rispetto a quelli cresciuti sotto fluorescenza, G2 significativamente inferiori. AP67 bars è stato associato a valori significativamente superiori rispetto a FLUORA anche nel caso della sughera, assieme a AP673L.
- Numero di foglie: il nocciolo e il platano non hanno mostrato differenze significative tra gli spettri in relazione a tale parametro. Il frassino, a differenza della sughera, ha mostrato un significativo incremento nel numero di foglie sotto lampade a fluorescenza rispetto che sotto LED. Nel caso specifico della sughera, tutti gli spettri AP67 (3L, tubes e bars) hanno mostrato valori significativamente superiori a quelli ottenuti sotto fluorescenza.
- Peso fresco dello stelo: nel caso del frassino tale parametro non ha mostrato differenze significative tra i diversi spettri. Per quanto concerne il nocciolo, tutti gli spettri LED hanno mostrato valori significativamente superiori a quelli rilevati sotto FLUORA. AP673L e AP67 bars sono stati associati a valori significativamente superiori rispetto alla fluorescenza sia nel caso del platano che della sughera.
- Peso secco dello stelo: sia il nocciolo che il frassino non hanno mostrato differenze significative in relazione a tale parametro. Nel caso del platano, gli spettri NS1 e G2 hanno mostrato valori significativamente inferiori alla fluorescenza. Nel caso della sughera, tutti gli spettri LED hanno evidenziato un maggiore sviluppo in biomassa rispetto a FLUORA e tra di essi AP673L ha condotto ai valori più elevati.
- Peso fresco delle radici: il nocciolo ha mostrato valori significativamente più elevati in termini di biomassa radicale sotto lo spettro AP67 bars rispetto a FLUORA. Il frassino ha mostrato valori significativamente inferiori rispetto alla fluorescenza sotto spettri NS1, AP673L e AP67 bars. NS1 si è invece rivelato in grado di promuovere l'accrescimento radicale del platano, mostrando valori significativamente superiori rispetto a FLUORA, insieme a G2. Nel caso della

sughera AP67 bars si è distinto quale unico spettro dai valori significativamente superiori rispetto alla fluorescenza.

- Peso secco delle radici: il nocciolo non ha mostrato differenze significative tra LED e fluorescenza, al contrario delle altre specie. Il frassino ha mostrato un effetto negativo da parte di NS1 e AP67 bars, al contrario del platano che invece ha mostrato valori significativamente superiori rispetto alla fluorescenza sotto NS1, AP67 tubes e G2. Questi ultimi due spettri hanno portato a valori di biomassa radicale significativamente superiori anche nel caso della sughera, assieme a AP673L.
- Peso fresco delle foglie: nocciolo e frassino non hanno mostrato differenze significative tra gli spettri. Nel caso del platano tutti gli spettri LED hanno favorito lo sviluppo in biomassa delle foglie rispetto alla fluorescenza, senza significative differenze tra di essi, al contrario della sughera che ha evidenziato valori significativamente superiori alla fluorescenza solo sotto G2, AP673L, AP67 bars e AP67 tubes.
- Peso secco delle foglie: anche in relazione a tale parametro, nocciolo e frassino non hanno mostrato differenze significative tra gli spettri. Il platano ha mostrato un comportamento sovrapponibile a quello descritto per il peso fresco delle foglie mentre la sughera ha mostrato valori significativamente superiori alla fluorescenza sotto AP673L e AP67B.
- Area fogliare media: il nocciolo non ha mostrato differenze significative in relazione a tale parametro. Per quanto riguarda il frassino, gli spettri NS1, AP673L, AP67 tubes e G2 sono risultati associati a valori significativamente inferiori rispetto alla fluorescenza, al contrario di AP67 bars che si è invece distinto per gli alti valori di area fogliare raggiunti. L'associazione tra NS1, AP673L, G2 e aree fogliari limitate trova conferma anche nell'analisi dei dati del platano. La sughera ha raggiunto invece valori significativamente superiori sotto tutti i LED (senza differenze tra i vari spettri) rispetto alla fluorescenza.
- Area fogliare totale: il frassino non ha mostrato differenze significative tra gli spettri in relazione a tale parametro. AP673L e AP67 bars hanno mostrato un comportamento duplice, con valori significativamente inferiori alla fluorescenza nel caso del nocciolo e superiori nel caso della sughera. Il platano ha mostrato valori significativamente inferiori a quelli ottenuti sotto FLUORA nel caso degli spettri NS1, AP673L, AP67 tubes e G2.

- Stomi: le uniche differenze significative tra LED e lampade a fluorescenza, in relazione al numero assoluto di stomi per foglia e alla densità stomatica relativa, sono state riscontrate nel caso del platano. Relativamente al numero assoluto di stomi, AP67 bars si è distinto per i valori significativamente superiori alla fluorescenza. In termini di densità stomatica relativa, AP67 bars e AP67 tubes hanno evidenziato valori significativamente superiori.

La conclusione più evidente che si evince dall'analisi dei risultati è che non sia possibile definire uno spettro migliore rispetto agli altri, in relazione al singolo parametro considerato.

Prendendo infatti in considerazione una singola fonte luminosa, essa appare promuovere o deprimere un determinato parametro, in funzione della specie considerata.

Una premessa necessaria all'analisi dei risultati ottenuti è che gli spettri LED testati siano stati ideati dall'azienda Valoya allo scopo di coltivare specie agrarie potenziandone l'accrescimento in termini di biomassa. Nello specifico, le composizioni degli spettri AP67 (bars e tubes) e AP673L sono state programmate allo scopo di favorire la crescita vegetativa delle piante, mentre G2, caratterizzato da un elevato grado di rosso vicino e lontano, a discapito delle restanti lunghezze d'onda, è stato studiato per promuovere i processi germinativi, incrementando l'efficacia dei processi di vernalizzazione. NS1 invece, è stato creato per essere utilizzato nel campo della ricerca, per analizzare le reazioni delle specie vegetali ad uno spettro maggiormente simile al reale spettro solare (in virtù di elevate percentuali di luce gialla e verde) rispetto ai restanti spettri Valoya. In realtà, andando a confrontare la composizione percentuale delle lampade Valoya con quelle dello spettro solare, è possibile notare come la percentuale di verde di NS1 sia decisamente superiore a quella naturale (40% contro 13%). Lo stesso si dica per la percentuale di blu (20% contro 13%) e di rosso (36% contro 18%). Al contrario del rosso lontano che mostra una percentuale più bassa rispetto a quella presente in natura (5% contro 20%). Medesime considerazioni possono essere fatte per lo spettro FLUORA, che mostra il medesimo sbilanciamento di NS1 a confronto con lo spettro solare, con percentuali troppo elevate di blu, verde e rosso e significativa carenza di rosso lontano.

Lo spettro che maggiormente rispetta i rapporti tra lunghezze d'onda dello spettro solare reale risulta essere AP67 bars, che appare esclusivamente sbilanciato per quanto concerne il range della luce rossa, con una percentuale che è circa 3 volte quella presente nello spettro solare. Molto simili allo spettro AP67 bars risultano essere AP673L e AP67 tubes. AP673L mostra però una percentuale di rosso lontano che è circa la metà di quella presente nello spettro AP67 bars (e dunque circa la metà della percentuale presente anche nello spettro solare) mentre AP67 tubes mostra una percentuale di verde che è circa il doppio di quella presente in AP67 bars (e dunque doppia della percentuale presente nello spettro solare).

Lo spettro G2 è caratterizzato da una composizione totalmente differente dallo spettro solare, con basse percentuali di luce blu e verde e eccessivamente alte di rosso e rosso lontano.

Tutte le specie agrarie, coltivate in pieno campo senza ombreggiamento, dunque adattate alle medesime condizioni luminose, rispondono allo stesso modo ai differenti spettri senza distinzione di specie.

Per quanto concerne invece le specie forestali, adattate ad ambienti anche profondamente differenti tra loro in termini, non solo climatici, ma anche di luminosità (vari gradi di ombreggiamento), non sarebbe logico attendersi un comportamento univoco per ciascuno spettro testato, indipendentemente dalla specie in analisi.

In alcuni casi è stata evidenziata una similarità di risposte tra coppie di specie, consentendo la creazione di “gruppi di reazione”.

Ad esempio, frassino e sughera mostrano comportamenti simili in relazione all'accrescimento diametrico, che appare depresso sotto lo spettro AP67 bars.

Platano e nocciolo mostrano i più elevati rapporti di snellezza sotto AP67 tubes.

Nocciolo e sughera appaiono influenzate positivamente da AP67 bars in termini di biomassa radicale.

Platano e sughera mostrano un maggiore accrescimento, in termini di biomassa dello stelo, sotto AP673L e AP67 bars e in termini di biomassa radicale sotto AP67 tubes e G2.

Frassino e platano reagiscono in maniera simile a NS1, AP673L e G2 in termini di area fogliare, che appare fortemente limitata da questi spettri.

Confrontando i dati relativi alla specie *Q. suber* con altre specie mediterranee testate sotto le medesime fonti luminose dalla Dott.ssa Maria Raffaella Ortolani (dati non ancora pubblicati), è stato inoltre possibile constatare comportamenti simili tra tutte le specie, con accrescimenti significativamente maggiori sia in termini di dimensioni che di biomassa se cresciute sotto gli spettri AP673L e AP67 bars che, come precedentemente affermato, risultano essere gli spettri più simili in termini di percentuali cromatiche allo spettro della luce solare diretta.

Tale fenomeno potrebbe trovare una spiegazione nella corologia comune di tali specie. Per validare tale ipotesi sarebbe opportuno compiere ulteriori test su specie appartenenti al medesimo gruppo corologico.

L'elemento corologico o corotipo è un attributo caratteristico di ciascuna specie che ne esprime l'area di origine e l'attuale distribuzione sulla superficie terrestre. Generalmente i corotipi si basano sulle suddivisioni biogeografiche della terra. Pignatti (1994) riconosce 10 corotipi principali: Endemico, Stenomediterraneo, Eurimediterraneo, Mediterraneo-Montano, Eurasiatico, Atlantico, Orofita-S-Europeo, Circumboreale (Settentrionale s.l.), Ampia distribuzione (Cosmopolita s.l.).

Un areale, ovvero l'area geografica dove gli individui di una specie crescono spontaneamente, è caratterizzato da fattori ecologici tra cui il dominante è il macrofitoclina.

Il fitoclina rappresenta l'insieme dei fattori climatici che più influenza la distribuzione dei vegetali. Nello specifico con il termine macroclima si intende il clima di un bioma, ovvero un complesso di comunità vegetali e animali che, in una data zona geografica, hanno raggiunto una relativa stabilità in rapporto ai fattori ambientali dominanti. A livello regionale o sub-regionale si parla invece di mesoclina.

Le varie regioni macroclimatiche si differenziano per latitudine, distanza dagli oceani, posizione rispetto ai continenti (margine est o ovest), correnti marine, quota, ostacoli orografici, tutti fattori che vanno ad influenzare temperatura e precipitazioni. Su tale base, ad esempio, è possibile distinguere in Italia due regioni macroclimatiche, quella mediterranea e quella temperata. In Europa è possibile identificarne 4: polare, boreale,

temperata e mediterranea. La regione polare è caratterizzata da temperature estive inferiori ai 10 °C, brevissima stagione di crescita vegetativa, suolo in profondità permanentemente gelato (vegetazione prevalente: tundra); la boreale da estati relativamente calde ma brevi, temperature invernali molto basse e massimo di precipitazioni in estate (vegetazione prevalente: taiga); la temperata da estati calde e lunghe, inverni marcati con temperature anche al di sotto degli 0°C) ma non prolungati e massimo di precipitazioni in estate (vegetazione prevalente: foresta decidua); la mediterranea da estati calde e aride (massimo di precipitazioni in inverno), inverni non marcati con temperature superiori agli 0°C (vegetazione prevalente: foresta/macchia sclerofillica) (Adams, 2007; Gerdol, 2008; Polunin e Walters, 1987).

In riferimento al fattore latitudinale, è noto che la differente inclinazione dei raggi solari apporti energia minore verso i poli, comportando dunque che per ogni grado di latitudine in più (ca. 110 km verso N) la temperatura media annua si abbassi di 0.4°C. Ma bisogna anche tener conto che la differente inclinazione dei raggi solari comporti, nelle differenti regioni macroclimatiche, differenze qualitative e quantitative dello spettro solare che raggiunge le piante.

L'atmosfera riduce più della metà l'energia solare e soltanto il 47% dell'energia totale raggiunge la superficie terrestre. La riduzione quantitativa dell'energia luminosa varia in maniera significativa in punti differenti della superficie terrestre e la latitudine si presenta quale fattore primario nel determinare la luce che raggiunge le chiome degli alberi in un determinato punto del globo. La regione tropicale, che si estende a basse latitudini (meno di 23° 27') viene raggiunta da un quantitativo di energia luminosa di gran lunga più alto rispetto alla media relativa all'intero pianeta. L'energia luminosa annuale totale è di circa 700-800 GJ/km<sup>2</sup>. A mezzogiorno il valore medio di PAR, ovvero della porzione di spettro utile alla fotosintesi, può raggiungere spesso valori di 1800-2200 micromoli/m<sup>2</sup>\*s, con picchi di 2600 micromoli/m<sup>2</sup>\*s. In assenza di copertura nuvolosa, il flusso fotonico giornaliero varia tra le 40 e le 50 moli/m<sup>2</sup>\*gg. La formazione di nuvole comporta una riduzione del 75% e oltre dell'intensità. Spostandosi in direzione dei poli, la disponibilità di luce diminuisce gradualmente. Le regioni polari, nel corso del periodo invernale, non ricevono luce.

Il fotoperiodo annuale e la lunghezza del giorno variano al variare della latitudine. Per esempio, la lunghezza del giorno in corrispondenza del solstizio d'inverno è di 12 ore

ad una latitudine di 23.5°S ma di ben 24 ore a 66.5°S. Al crescere della latitudine, le variazioni stagionali nella lunghezza del giorno incrementano significativamente, Il trend annuale o giornaliera di disponibilità luminosa può essere approssimato ad una curva:

$$I_t = I_{\max} \sin(\pi t/N)$$

Dove I sta per irradianza, t per ore dopo l'alba e N è la lunghezza del giorno espressa in ore.

In sintesi, la massima attenuazione della radiazione solare avviene alle alte latitudini, dove è più lungo il cammino attraverso l'atmosfera (spessore ottico), mentre l'attenuazione è minima nelle regioni intertropicali.

Inoltre l'esposizione ha una considerevole influenza sul quantitativo di luce incidente. Per esempio, nell'emisfero Nord, un punto esposto a sud riceve più luce di uno esposto a nord.

L'atmosfera inoltre va a modificare la qualità della luce solare, permettendo il passaggio della luce compresa tra i 300 e i 1500 nm e apparendo sostanzialmente trasparente alla luce visibile. L'assorbimento maggiore da parte dei gas atmosferici avviene in corrispondenza di lunghezze d'onda più corte (l'ozono assorbe gran parte dei raggi UV) più lunghe (H<sub>2</sub>O e CO<sub>2</sub> assorbono soprattutto la luce infrarossa) (Prasad, 1997).

Nonostante la latitudine non comporti di per sé modifiche nello spettro solare che raggiunge un certo punto privo di copertura vegetale e in condizioni di cielo terso, la differente quantità di luce che raggiunge un singolo punto determina, una volta che questa vada ad attraversare una volta arborea (così come in condizioni di nuvolosità) il quantitativo netto di luce fotosintetica che si rende disponibile per i semenzali posti all'ombra delle piante madri. Ne deriva che foreste più dense mostreranno differenze non solo quantitative ma anche qualitative più intense rispetto alla luce incidente a livello della chioma degli alberi, con abbattimento notevole della frazione PAR dello spettro (300-800 nm). L'attenuazione progressiva dello spettro luminoso che attraversi una chioma può essere graficamente rappresentata da curve di attenuazione.

La distribuzione della densità fogliare e l'orientamento delle foglie incidono sensibilmente il grado di attenuazione della luce solare che attraversa le chiome degli alberi. La volta arborea di un bosco non si presenta generalmente compatta come se fosse costituita da una serie di fogli solidi ma le foglie, impilate in maniera blanda, hanno la possibilità di assorbire in maniera efficiente la maggior parte della luce incidente. In particolare, le foglie più in cima tendono ad assorbire la massima parte della radiazione solare mentre le foglie disposte ai livelli più bassi ricevono una radiazione di intensità ridotta e modificata in termini qualitativi, grazie all'assorbimento selettivo di alcune lunghezze d'onda da parte dei pigmenti fogliari.

Pertanto il quantitativo di luce fotosintetica intercettata da una foglia di solito dipende dalla posizione di quest'ultima all'interno della chioma e dall'angolo di incidenza della luce solare. Le foglie all'interno della volta arborea sono generalmente soggette a tre tipi di radiazioni: fasci di luce, luce riflessa e luce trasmessa. I fasci di luce penetrano attraverso le interruzioni della chioma da movimenti istantanei delle foglie causati dal vento o dalla distribuzione sparsa delle foglie che vanno a costituire interruzioni in maniera naturale. Nell'attraversare la chioma, i fasci di luce vengono generalmente intrappolati man mano che attraversano i diversi strati fogliati e, a seconda dell'architettura della volta, possono raggiungere anche gli strati più inferiori, generando i cosiddetti "sunflecks" (letteralmente, fiocchi, spot o picchi di luce in zone temporaneamente illuminate).

Questi pacchetti di alta intensità luminosa non sono generalmente stabili ma cambiano posizione in maniera dinamica, a causa dei movimenti dei rami e del cambiamento dell'inclinazione dei raggi solari. La loro durata può variare tra meno di un secondo e qualche minuto. A livello di intensità si possono distinguere sunflecks di piccole dimensioni, che trasportano un quantitativo di energia decisamente inferiore alla luce solare diretta a causa di effetti di penombra e di grandi dimensioni, con intensità paragonabili alla luce diretta. Le foglie generalmente trasmettono soltanto una piccola percentuale della PAR incidente, nella regione del verde (attorno a 550 nm) mentre si mostrano opache nei confronti del restante spettro visibile.

La trasmittanza della PAR è normalmente minore del 10% mentre quella del rosso lontano è notevole. Tale alterazione spettrale va ad influenzare il fotoequilibrio dei fitocromi e permette alle piante di percepire l'ombreggiamento da parte di altre piante e

adattare a tale condizione le proprie attività fotomorfogeniche. Inoltre, come ogni superficie biologica, le foglie non solo assorbono e trasmettono la luce ma la riflettono in parte. La percentuale di riflessione dipende dalla morfologia e dalle proprietà fisiche delle foglie come la forma, lo spessore, la lucentezza della cuticola. Ad ogni modo, la luce riflessa da una foglia può venire assorbita o trasmessa dalle foglie degli strati inferiori (Matloobi, 2012).

Dal momento che ogni specie mostra caratteristiche peculiari in termini di morfologia fogliare, è possibile non solo costruire curve di attenuazione relative a differenti tipologie forestali, come ad esempio per le foreste boreali, temperate, tropicali etc. (Lowman, 1986; Canham *et al.*, 1990; Lieffers *et al.*, 1999; Montgomery, 2004; Hart e Chen, 2006) ma anche specie specifiche (Solangaarachchi e Harper, 1987, Dengel *et al.*, 2015).

Specie appartenenti al medesimo corotipo mostrano tra loro minori differenze in termini quali-quantitativi di luce solare che raggiunga il suolo (irradiando la rinnovazione naturale) rispetto a specie afferenti a diversi corotipi.

Tale motivazione potrebbe essere dunque alla base della evidente presenza di “gruppi di reazione” sotto i differenti spettri LED testati, caratterizzati da similitudini corologiche.

Per quanto concerne la difficoltà di associazione tra un particolare spettro artificiale e un certo parametro di crescita (morfometrico, microscopico o biochimico), essa è dovuta al fatto che le lampade LED di nuova generazione, a differenza delle tradizionali fonti LED bicromatiche (a barra, a UFO o a strip, ma in ogni caso costituite da un mix di singoli LED blu e rossi) generano uno spettro continuo tra gli 800 e i 1100 nm. Diventa dunque complesso riconoscere quale lunghezza d’onda o range di lunghezze d’onda vadano ad influire in maniera preponderante su un certo parametro. Le lunghezze d’onda possono difatti mostrare effetti di cooperazione o antagonismo, la cui somma algebrica va a determinare la risposta biologica nell’individuo vegetale.

Molteplici sono difatti gli studi finalizzati alla valutazione degli effetti delle singole lunghezze d’onda sul metabolismo vegetale, in particolare dei valori di rosso e blu intercettati dalla clorofilla e dunque in grado di stimolare la fotosintesi clorofilliana,

mentre gli studi sugli effetti di spettri complessi sulla biologia delle piante sono molto rari.

I primi scienziati a suggerire l'utilizzo dei LED per la coltivazione delle piante furono Bula *et al.* (1991) presso l'Università del Wisconsin. In particolare essi dimostrarono che la lattuga coltivata sotto LED rossi ed un supplemento di luce fluorescente blu (in quanto all'epoca i LED blu ancora non erano vastamente disponibili) desse risultati equivalenti alla coltivazione sotto lampade fluorescenti di tipo bianco freddo (coolwhite). L'evidenza della possibilità di sostituire i LED, caratterizzati da notevoli vantaggi economici ed energetici, alle tradizionali lampade a fluorescenza, ha accelerato l'evoluzione dei LED, arrivando già nel 1996 (Yanagi *et al.*) a poter confrontare gli effetti dei singoli LED rossi e blu sui tassi di attività fotosintetica delle fragole. In particolare, in tal caso, è stato evidenziato un aumento di attività sotto LED rossi piuttosto che blu.

Allo stesso modo, Poudel *et al.* (2008) hanno confrontato gli effetti dei LED rossi e blu sull'accrescimento dell'uva, evidenziando un significativo incremento nell'altezza dei semenzali sotto LED rossi, in virtù di uno stelo più lungo e con internodi più estesi rispetto ai semenzali cresciuti sotto LED blu, così come un forte effetto promotore sull'accrescimento radicale. Al contrario, alla luce blu è stato attribuito un effetto positivo sul contenuto di clorofilla, sul numero di foglie e sul numero di stomi.

Wang *et al.* (2007) hanno sperimentato anche la crescita algale (*Spirulina platensis*) sotto le due tipologie tradizionali di LED, dimostrando che il maggior tasso di crescita della specie sia indotto da luce rossa.

Diversi studi hanno dimostrato anche la capacità della luce rossa di modulare il valore nutrizionale degli ortaggi. Urbanoviciuté *et al.* (2008) hanno infatti evidenziato come in ortaggi verdi la luce rossa possa incrementare la quantità di carboidrati nelle foglie in alcune specie (lattuga, foglie di cipolla e maggiorana) e diminuirli in altre (orzo e grano germogliati e aneto). Anche per la concentrazione di nitrati la luce rossa ha mostrato effetti specie-specifici: una riduzione in lattuga e maggiorana e un incremento in basilico, aneto e grano germogliato.

Nel 2004, Matsuda ha dimostrato come la coltivazione di piante sotto un mix di LED blu (470 nm) e rossi (660 nm) potesse risultare vantaggiosa rispetto alla coltivazione sotto tradizionali lampade a fluorescenza o LED monocromatici.

Samuolienė *et al.* (2011) hanno confermato tale assunto, dimostrando che il radichchio sia in grado di crescere anche esclusivamente sotto luce rossa ma che la luce blu sia necessaria per la distribuzione di carboidrati con funzione non strutturale tra organi di riserva e foglie, determinando l'ispessimento dell'ipocotile.

Al contrario, Martineau *et al.* (2012) non hanno riscontrato differenze in termini di biomassa coltivando la lattuga sotto tradizionali lampade HPS e un mix di LED blu e rossi assemblati a costituire un array (TI-SL600 array costituito da LEDs Philips Luxeon da 640 nm, 450nm e coolwhite; LED Edison Opto da 400 e 735nm).

La quantità esatta di blu da aggiungere alla luce rossa nella coltivazione delle piante è ancora in corso di dibattito, in quanto si tratta di una luce con importanti ruoli fotomorfogenici, incluso il controllo stomatico, l'allungamento dello stelo e il fototropismo.

Un effetto importante della luce blu su specie erbacee (*Arabidopsis thaliana*) è risultato anche essere quello di ridurre il tempo di fioritura e produzione dei semi, di circa metà del tempo necessario in condizioni naturali (Goins *et al.*, 1998).

Kopsell e Sams (2013) hanno mostrato come la luce blu abbia un forte impatto sul metabolismo secondario. Nello specifico è stato rilevato un incremento nella concentrazione di beta carotene e violaxantina nei tessuti dello stelo dei broccoli. Notevole è risultato anche essere l'effetto che l'illuminazione con led blu può avere nella fase post raccolta di tali vegetali, con un significativo incremento di carotenoidi, minerali (K, Mg, Fe) e glucosinolati.

Schuerger *et al.* (1997) hanno dimostrato inoltre la correlazione tra luce blu, spessore fogliare e numero di cloroplasti per cellula, parametri indipendenti dal rosso così come dal rapporto rosso vicino: rosso lontano (RED:FAR RED ratio). Nello specifico, il blu è risultato indurre un aumento sia dello spessore della foglia che del numero di cloroplasti.

I LED blu hanno mostrato un'alta capacità di sviluppo dell'apparato radicale, conducendo ad un rapporto S/R (*shoot: root ratio*) molto basso, determinante per un ottimale attecchimento dei semenzali una volta trapiantati in campo. Radici vigorose supportano infatti la crescita della porzione epigea delle piante, contribuendo a rifornirla di acqua e minerali. Al contrario, semenzali con alto S/R non hanno grandi possibilità di accrescersi e sopravvivere. In un caso ciò può essere determinato dalla presenza di un apparato radicale esile e di un fusto robusto, pertanto le radici non sono in grado di fornire alla porzione epigea l'acqua sufficiente a mantenere un corretto grado di idratazione.

I LED blu sono anche associati allo sviluppo di foglie dalla limitata area fogliare ma con atteggiamento fototropico. Al contrario la luce rossa induce lo sviluppo di foglie di dimensioni superiori ma con atteggiamento fotofobico. Tale comportamento può risultare svantaggioso in termini di attività fotosintetica.

Li *et al.* (2013) hanno testato differenti rapporti di blu e rosso (3:1, 1:1, 1:3) su semenzali di colza, dimostrando come il rapporto 3:1 sia il migliore in termini di accrescimento. Altri studi hanno però evidenziato come tale rapporto sia specie specifico. Ad esempio, il cotone cresce in maniera ottimale con rapporto 1:1, la banana 4:1, il giglio 1:1, la fragola 3:7 e il crisantemo 1:1 (Nhut *et al.*, 2003a; Kim *et al.*, 2004; Li *et al.*, 2010; Lian *et al.*, 2002; Nhut *et al.*, 2003b). Addirittura Avercheva *et al.* (2008) hanno dimostrato che il cavolfiore cinese necessita, al contrario, di un rapporto 1:7. Inoltre il valore ottimale di luce blu per singola specie sembra variare anche in funzione dell'età della pianta (Cope e Bugbee, 2013).

Un risultato interessante degli studi di Li *et al.* (2013) è stata la dimostrazione di un'associazione tra rapporto tra luce rossa e blu ed accumulo di amido nei tessuti fogliari. La qualità della luce è infatti in grado di regolare il metabolismo dei carboidrati nelle piante superiori e la luce rossa induce un accumulo di amido delle foglie a causa di una inibizione della traslocazione dei prodotti fotosintetici al di fuori dalla foglia stessa. L'aggiunta di luce blu alla luce rossa consente di limitare tale problematica nel trasporto dei prodotti della fotosintesi.

Un altro effetto di bilanciamento da parte della luce blu sulla luce rossa è stato mostrato da Goins *et al.* (1998): foglie cresciute sotto LED rossi tendono a ripiegare i margini verso il basso ma l'aggiunta di luce blu può annullare tale effetto.

Johkan *et al.* (2010) hanno poi descritto gli effetti potenzianti della luce blu sull'accrescimento della lattuga in termini di biomassa sia epigea sia ipogea rispetto alla luce monocromatica rossa, ottenendo valori maggiori sia con led monocromatici blu sia con un mix di LED rossi e blu. Di contro, la luce blu è stata associata anche ad una soppressione nell'accrescimento delle foglie rispetto alla luce rossa. Nel medesimo studio è stato anche notato come però gli effetti della luce blu vengano ad essere di difficile interpretazione qualora questa rappresenti solo una percentuale di uno spettro complesso (nel caso specifico dei tubi a fluorescenza). Esistono difatti due tipologie di lampade a fluorescenza, quelle definite bianche con 10% di luce blu e quelle "blu" con 75% di luce blu e una serie di lunghezze d'onda accessorie (UV, verde, rosso vicino e lontano). Utilizzando la fluorescenza blu, nonostante in linea teorica una percentuale più elevata di blu sia associata a valori maggiori di biomassa, sono stati ottenuti invece valori di biomassa epigea molto bassa. Ciò può derivare da interferenza con le altre lunghezze d'onda o anche dal fatto che, essendo la banda del blu molto più estesa nella fluorescenza blu (400-500 nm) rispetto che nei LED monocromatici, probabilmente parte dei fotoni emessi non risultano essere biologicamente utili per la pianta.

Al di là dei LED monocromatici blu, anche i LED bianchi possiedono percentuali variabili di blu (warm, neutral e cool, rispettivamente con 11%, 19% e 28% di luce blu). Non essendo monocromatiche, tali fonti luminose emettono ulteriori lunghezze d'onda tra i 400 e gli 800 nm in percentuali differenti, dunque gli effetti finali della luce blu sul metabolismo e sulla crescita delle piante risultano essere più complessi da definire. Test effettuati su radicchio, grano e soia hanno dimostrato che la bassa percentuale di blu emessa dai LED warm white sia in grado di incrementare l'accrescimento dello stelo e l'espansione fogliare mentre l'alta percentuale caratteristica dei LED coolwhite determini lo sviluppo di piante più compatte (Cope e Bugbee, 2013).

Le lampade utilizzate in tale lavoro di tesi mostrano rapporti blu:rosso compresi tra 1:1 (FLUORA) e 1:9 (G2), con valori intermedi pari a 1:2 (NS1) 1:4 (AP67B), 1:5 (AP67T), 1:6 (AP673L). Al contrario dei dati presenti in letteratura per specie agrarie che associano il variare di tale rapporto all'allungamento dello stelo delle specie, non esistono differenze significative in termini di altezza dei semenzali, tra lampade a basso ed alto rapporto. Ad esempio, il nocciolo ha mostrato un effetto positivo su tale

parametro sia sotto lampada NS1 sia sotto G2, così come la sughera ha mostrato un accrescimento limitato sotto entrambe le lampade.

Grazie allo sviluppo di LED FAR RED, ovvero ad emissione di 880 nm e 935 nm è stato possibile analizzare anche gli effetti di tali lunghezze d'onda non fotosintetiche. Johnson *et al.* (1996) hanno effettuato, ad esempio, confronti tra semenzali cresciuti sotto LED FAR RED e semenzali cresciuti al buio, evidenziando nei primi un accrescimento più limitato in altezza ma un'emergenza delle foglie molto più rapida. Inoltre i semenzali cresciuti sotto luce FAR RED, hanno mostrato un gravitropismo fotone-dipendente, probabilmente legato al sistema dei fitocromi (Massa *et al.*, 2008).

Alcuni studi hanno anche preso in considerazione la luce verde, gialla o arancio ma in pochi casi è stato analizzato il comportamento risultante dalla sommatoria delle singole lunghezze d'onda.

I primi studi effettuati sulla luce verde sono scaturiti dall'evidenza che, per quanto si aumenti la percentuale di luce blu nella coltivazione di piante sotto luci rosse, i semenzali continuano a mostrare migliori accrescimenti sotto luce bianca a fluorescenza. Inoltre l'utilizzo di luce verde nelle camere di crescita è risultata utile per poter mettere a fuoco eventuali malattie o disturbi delle piante, difficili da evidenziare in una stanza illuminata da una luce rosata. I primi studi sono stati effettuati da Kim *et al.* (2004), aggiungendo un 5% di luce verde ai tradizionali array di LED blu e rossi. Non sono stati evidenziati nel corso di tale studio effetti della luce verde né sull'attività fotosintetica né in termini di biomassa ed area o numero di foglie. All'aumentare della percentuale di verde (24%) però è stato possibile notare i primi effetti: biomassa più elevata e maggiore area fogliare rispetto a semenzali cresciuti in condizioni monocromatiche (luce rosa o blu) o sotto fluorescenza.

Oltre il 50% di luce verde sono state però evidenziate conseguenze negative, con riduzioni significative nell'accrescimento dei semenzali.

La coltivazione in modalità RGB si è dunque dimostrata, al di sotto di una certa soglia di luce verde, più promettente della semplice RB.

Sulla lattuga la luce verde ha mostrato un effetto negativo in termini di accrescimento dello stelo e delle radici se comparata alla luce fluorescente, a basse intensità luminose (PPFD 100) mentre già a 200 PPFD è stato evidenziato un aumento nella crescita sia

ipogea che epigea, in particolare utilizzando come lunghezza d'onda specifica nella banda del verde i 510 nm (Johkan *et al.*, 2011).

La motivazione base dell'effetto positivo sull'accrescimento delle piante da parte della luce verde si può spiegare con la maggiore penetrazione del verde, in ambiente naturale, attraverso le chiome degli alberi rispetto al rosso e al blu che vengono invece intercettati.

In realtà, in letteratura i dati relativi all'effetto della luce verde sono controversi. Alcuni autori hanno evidenziato riduzioni nell'accrescimento, nel numero di foglie, nella lunghezza degli internodi ed un ritardo nella fioritura della calendula, del garofano e della lattuga (Klein *et al.*, 1965). Altri studi hanno dimostrato una evidente inibizione dello sviluppo del pomodoro in seguito a trapianto (Brazaitytė *et al.*, 2009a). Ciò dimostra la necessità di selezionare una fonte di illuminazione LED, con una definita composizione qualitativa, in maniera specie-specifica (Brazaitytė *et al.*, 2009b). Nel cetriolo sono stati riscontrati accrescimenti superiori in piante cresciute sotto led rossi e blu con supplemento di verde (520 nm).

Nel caso delle lampade utilizzate nel corso di questo studio, la percentuale massima di verde è rappresentata dal 39% dello spettro NS1. Tale spettro non ha mostrato capacità di accrescimento maggiore rispetto alla fluorescenza per nessuno dei parametri analizzati, indipendentemente dalla specie, fatta eccezione per un effetto di promozione dell'accrescimento radicale rilevato nella specie *P. orientalis*. Nel caso soprattutto del *F. excelsior* una elevata percentuale di luce verde è stata associata a valori significativamente inferiori rispetto sia a fluorescenza che agli altri spettri LED testati sia di biomassa radicale sia di area fogliare. Anche in questo caso è dunque evidente come ogni specie presenti delle necessità luminose differenti.

Anche per quanto concerne il supplemento di luce gialla e arancio sono presenti in letteratura dati controversi: in alcuni studi la luce gialla è stata associata ad effetti simili a quelli determinati da luce UV: stelo delicato, foglie piccole, biomassa ridotta. Altri autori invece hanno evidenziato un aumento dell'area fogliare (Mortensen e Stromme, 1987; Spaargaren, 2001) ma internodi più lunghi (Mortensen e Stromme, 1987). Dall'altra parte, la luce arancio ha mostrato nei cetrioli effetti similari alla luce verde, con un'accelerazione della crescita post trapianto. Secondo alcuni autori la luce arancio appare associata a internodi lunghi, alto peso secco dello stelo e incremento leggero

della concentrazione di clorofilla (Maas *et al.*, 1995). Altri invece la associano ad un accrescimento lento (Raab, 2003).

Tra gli spettri utilizzati nel lavoro di tesi, NS1, AP67 tubes e FLUORA mostrano i maggiori valori di luce giallo-arancio. In maniera concorde con Maas *et al.* (1995) nel caso del *P. orientalis* alte percentuali di tali lunghezze d'onda sono state associate a rapporti di snellezza maggiori rispetto alle altre fonti luminose. Inoltre, sempre nel caso del *P. orientalis*, sono stati associati positivamente ad alte percentuali di luce giallo-arancio anche il numero di foglie, la biomassa radicale e la densità stomatica; al contrario di quanto evidenziato da Mortensen e Stromme (1987) e Spaargaren (2001), sono state invece rilevate aree fogliari significativamente inferiori rispetto a spettri con minori percentuali di luce giallo-arancio.

Un altro parametro influenzato dalla qualità della luce (non analizzato nel lavoro di tesi) è risultato essere il tempo di fioritura e maturazione dei frutti, con effetto promotore da parte della luce verde e arancio. Al contrario, gli UV sono risultati associati ad un ritardo nella fioritura (Brazaytè, 2009,b).

Nel caso della salvia è stato dimostrato che luci monocromatiche (blu o rosse) inibiscono la formazione di gemme florali. Stesso effetto si ha con la fluorescenza con supplemento di FAR RED nella calendula (Heo *et al.*, 2002).

La difficoltà di valutare gli effetti di spettri continui deriva dunque dalla sovrapposizione degli effetti delle singole lunghezze d'onda, già controversi di per sé.

Bisogna ricordare infatti che le piante percepiscono, interpretano e trasducono i segnali luminosi per mezzo di fotorecettori fotomorfogenici: i fitocromi, i recettori della luce blu-UVA e i recettori dell'UVB. Quando un recettore lega il suo ligando specifico, che nel caso della luce sarà un quanto di una certa frequenza, esso scatena una o più vie di segnalazione intracellulari. Le vie di segnalazione coinvolgono perlopiù proteine di segnalazione, possono essere relativamente semplici ma più spesso, negli organismi superiori, sono complesse ed interconnesse tra loro, non hanno specifica direzionalità e possono essere lette sia dalla membrana plasmatica verso il citoplasma o il nucleo che viceversa. Le proteine non sono però gli unici attori di queste vie di segnalazione che spesso coinvolgono anche ioni inorganici, fosfolipidi, steroidi e loro derivati. Queste proteine infine fanno convergere la segnalazione a proteine effettrici, la cui

conformazione viene alterata mediante opportune reazioni chimiche che possono portare alla loro attivazione o inattivazione. Di queste proteine fanno parte ad esempio i canali ionici, proteine regolatrici di geni, enzimi, proteine strutturali del citoscheletro, recettori intracellulari. Tali proteine agiscono su altri bersagli scatenando la risposta finale a quella data via di segnalazione che può essere l'alterazione dell'espressione genica, l'alterazione del metabolismo di una o più sostanze, la creazione di complessi proteici, il movimento della cellula per azione sul citoscheletro.

Se nel medesimo tempo si ha un'attivazione di recettori da parte di ligandi di differente tipologia (nel caso della luce, di differenti lunghezze d'onda), le cascate trasduzionali attivate possono diventare molto più complesse di ciò che è ipotizzabile in presenza di un singolo segnale. Ci si potrebbe difatti trovare di fronte a fenomeni di interferenza o interazione. Nel primo caso, la risposta attesa come conseguenza del legame del ligando 1 al recettore 1 sarà disattesa, o totalmente annullata o modificata; nel secondo caso sarà amplificata.

I primi LED a spettro continuo non monocromatici testati sono stati i LED bianchi. La lattuga, ad esempio, ha mostrato un maggiore accrescimento in termini di biomassa fogliare e radicale, nonché in contenuto in zuccheri e nitrati, se cresciuta sotto led bianchi (con picchi nelle regioni del rosso e del blu più un supplemento di fotoni nel range 500-600 nm), paragonabile ai risultati ottenibili con lampade a fluorescenza, significativamente superiori ai risultati invece ottenibili con l'utilizzo esclusivo di LED monocromatici rossi e blu (Lin *et al.*, 2013).

Tutti i dati precedentemente elencati si riferiscono a studi effettuati su specie agrarie.

La letteratura corrente contiene difatti un ristretto numero di ricerche relative all'utilizzo di LED per la coltivazione di specie forestali. Studi preliminari sono stati effettuati su conifere nei vivai finlandesi, dimostrando che i LED (nello specifico lo spettro Valoya G2) conducano a risultati simili a quelli ottenibili con lampade HPS (Riikonen, 2013). I primi studi relativi a specie latifoglie forestali (*Quercus ilex*, *Fagus sylvatica*, *Prunus avium*) cresciute sotto LED a spettro continuo (AP67 bars, Valoya®) sono stati svolti da Astolfi *et al.* (2012). Data la complessità di analisi dei risultati ottenuti sotto simili fonti luminose, l'equipe di lavoro si è limitata ad effettuare un confronto tra l'accrescimento dei semenzali sotto AP67 bars e sotto tradizionali lampade a fluorescenza, senza indagare gli effetti delle singole lunghezze d'onda sui

parametri monitorati. Nello specifico, ciò che è stato notato in tali studi e che viene confermato dai risultati della presente tesi, è che la risposta delle piante alla qualità delle fonti luminose complesse sia specie-specifica. Ad esempio, il faggio ha mostrato i migliori risultati di crescita sotto LED, in termini di peso fresco e secco, altezza del fusto e area fogliare. Dall'altra parte invece, ciliegio e leccio hanno mostrato un'influenza positiva da parte dei LED solo sull'accrescimento in altezza ma non in termini di biomassa. La concentrazione di clorofilla addirittura è risultata inferiore sotto lampade LED rispetto che sotto fluorescenza, probabilmente a causa dell'alta percentuale di rosso. Nonostante tale carenza, l'attività fotosintetica è però risultata compatibile con quella rilevata sotto fluorescenza, grazie ad un'aumentata capacità dell'enzima RuBPC (ribuloso bifosfato carbossilasi). Un risultato positivo di tale studio è risultato essere il minor grado di stress cui vengono esposti i semenzali in fase di crescita indoor sotto le innovative lampade LED, correlato ad un minore accumulo di MDA (malondialdeide), prodotto finale della per ossidazione lipidica e pertanto considerata generalmente quale marker di stress ossidativo (Astolfi *et al.*, 2012).

Per quanto concerne l'altezza dei semenzali, i risultati di Astolfi *et al.* (2012) vengono confermati dai risultati ottenuti nel lavoro di tesi. Tutte le specie testate hanno difatti mostrato sotto luci LED accrescimenti significativamente maggiori o compatibili con quelli ottenuti sotto fluorescenza. In termini di biomassa i risultati sono di più complessa interpretazione. In termini di biomassa dello stelo, ad esempio, tutte le specie hanno mostrato valori superiori sotto LED rispetto alla fluorescenza. Per quanto concerne la biomassa radicale, il frassino ha mostrato valori inferiori sotto gli spettri NS1 e AP67 bars. In relazione all'area fogliare, nel caso di frassino, platano e nocciolo, sono stati rilevati valori inferiori sotto la maggior parte degli spettri LED rispetto alla fluorescenza, al contrario di quanto osservato per il faggio da Astolfi *et al.* (2012).

I dati riscontrabili in letteratura, seppur riferiti a specie agrarie, dimostrano che piante coltivate indoor sotto differenti fonti luminose, una volta trapiantate in serra, mostrino dopo poco tempo (4 settimane) una omogeneità nell'accrescimento che esclude dunque effetti persistenti indotti dall'esposizione a qualità luminose differenti, fatta eccezione, nel caso del cetriolo, per il numero di foglie che è risultato essere più elevato in caso di piante cresciute con supplemento di verde e arancio (Brazaytité, 2009,b). Per quanto riguarda semenzali di pomodoro si è notata la scomparsa degli effetti dei LED sull'accrescimento e lo sviluppo dopo 1 mese dal trapianto in serra, mentre gli effetti

sui pigmenti fotosintetici mostrano una durata minore, di circa 2 settimane. In termini di raccolto, le differenti fonti luminose non sembrano apportare differenze significative anche se il supplemento di luce gialla è risultato indurre un decremento nella produzione di pomodori (Brazaytì, 2009,a).

Le specie forestali testate nel lavoro di tesi, una volta trapiantate in serra hanno mostrato i seguenti comportamenti:

- *Corylus avellana* L.: i semenzali precedentemente cresciuti sotto NS1, AP67 bars e AP67 tubes hanno mostrato accrescimenti significativamente maggiori rispetto alla luce a fluorescenza.
- *Fraxinus exelsior* L.: G2 si è distinto in maniera significativa dagli altri spettri, determinando accrescimenti maggiori nei semenzali sia in termini di altezza che di biomassa.
- *Quercus suber* L.: in accordo con i dati bibliografici, la specie non ha mostrato il persistere di effetti spettro-dipendenti in seguito al trasferimento in serra. Per tutti i parametri in analisi non sono state difatti evidenziate differenze significative tra le diverse fonti luminose.

La presenza di presunti effetti persistenti delle lampade LED su alcuni parametri (nel caso del nocciolo e del frassino) potrebbe essere in realtà una casualità indotta dall'alta biodiversità dei campioni, legata all'utilizzo di seme non selezionato ma raccolto in bosco. In tal senso, la selezione random anche di due campioni all'interno del medesimo vassoio, può condurre a medie profondamente diverse con ampie deviazioni standard, qualunque sia la numerosità campionaria considerata. Allo stesso modo, la selezione non randomica di campioni (es. selezione dei semenzali più alti) può condurre ad errori di valutazione degli effetti medi delle lampade sulla specie considerata. Gli studi presenti in letteratura si riferiscono invece esclusivamente a specie agrarie coltivate a partire da semi di varietà selezionate che danno luogo dunque a semenzali omogenei, quasi clonali. È dunque da ritenersi attendibile la conclusione di Brazaytì *et al.* (2009 a;b) della perdita di effetti indotti dalle luci artificiali sulla crescita e sul metabolismo dei semenzali in breve tempo dopo il trasferimento sotto luce naturale. L'assenza di differenze significative in termini di altezza dei semenzali rilevate a un anno dall'impianto in campo aperto di nocciolo e sughera, conferma tale ipotesi. Se dunque può risultare abbastanza semplice

selezionare una lampada più idonea rispetto ad altre per la promozione dello sviluppo di un certo parametro per specie agrarie (es. altezza, numero di frutti, biomassa, contenuto in antociani etc.), che una volta terminato il ciclo di crescita indoor sono pronte al consumo, diventa quasi impossibile svolgere un'azione simile per specie forestali che, per quanto mostrino differenze significative per un determinato parametro, indotte da un certo spettro, al termine del ciclo di crescita indoor, si adattano in modo più o meno rapido alla luce solare perdendo tali differenze e manifestando una omogeneità nelle modalità di accrescimento e nel metabolismo.

Un parametro da prendere in considerazione per la selezione degli spettri più idonei alla coltivazione di una specifica specie è risultato essere il tasso di sopravvivenza dei semenzali dopo il definitivo impianto in campo aperto. Nonostante difatti l'assenza di differenze significative in termini morfometrici, i semenzali di sughera e ancor più di nocciolo, hanno mostrato percentuali di sopravvivenza diverse in relazione agli spettri usati per la loro pre-coltivazione. Si è evidenziato una specie-specificità del parametro, con i valori maggiori di sopravvivenza associati agli spettri AP67-3L e AP67 BARs nel caso del nocciolo e AP67 TUBEs nel caso della sughera.

Nel caso dell'identificazione di più di uno spettro idoneo, la selezione deve necessariamente essere effettuata su base energetica, ovvero allo scopo di scegliere la lampada che abbia un consumo minore, durata maggiore ed emetta meno calore, preferendo in primo luogo i LED alle lampade a fluorescenza e tra i LED quelli poveri in infrarosso o ad esempio identificando le lampade meno nocive per l'uomo (povere in UV e ad emissione bianca, in quanto le lampade rosate tendono a generare stanchezza e confusione nell'osservatore).

La seconda parte della tesi, finalizzata allo studio delle condizioni luminose di accrescimento dei semenzali di due specie tradizionalmente riconosciute come eliofile (*Platanus orientalis* L. e *Quercus suber* L.) in boschi naturali, ha condotto ad interessanti risultati.

Il confronto tra punti caratterizzati da presenza o assenza di rinnovazione in un plataneto siciliano ha evidenziato come l'andamento dell'intensità luminosa nel corso della giornata, in virtù dell'omogeneità della copertura delle chiome, sia il medesimo per le due categorie di punti considerate. Dunque, la definizione classica di eliofilia di una specie, quale caratteristica delle piante che prosperano solo alla luce diretta del sole, poco si addice allo stadio di semenzale del platano orientale che si accresce,

invece, in una condizione alternante di luce e ombra nel corso della giornata. La sciafilia, o tolleranza all'ombra, è definita come abilità di una pianta di sopravvivere e massimizzare l'assimilazione del carbonio all'ombra della copertura arborea di un bosco. L'importanza della sciafilia nella rigenerazione e crescita delle specie forestali è stata ampiamente riconosciuta ma residuano alcune specie, come per l'appunto il platano orientale e la quercia da sughero, i cui comportamenti non sono ancora stati ben definiti. Ad esempio, del platano orientale è noto che cresca in boschi radi, in pianura e sui pendii collinari umidi. Tale comportamento, tipico di una specie eliofila, è ovviamente da riferirsi alle piante adulte, non ai semenzali che crescono all'ombra di queste ultime. In letteratura non sono presenti studi volti ad analizzare le condizioni luminose al di sotto della chioma di un plataneto e lo studio effettuato in questa tesi è dunque da considerarsi pioniero. Conoscere il grado di tolleranza all'ombra di una specie risulta essere un elemento importante per la silvicoltura, per prevedere le modalità di accrescimento e sopravvivenza delle plantule in determinate condizioni ambientali. Nel campo della coltivazione indoor tali conoscenze risultano importanti per prevedere eventuali stress che potrebbero ad esempio determinarsi in caso di utilizzo di intensità luminose troppo basse rispetto alle necessità di una specifica specie (Cardillo e Bernal, 2006).

Medesima situazione è stata evidenziata nel sottobosco di una sughereta laziale, prendendo in considerazione punti esposti a luce solare diretta o all'ombra alle ore 12 ed analizzandone il grado di illuminazione nel corso delle ore del giorno. Anche i semenzali di sughera dunque si accrescono in condizioni alternate di luce ed ombra. Ciò determina la possibilità di coltivare tali specie in ambiente artificiale anche ad intensità basse (come nel caso del progetto Zephyr in cui si è scelto di utilizzare una intensità di 100 PPFD) senza indurre stress con conseguente inibizione dell'accrescimento dei semenzali.

Nel 1938, González-Vázquez classificò la quercia da sughero come specie leggermente intollerante all'ombra ma non fornì i criteri alla base di tale classificazione. Eppure, in maniera simile al leccio e ad alcune querce californiane, la rigenerazione della quercia da sughero è ritenuta più efficiente in aree ombreggiate dalle piante madri adulte piuttosto che in aree aperte. Soltanto al di sotto di una intensità pari al 5% della luce solare diretta iniziano a manifestarsi cambiamenti significativi nell'accrescimento dell'apparato radicale così come in termini di altezza e

biomassa dello stelo. La specie mostra una risposta dinamica al variare delle condizioni luminose, mostrandosi più tollerante all'ombreggiamento in primavera piuttosto che in estate. Inoltre è stato dimostrato che al di sopra del 20% di luce solare diretta non vi siano cambiamenti significativi nelle modalità di accrescimento all'aumentare della percentuale di illuminazione, in quanto è in corrispondenza di tale 20% che si raggiunge il punto di saturazione luminosa (Cardillo e Bernal, 2006).

L'analisi qualitativa dello spettro luminoso cui può essere esposto un semenzale di platano o sughera in punti ombreggiati o esposti a luce diretta, ha mostrato non solo differenze significative tra le due condizioni luminose, ma anche tra le due specie a parità di esposizione.

Per quanto riguarda il plataneto, all'ombra della volta arborea è stata rilevata una significativa diminuzione percentuale del range di lunghezze d'onda corrispondenti a luce blu, verde-giallo-arancio e rossa, in particolare la percentuale luce rossa è apparsa profondamente diminuita. Al contrario, il range del rosso lontano è apparso sensibilmente incrementato in termini percentuali.

Nel caso della sughereta, nei punti ombreggiati è stata rilevata una diminuzione percentuale di luce blu con incremento invece della percentuale di luce verde-giallo-arancio, rosso vicino e rosso lontano.

Le differenze qualitative rilevate all'ombra della volta arborea tra i due boschi sono probabilmente da attribuire alla differente morfologia fogliare delle due specie (dimensioni, spessore, motilità in risposta al vento, cuticola, concentrazione di pigmenti fogliari) che determina, come precedentemente affermato, differenti modalità di attenuazione della luce solare incidente sulla volta arborea. Le foglie di platano sono caratterizzate da dimensioni superiori e spessore inferiore rispetto alle foglie di sughera e dalla quasi totale assenza di pigmenti accessori appartenenti alla classe degli antociani (esse appaiono difatti di un colore verde chiaro che vira in autunno al giallo oro, a causa della degradazione delle clorofilla con conseguenziale esposizione dei carotenoidi). Le clorofille associate ai carotenoidi comportano l'assorbimento di fotoni di luce blu e luce rossa (clorofilla) e blu-verde (carotenoidi) mentre la luce verde viene totalmente riflessa. La vasta area superficiale delle foglie e l'intenso movimento in risposta anche a venti di lievi entità, collaborano probabilmente al determinare una intensa riflessione dei raggi di luce verde piuttosto che una loro trasmissione ai livelli inferiori della volta arborea.

Nel caso della sughera, al contrario, la presenza in contemporanea di pigmenti appartenenti alla classe delle clorofilla, carotenoidi e antociani, comporta l'assorbimento non solo di luce rossa e blu ma anche di quella verde, da parte degli antociani. Inoltre, le più limitate dimensioni delle foglie e la maggiore stabilità in risposta al vento, è verosimile che consentano una più facile trasmissione della luce verde ai livelli inferiori della volta, attraverso gli spazi tra foglia e foglia.

Al di là delle differenze qualitative, punti ombreggiati o esposti a luce diretta si differenziano significativamente anche per la temperatura cui vengano esposti i semenzali.

Punti esposti a luce diretta nelle ore più calde del giorno (12-14) sono caratterizzati da un irraggiamento superiore rispetto a punti ombreggiati, associato dunque a più alti valori di luce infrarossa e, come conseguenza, a temperature più elevate. Dal momento che la fenologia di una pianta è determinata da tre principali fattori abiotici, che sono irraggiamento, temperatura e precipitazioni, come atteso sono state riscontrate, tra le due categorie di punti analizzate, significative differenze in termini di emergenza dell'apice caulinare e di ritmi di accrescimento vegetativo, con valori significativamente superiori in corrispondenza dei punti esposti a luce solare diretta nelle ore centrali del giorno. Per quanto concerne l'emergenza, valutata in fase tardo-primaverile (maggio), il valore percentuale più elevato riscontrato nelle gabbiette esposte a luce diretta alle ore 12 (G1-2-3) è da attribuirsi al fatto che in tali punti, circa il 20% delle ghiande germinate nella stagione autunnale sia andata incontro ad un'emergenza anticipata e circa il 50% ad un'emergenza primaverile. Nelle gabbiette ombreggiate l'emergenza anticipata è risultata essere invece significativamente inferiore (10%), mentre quella primaverile ha interessato, anche in questo caso, circa il 50% delle ghiande germinate. Dunque l'anticipazione della fase fenologica prima dei freddi estivi diventa determinante per lo sviluppo di un maggior numero di semenzali nelle gabbiette maggiormente illuminate rispetto a quelle poste in ombra.

Riguardo ai ritmi di accrescimento, sono stati rilevati valori significativamente più elevati sia in termini di altezza del fusto che di numero di foglie in corrispondenza delle gabbiette maggiormente illuminate, soprattutto a partire da maggio ovvero nella fase di incremento termico medio delle temperature stagionali.

La predominanza della temperatura quale fattore determinante i ritmi fenologici delle specie viventi è evidenziata dai numerosi studi effettuati al fine di valutare l'impatto del riscaldamento globale sulla fenologia delle specie. In concomitanza con un lento

incremento delle temperature medie annuali, si assiste infatti all'alterazione dei ritmi della natura. Temperature più miti favoriscono ad esempio l'anticipazione delle fasi di fioritura e fruttificazione così come avviene anche per i flussi degli uccelli migratori (Hughes, 2000; Chmielewski e Rotzer, 2001; Walther *et al.*, 2002; Menzel *et al.*, 2006; Parmesan, 2007; Körner e Baster, 2010; Way, 2011).

Una maggiore dipendenza della fenologia dalle condizioni termiche piuttosto che luminose è stata confermata dalla comparazione dei cicli vegetativi dei semenzali di sughera cresciuti in contemporanea in camera di crescita sotto lampade LED, in serra ed in bosco. Mentre in bosco a partire infatti dalla germinazione autunnale, le ghiande sono poi esposte al clima invernale che induce uno stato di quiescenza interrotto soltanto dall'innalzamento termico primaverile, che consente l'emergenza del germoglio (circa 80 giorni dopo la germinazione), in serra l'inverno appare meno rigido, dunque il tempo intercorrente tra germinazione ed emergenza può essere ridotto del 50%. In camera di crescita, la temperatura costante consente alle ghiande di germinare e procedere con la successiva fase fenologica dell'emergenza in circa 10 giorni. Allo stesso modo, mentre in bosco in seguito all'emergenza si assiste allo sviluppo vegetativo dei semenzali, interrotto dall'incremento termico estivo (stagione siccitosa) per poi riprendere al termine dell'estate, in serra i cicli vegetativi nel periodo estivo non vengono arrestati e dunque in corrispondenza del mese di settembre i semenzali possono aver affrontato fino a tre cicli vegetativi, con fasi di chiusura delle gemme dalla durata piuttosto limitata (20-30 giorni). In camera di crescita, la stabilità delle condizioni termiche conduce ad una riduzione progressiva dei periodi di chiusura delle gemme (a partire dai 30 giorni riscontrabili anche in serra è possibile dopo alcuni cicli vegetativi che il tempo si riduca a 5 giorni), rendendo possibile il susseguirsi di tre cicli vegetativi in meno di 150 giorni, a confronto con i circa 250 giorni necessari in serra. L'aumento dei cicli vegetativi per unità di tempo determina naturalmente un maggiore accrescimento dei semenzali, soprattutto se le ghiande non vengono private del pericarpo (rimozione tradizionalmente effettuata nel caso di coltivazioni indoor per limitare la probabilità di infezioni fungine).

La comparazione tra semenzali nati da ghiande integre o private del pericarpo ha difatti evidenziato come la persistenza del pericarpo si associ a ritmi di accrescimento più sostenuti, sia in termini di incremento in altezza dei semenzali sia di emissione di foglie. Tale fenomeno è probabilmente legato alla maggiore disponibilità quantitativa di nutrienti nel caso di ghiande integre, in quanto la privazione del pericarpo si associa

generalmente alla rimozione di un terzo della ghianda per facilitare l'emergenza del germoglio. Inoltre, la presenza del pericarpo consente di limitare la disidratazione della ghianda e la sua esposizione a luce diretta, consentendo anche una più lunga conservazione dei nutrienti dell'endosperma senza subire alterazioni.

Relativamente alle specie forestali, non sono disponibili in letteratura informazioni relative al numero di cicli di crescita che è possibile indurre in una determinata specie mediante l'utilizzo di fonti luminose artificiali, a confronto con l'ambiente naturale.

Ma dati relativi a specie agrarie confermano la possibilità di ottenere un incremento dei cicli di crescita nel corso di un anno di coltivazione, per specie quali la lattuga o il basilico. Secondo i dati dell'ENEA, la produzione è praticamente doppia rispetto alle colture tradizionali: per l'insalata, ad esempio, si passa da 6 a 14 cicli di raccolta/anno per ogni piano, con un risparmio del 95% di acqua (2 soli litri per un 1kg di lattuga contro i 40-45 litri/kg in un campo tradizionale). Dati forniti dalla ditta Valoya, relativi alla coltivazione indoor di fragole, stimano un raccolto medio di 7 tonnellate di fragole in 30 metri quadri di vertical farm, grazie alla possibilità del susseguirsi di 4 cicli di raccolta invece che 1 o 2, come avviene normalmente in natura, grazie all'utilizzo di un fotoperiodo che simuli il periodo estivo di giugno (14L 10D), che corrisponde alla stagione di fruttificazione naturale della specie. Inoltre, nel corso del medesimo studio, è stato dimostrato di poter ottenere il primo raccolto, con tale fotoperiodo e condizioni costanti di temperatura e umidità, soltanto dopo 8 settimane dal trasferimento dei semenzali sotto luci artificiali.

Come affermato precedentemente, la coltivazione indoor consente di controllare la temperatura (mantenendola costante o variandola tra giorno e notte) ed il fotoperiodo. Questi due parametri influenzano profondamente l'accrescimento delle piante. Per quanto concerne la temperatura è facile comprenderne il motivo: ogni specie vegetale mostra un range termico entro il quale ha la capacità di accrescersi. Riguardo alla lunghezza del giorno, la situazione appare decisamente più complicata, in particolare se considerata in combinazione con la temperatura. Comprendere la relazione tra i due parametri consente di poter giocare sui loro valori reciproci, conducendo ad estensioni delle stagioni vegetative o ad esempio alla selezione di specifiche varietà.

La prima cosa da chiarire è che il termine "lunghezza del giorno" non sia propriamente corretto. In realtà studi scientifici hanno dimostrato quanto sia maggiormente la lunghezza del periodo di buio, non della fase di luce, ad influenzare la crescita delle piante. La lunghezza della notte, intesa come fase di buio, conduce

infatti le specie a delle “scelte”, quali la fioritura o la fruttificazione. Modificare artificialmente tale lunghezza consente dunque di alterare i normali ritmi fenologici.

Al di sotto delle 10 ore di luce la maggior parte delle piante arresta la propria crescita, in quanto tale durata corrisponde ad un giorno medio nel periodo invernale (alle nostre latitudini). Ciò accade in maniera indipendente dalla temperatura. I giorni brevi dell’inverno presentano di contro notti lunghe. Se tale periodo viene interrotto accendendo delle luci artificiali, molte specie reagiscono come se si trovassero in un periodo caratterizzato da notti brevi, ovvero in estate. In campo agrario tale stratagemma ha consentito, già in serra con luce supplementare e poi nelle plant factories con luce artificiale sostitutiva della luce solare, di forzare molteplici specie a fiorire in inverno.

Le specie vegetali, in base alla responsività in termini di crescita vegetativa alla durata delle giornate, vengono classificate in piante longidiurne, brevidiurne e neutrale.

Alcune specie sono così sensibili da non fiorire qualora la durata della notte sia anche solo 1 minuto inferiore al loro valore soglia. Esistono anche specie che fioriscono nel medesimo giorno ogni anno. Il meccanismo tramite cui le piante percepiscono la durata della notte appare essere rappresentato dall’orologio biologico, che regolato dalla durata della notte tramite l’aiuto del fitocromo, stabilisce in quale stagione si trovi la pianta (Reece *et al.*, 2014).

Nel caso di semenzali forestali in fase post-geminativa, non ancora pronti dunque a fiorire, l’utilizzo di un fotoperiodo costante con una notte di durata pari a 12 ore, conduce le piante ad un accrescimento vegetativo continuo, interrotto da brevi pause, come se la specie si trovasse costantemente in un periodo primaverile, che difatti corrisponde, in accordo con i dati rilevati in bosco, al periodo di maggior accrescimento del semenzale prima della fase di arresto indotta dall’estate.

Il confronto morfometrico tra semenzali cresciuti da novembre (periodo di germinazione) a giugno (inizio della stasi vegetativa estiva) in bosco e semenzali cresciuti sotto lampade artificiali ha evidenziato come, in soli 30 giorni di crescita in ambiente controllato, i semenzali di sughera siano in grado di raggiungere dimensioni compatibili (sotto fluorescenza) o significativamente superiori (sotto luci LED) a quelle mediamente riscontrabili in bosco al termine della prima stagione vegetativa a Giugno. Anche in termini di biomassa è stato denotato un comportamento simile a quello riscontrato per l’altezza dello stelo; in particolare, gli spettri AP67-3L e AP67

bars hanno condotto ai valori maggiori sia in relazione alla biomassa epigea sia al rapporto di snellezza.

L'accrescimento bilanciato (alti valori di altezza e biomassa) comporta lo sviluppo di semenzali alti ma robusti, pronti per essere trasferiti non solo in serra ma addirittura in campo aperto dopo un solo mese di crescita in ambiente artificiale, in virtù della forte adattabilità della specie alle variazioni in termini di condizioni luminose.

Associando tale caratteristica all'elevato numero di semenzali ottenibili in un singolo ciclo di crescita in ambiente artificiale (dipendenti dalle dimensioni della camera di crescita o, nel caso del prototipo Zephyr, dall'ottimizzazione degli spazi al fine di incrementare la densità di produzione), è facile comprendere come la coltivazione indoor possa risultare vantaggiosa rispetto ai metodi vivaistici tradizionali, per la realizzazione di opere di rimboschimento.

La possibilità offerta dal prototipo Zephyr di produrre semenzali direttamente nel sito dell'impianto, aggiunge un ulteriore vantaggio rispetto ai metodi tradizionali, determinando un abbattimento dei costi e delle emissioni legate al trasporto delle piante dal sito di produzione al sito da rimboschire.

## 5. Conclusioni

Vari studi svolti nel corso degli ultimi decenni, soprattutto su *Arabidopsis thaliana*, hanno dimostrato chiaramente che variazioni in termini di quantità, qualità della luce e fotoperiodo, possano essere manipolate allo scopo di influenzare la crescita delle piante. Tali ricerche hanno fornito un impulso allo sviluppo di coltivazioni in ambiente artificiale, che hanno avuto un forte sviluppo nel corso degli ultimi decenni, grazie ai numerosi vantaggi offerti rispetto alle tecniche tradizionali di coltivazioni in terra. L'applicazione di tali metodiche innovative, sorte nel campo orto florovivaistico, alla vivaistica forestale, è un fenomeno piuttosto recente e, nel corso dell'ultimo decennio, è stata l'argomento centrale di una serie di progetti europei finalizzati alla creazione di prototipi di coltivazione di specie forestali sotto luci artificiali.

Le camere di crescita sono state inizialmente dotate di lampade a fluorescenza o incandescenza che emettono uno spettro non stressante per la vista umana ma poco idoneo allo sviluppo delle piante. L'introduzione dei LED ha consentito di studiare le risposte degli organismi vegetali a particolari lunghezze d'onda, in virtù della loro natura monocromatica, incrementando in maniera significativa le conoscenze relative alla fotobiologia dei vegetali. Grazie a caratteristiche quali la straordinaria emivita (circa 100.000 ore), il basso consumo energetico e le basse emissioni di calore, essi hanno sostituito le tradizionali lampade utilizzate nelle camere di crescita, non solo a livello terrestre ma anche a livello di stazioni spaziali.

Test di coltivazione di alcune specie forestali europee, cresciute sotto differenti spettri LED e sotto convenzionali lampade a fluorescenza, hanno evidenziato accrescimenti significativamente maggiori sotto luci LED o compatibili con quelli ottenuti sotto fluorescenza, così come minori valori di malondialdeide, prodotto finale della perossidazione lipidica e pertanto considerata generalmente quale marker di stress ossidativo, sotto luci LED. Non risulta però possibile definire, tra i vari spettri LED testati, uno spettro migliore per la totalità delle specie considerate. Prendendo infatti in considerazione una singola fonte luminosa, essa non solo appare promuovere o deprimere l'accrescimento di una determinata specie ma, nell'ambito della stessa specie, può influenzare positivamente alcuni parametri (morfometrici, microscopici o biochimici) e negativamente altri. L'introduzione di fonti luminose LED policromatiche a spettro continuo ha difatti comportato da un lato significativi miglioramenti nella qualità dei prodotti ottenuti da

coltivazione indoor, dall'altro la difficoltà di associazione tra lunghezza d'onda e parametro influenzato, in quanto le singole lunghezze d'onda possono mostrare effetti di cooperazione o antagonismo, la cui somma algebrica va a determinare la risposta biologica nell'individuo vegetale.

Tali osservazioni trovano conferma nei risultati di tale lavoro di tesi. I sei spettri testati hanno mostrato effetti specie-specifici portando alla conclusione che non sia possibile definire uno spettro migliore per tutte le specie in analisi, in quanto ogni fonte luminosa appare promuovere o deprimere un determinato parametro, in funzione della specie considerata. È stato però possibile ritrovare delle affinità di risposta tra sughera e altre specie mediterranee, dunque caratterizzate dall'appartenenza al medesimo gruppo corologico. La spiegazione di tale fenomeno potrebbe risiedere nelle similitudini tra specie appartenenti al medesimo corotipo, in termini quali-quantitativi di luce solare che irradia la rinnovazione naturale, rispetto a corotipi diversi. In particolare le condizioni luminose a livello di semenzale sono determinate dalle caratteristiche peculiari in termini di morfologia fogliare delle singole specie. Non solo risulta difatti possibile non solo costruire curve di attenuazione luminosa relative a differenti tipologie forestali, come ad esempio per le foreste boreali, temperate, tropicali etc. ma anche specie specifiche.

Nello specifico, gli spettri risultati più promettenti per la coltivazione di specie mediterranee (AP67 bars e AP673L) sono risultati essere quelli più simili in termini qualitativi al reale spettro della luce solare diretta.

Per soddisfare le necessità luminose di singole specie, risulta dunque necessaria la messa a punto di matrici di LED, in sostituzione delle lampade al momento disponibili in commercio, caratterizzate da uno spettro fisso non modulabile (ad eccezione dei LED RGB, capaci di produrre 3 differenti lunghezze d'onda - rosso, verde e blu - la cui mescolanza dà luogo ad una luce di un determinato colore che dipende dall'intensità di ciascuno dei tre colori originari). Mediante la possibilità di modulare l'intensità di molteplici lunghezze d'onda nel range 400-1100 nm, risulterebbe difatti possibile produrre una serie di combinazioni luminose corrispondenti ad altrettanti spettri continui, studiati ad hoc per la singola specie (Folta *et al.*, 2005). Lo studio delle condizioni luminose di accrescimento dei semenzali di due specie tradizionalmente riconosciute come eliofile (*Platanus orientalis* L. e *Quercus suber* L.) in boschi naturali, ha mostrato come entrambe le specie si accrescano in condizioni alternate di luce ed ombra, nel corso della giornata,

dimostrando come la definizione classica di eliofilia di una specie, quale caratteristica delle piante che prosperano solo alla luce diretta del sole, poco si addica allo stadio di semenzale. La luce che raggiunge i semenzali, attraversando la volta arborea, è risultata qualitativamente differente tra le due specie. L'ombra del plataneto è risultata essere caratterizzata da una significativa diminuzione percentuale di luce blu, verde-giallo-arancio e rossa rispetto alla luce solare diretta ed un sensibile incremento percentuale del rosso lontano. L'ombra della sughereta è stata invece associata a una percentuale inferiore di luce blu rispetto alla luce solare diretta, con incremento della percentuale di luce verde-giallo-arancio, rosso vicino e rosso lontano. Le differenze qualitative tra le aree ombreggiate dei due differenti boschi sono probabilmente da attribuire alla differente morfologia fogliare delle specie che determina differenti modalità di attenuazione della luce solare incidente sulla volta arborea.

Al di là della qualità dello spettro da utilizzare per la coltivazione di una specie, risulta importante anche definire l'intensità minima di luce che consenta lo sviluppo delle piante da un lato e il minor consumo energetico dall'altro. Per entrambe le specie, la presenza di semenzali in accrescimento sia in punti ombreggiati sia esposti a luce diretta all'interno del bosco, ha portato a decretarne la possibilità di coltivazione in ambiente artificiale anche ad intensità basse (fino a 100 PPFD) senza indurre alcuno stress con conseguente inibizione dell'accrescimento dei semenzali.

Analisi approfondite sulla fenologia della sughera in bosco hanno però mostrato come, nonostante la possibilità di sviluppo anche a basse intensità luminose, la specie mostri percentuali di emergenza e ritmi di accrescimento significativamente superiori in punti del bosco esposti a luce diretta nelle ore centrali del giorno. Una spiegazione a tal fenomeno può essere ricercata nel differente grado di luce infrarossa (con effetto termico) presente in punti esposti a luce diretta piuttosto che in penombra e dunque allo stretto legame tra temperatura e ritmi fenologici. La temperatura costante presente nelle camere di crescita rappresenta dunque già di per sé un parametro fondamentale per l'ottenimento di semenzali con un accrescimento più rapido e significativo rispetto a quello manifestato in ambienti naturali, soggetti a variazioni termiche, non solo legate al fotoperiodo ma anche alle condizioni atmosferiche. Mentre in bosco a partire infatti dalla germinazione autunnale, le ghiande sono poi esposte al clima invernale e l'emergenza del germoglio avviene in concomitanza con l'innalzamento termico primaverile, in camera di crescita il gap tra germinazione ed emergenza è di circa 10 giorni. Allo stesso modo, mentre in bosco in

seguito all'emergenza si assiste allo sviluppo vegetativo dei semenzali che si arresta all'inizio della stagione siccitosa estiva per poi riprendere al termine dell'estate, in camera di crescita è possibile il susseguirsi di tre cicli vegetativi in meno di 150 giorni. L'aumento dei cicli vegetativi per unità di tempo determina naturalmente un maggiore accrescimento dei semenzali, soprattutto se le ghiande non vengono private del pericarpo, in virtù della maggiore disponibilità quantitativa di nutrienti nel caso di ghiande integre, in quanto la privazione del pericarpo si associa generalmente alla rimozione di un terzo della ghianda per facilitare l'emergenza del germoglio. Inoltre, la presenza del pericarpo consente di limitare la disidratazione della ghianda e la sua esposizione a luce diretta, consentendo anche una più lunga conservazione dei nutrienti dell'endosperma senza subire alterazioni.

Nessuno degli spettri testati nel corso del progetto di tesi è risultato associato a fenomeni di stress da trapianto nella fase di trasferimento in serra dei semenzali precoltivati indoor. È difatti stato evidenziato in tutte le specie un adattamento rapido alla luce solare senza il persistere di differenze significative in termini di modalità di accrescimento e di metabolismo indotte dalle diverse fonti luminose.

La selezione dello spettro migliore da adottare per la pre-coltivazione di specie forestali deve quindi basarsi più su base energetica (consumi minori, emivita maggiore, minori emissioni di calore), preferendo in primo luogo i LED alle lampade a fluorescenza e tra i LED quelli poveri in infrarosso o ad esempio sulla selezione di lampade quanto meno nocive per l'uomo (povere in UV e ad emissione bianca piuttosto che rosata, causa di stanchezza oculare nell'osservatore).

Lo sviluppo sotto lampade artificiali di semenzali alti ma robusti consente addirittura per alcune specie a più rapido adattamento a differenti condizioni luminose (come la sughera) di essere trasferiti addirittura in campo aperto dopo un solo mese di crescita in ambiente artificiale.

Associando tale caratteristica all'elevato numero di semenzali ottenibili in un singolo ciclo di crescita in ambiente artificiale risulta evidente come la coltivazione indoor possa risultare vantaggiosa rispetto ai metodi vivaistici tradizionali, per la realizzazione di opere di rimboschimento. Il prototipo Zephyr aggiunge a tali vantaggi anche quello di poter essere trasferito direttamente nel sito dell'impianto e di consentire dunque una produzione in loco dei semenzali necessari, con un significativo abbattimento dei costi e delle emissioni legate al trasporto delle piante dal sito di produzione al sito da rimboschire.

## 6. Bibliografia

- Abbasin, Z., Zamani, S., Movahedi, S., Khaksar, G., Tabatabaei, B.E.S. (2010). In vitro micropropagation of yew (*Taxus baccata*) and production of plantlets. *Biotechnology*, 9, 48-54.
- Adams, J. (2007). *Vegetation-climate interaction*. Springer, 266 pp.
- Andersson, F. (2005). *Coniferous Forests in: Ecosystems of the World*. Elsevier. 646 pp.
- Anşin, R., Özkan, Z.C. (2006). *Tohumlu Bitkiler (Spermatophyta)*. Odunsu Taksonlar. Karadeniz Teknik Üniversitesi, Orman Fakültesi, Genel Yayın No. 167, Fakülte Yayın No: 19. KTÜ Basımevi, (Trabzon), 450 pp.
- Aphalo, P.J. (2010). Light signals and the growth and development of plants - a gentle introduction. *The Plant Photobiology Notes 1*. Department of Biological and Environmental Sciences Plant Biology University of Helsinki, Finland, 39 pp.
- Apostol, K.G., Dumroese, K., Pinto, J.R., Davis, A.S. (2014). Response of conifer species from three latitudinal populations to light spectra generated by light-emitting diodes and high-pressure sodium lamps. *ISHS Acta Horticulturae 1085: Proceedings of the 2014 Annual Meeting of the International Plant Propagators Society*. doi: 10.17660/ActaHortic.2015.1085.62
- Astolfi, S., Marianello, C., Grego, S., Bellarosa, R. (2012). Preliminary Investigation of LED Lighting as Growth Light for Seedlings from Different Tree Species in Growth Chambers. *Not Bot Horti Agrob*, 40(2), 31-38.
- Avercheva, O.V., Berkovich, Y.A., Erokhin, A.N., Zhigalova, T.V., Pogosyan, S.I., Smolyanina, S.O. (2009). Growth and Photosynthesis of Chinese Cabbage Plants Grown under Light-Emitting Diode-Based Light Source. *Russian Journal of Plant Physiology*, 56(1), 14–21.
- Banerjee, R., Batschauer, A. (2005). Plant blue-light receptors. *Planta*, 220, 498–502.
- Benedict, W.V. (1981). *History of white pine blister rust control - a personal account*. Publication No. FS-355. USDA Forest Service; Washington, D.C. 47 pp.
- Binggeli, P. (1998). *An Overview of Invasive Woody Plants in the Tropics*. School of Agricultural and Forest Sciences Publication Number 13, University of Wales, Bangor, UK.

- Bird, R. (1990). Growing From Seed. Spring 1990, 4(2). The Seed Raising Journal from Thompson & Morgan.
- Bisegna, F., Gugliermetti, F., Barbalace, M., Monti, L. (2010). Stato dell'arte dei LED (Light Emitting Diodes). Report RdS/2010/238. Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA
- Bonner, F.T., Karrfalt, R.P. (2008). The Woody Plant Seed Manual. United States Department of Agriculture.
- Bradbeer, J.W., Pinfield, N.J. (1967). Studies in seed dormancy III. The effects of gibberellin on dormant seeds of *Corylus avellana* L.. New Phytologist, 66, 515-523.
- Branco, M., Branco, C., Merouani, H., Almeida, M. H. (2002). Germination success, survival and seedling vigour of *Quercus suber* acorns in relation to insect damage. Forest ecology and management, 166: 159-164.
- Brazaitytė, A., Duchovskis, P., Urbonaviciūtė, A. *et al.* (2009). After-effect of light-emitting diodes lighting on tomato growth and yield in greenhouse. SODININKYSTĖ IR DARŽININKYSTĖ, 28(1), 115-126.
- Brazaitytė, A., Duchovskis, P., Urbonaviciūtė, A., Samuolienė, G., Jankauskienė, J., Kasiuleviciūtė-Bonakerė, A., Bliznikas, Z., Novickovas, A., Breivė, K., Zukauskas, A. (2009). The effect of light-emitting diodes lighting on cucumber transplants and after-effect on yield. Zemdirbyste-Agriculture, 96(3), 102-118.
- Burch, F. (2005). Twenty Years of Nursery History—A Forest Service Perspective. USDA Forest Service Proceedings RMRS-P-35. Pp. 69-72.
- Canham, C.D., Denslow, J.S., Platt, W.J., Runkle, J.R., Spies, T.A., White, P.S. (1990). Light regimes beneath closed canopies and tree-fall gaps in temperate and tropical forests. Can. J. For. Res, 20: 620-631.
- Cardillo, E., Bernal, C.J. (2006). Morphological response and growth of cork oak (*Quercus suber* L.) seedlings at different shade levels. Forest Ecology and Management, 222: 296–301.
- Chamovitz, D. (2012). What a Plant Knows: A Field Guide to the Senses. Scribe Publications. 177 pp.

- Chmielewski, F.M., Rötzer, T. (2001). Response of tree phenology to climate change across Europe. *Agricultural and Forest Meteorology*, 108, 101-112.
- Cope, K.R., Bugbee, B. (2013). Spectral Effects of Three Types of White Light-emitting Diodes on Plant Growth and Development: Absolute versus Relative Amounts of Blue Light. *HORTSCIENCE*, 48(4), 504–509.
- De Boodt, M., Verdonck, O. (1972). The physical properties of the substrates in horticulture. *Acta Horticulturae*, 26, 37-44.
- Dengel, S., Grace, J., MacArthur, A. (2015). Transmissivity of solar radiation within a *Picea sitchensis* Stand under various sky conditions. *Biogeosciences*, 12, 4195-4207.
- Despommier, D. (2013). Farming up the city: the rise of urban vertical farms. *Trends in Biotechnology*, 31(7), 388-389.
- Dirr, A. M., Heuser, C. W. Jr. (2006). *The Reference Manual of Woody Plant Propagation: From Seed to Tissue Culture*. Varsity Press, Inc. North Carolina, (USA). 417 pp.
- Drăghici, C., Abrudan, I.V. (2010). Dormancy Breaking Of *Acer* and *Fraxinus* Seeds. *Bulletin of the Transilvania University of Braşov*, 3(52), 29-32.
- Drăghici, C., Abrudan, L. V. (2011). The Effect of Different Stratification Conditions on the Germination of *Fraxinus angustifolia* Vahl. and *F. ornus* L. Seeds. *Not Bot Hort Agrobot Cluj*, 39(1), 283-287.
- FAO. (1998). *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56*.
- FAO. (2013). *State of mediterranean forests 2013*. ISBN 978-92-5-107984-3 (print) E-ISBN 978-92-5-107538-8 (pdf)
- Flores, T., Wagner, L.J., Flores, H.E. (1993). Embryo Culture and Taxane Production in *Taxus* Spp. In: *Vitro Cellular & Developmental Biology-Plant*, 29, 160-165.
- Folta, K. M., Koss, L. L., McMorro, R., Kim, H. H., Kenitz, J. D., Wheeler, R., Sager, J. C. (2005). Design and fabrication of adjustable red-green-blue LED light arrays for plant research. *BMC plant biology*, 5(1), 1.
- Folta, K.M. (2004). Green light stimulates early stem elongation, antagonizing light-mediated growth inhibition. *Plant Physiology*, 135, 1407–1416.

- Folta, K.M., Maruhnich, S.A. (2007). Green light: a signal to slow down or stop. *Journal of Experimental Botany*, 58(12), 3099–3111. doi:10.1093/jxb/erm130.
- Frechilla, S., Talbott, L.D., Bogomolni, R.A., Zeiger, E. (2000). Reversal of blue light-stimulated stomatal opening by green light. *Plant Cell Physiology*, 41, 171–176.
- Gerdol, R., Stanisci A., Tomaselli M. (2008). *La vegetazione delle montagne italiane*. CAI com.scient.cent. 388 pp.
- Gil, L, Varela, M.C. (2008). *EUFORGEN Technical Guidelines for genetic conservation and use for cork oak (Quercus suber)*. Bioersity International, Rome, Italy. 6 pp.
- Goins, G.D., Yorio N.C., Sanwo-Lewandowski M.M., Brown C.S. (1998). Life cycle experiments with *Arabidopsis* under red light-emitting diodes (LEDs). *Life Support Biosph. Sci*, 5, 143–149.
- González-Vázquez, E. (1938). *Fundamentos naturales de la selvicultura. Los bosques ibéricos*. Ed. Instituto Forestal de Investigaciones y experiencias, Valencia.
- Gosling, P. (2007). *Raising trees and shrubs from seed. Forestry Commission Practice Guide*. Forestry Commission, Edinburgh. 34 pp.
- Gradi, A. (1989). *Vivaistica forestale*. Edagricole.
- Hammat, N., Ridout, M.S. (1992). Micropropagation of common ash (*Fraxinus excelsior*). *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 31(1), 67-74.
- Hart, S.A., Chen, H.Y.H. (2006). Understory Vegetation Dynamics of North American Boreal Forests. *Critical Reviews in Plant Sciences*, 25, 381–397.
- Hartmann, H.T., Kester, D.E., Davies F.T.Jr., Geneve R.L. (2002). *Hartmann and Kester's plant propagation: principles and practices*. Prentice Hall. 915 pp.
- Harvey, R.B. (1922). Growth of plants in artificial light. *Botanical Gazette*, Dec., 1922, 74(4), 447-451.
- Heo, J., Lee, C., Chakrabarty, D., Paek, K. (2002). Growth responses of marigold and salvia bedding plants as affected by monochromic or mixture radiation provided by a Light-Emitting Diode (LED). *Plant Growth Regulation*, 38, 225–230.
- Hertel, R. (2005). A flavin mononucleotide-binding aquaporin in the plant plasma membrane: a candidate for photoreceptor? In: Wada M, Shimazaki K, Iino M, eds. *Light sensing in plants*. Tokyo: Springer-Verlag, 231–238.

- Horwitz, B.A., Berrocal, T.G.M. (1997). A spectroscopic view of some recent advances in the study of blue light photoreception. *Botanica Acta*, 110(5), 360–368.
- Hoseini Nasr, S.M., Modanloo, S., Jalilvand, H., Mofidabadi, A.J. (2007) Seed dormancy breakage of recalcitrant yew species (*Taxus baccata* L.) using embryo culture. *Journal of Biological Sciences*, 7, 781-785.
- Hughes, L. (2000). Biological consequences of global warming: is the signal already apparent?. *Trends in ecology & evolution*, 15(2), 56-61.
- International Seed Testing Association (ISTA). (2007). International rules for seed testing. Edition 2007, ISTA, Bassersdorf, Switzerland.
- Iszkulo, G. (2010). Success and failure of endangered tree species: Low temperatures and low light availability affect survival and growth of european yew (*Taxus baccata* L.) seedlings. *Polish Journal of Ecology*, 58, 259-271.
- IUCN. (2012). Red List of Threatened Species. Version 2012.2.
- Jarvis, B.C. (1975). The role of seed parts in the induction of dormancy of hazel (*Corylus avellana* L.). *New Phytologist*, 75, 491-494.
- Jarvis, B.C., Shannon, P.R.M. (1981). Changes in poly(a) RNA metabolism in relation to storage and dormancy-breaking of hazel seed. *New Phytologist*, 88, 31-40.
- Jarvis, B.C., Wilson, D. (1977). Gibberellin effects within hazel (*Corylus avellana* L.) seeds during the breaking of dormancy I. A direct effect of gibberellin on the embryonic axis. *New Phytologist*, 78, 397-401.
- Jeavons, R.A., Jarvis, B.C. (1984). The Breaking of Dormancy in Hazel Seed by Pretreatment with Ethanol and Mercuric Chloride. *New Phytologist*, 96, 551-554.
- Jenkins, G. I. (2009). Signal transduction in responses to UV-B radiation. *Annu Rev Plant Biol*, 60, 407-431. URL: <http://dx.doi.org/10.1146/annurev.arplant.59.032607.092953>.
- Johkan, M., Shoji, K., Goto, F., Hahida, S., Yoshihara, T. (2011). Effect of green light wavelength and intensity on photomorphogenesis and photosynthesis in *Lactuca sativa*. *Environmental and Experimental Botany*, 75, 128-133.
- Johnson, C.F., Brown, C.S., Wheeler, R.M., Sager, J.C., Chapman, D.K., Deitzer, G.F. (1996). Infrared light-emitting diode radiation causes gravitropic and morphological effects in darkgrown oat seedlings. *Photochem. Photobiol*, 63, 238-242.

- Kavadas, D. (1956). Botanical Floral Dictionary. Athens. Genus *Platanus*, 7, 3171-3174.
- Kim, H.H., Goins G.D., Wheeler R.M., Sager J.C. (2004a). A comparison of growth and photosynthetic characteristics of lettuce grown under red and blue light-emitting diodes (LEDs) with and without supplemental green LEDs. *Acta Hort.* 659, 467-475.
- Kim, S.J., Hahn, E.J., Heo, J.W., Paek, K.Y. (2004b). Effects of LEDs on net photosynthetic rate, growth and leaf stomata of chrysanthemum plantlets in vitro. *Sci. Hortic*, 101, 143-151.
- Klein, R.M., Edsall P.C., Gentile A.C. (1965). Effects of near ultraviolet and green radiations on plant growth. *Plant Physiology*, 40, 903-906.
- Kopsell, D.A., Sams, C.E. (2013). Increases in Shoot Tissue Pigments, Glucosinolates, and Mineral Elements in Sprouting Broccoli after Exposure to Short-duration Blue Light from Light Emitting Diodes. *J. AMER. SOC. HORT. SCI*, 138(1), 31–37.
- Körner, C., Baster, D. (2010). Phenology Under Global Warming. *Science*, 327, 1461-1462.
- Kumar, G.N.M., Larsen, F.E., Schekel, K.A. (2009). Propagating Plants from Seed. In: A Pacific Northwest Extension Publication. Washington State University, Oregon State University, University of Idaho.
- Landi Degl’Innocenti, E. (2008). *Fisica solare*. UNITEXT. Springer Milan. 292 pp. DOI 10.1007/978-88-470-0678-2\_2
- La Rosa, A.M., Clifford, W. S., Donald, E.G. (1987). Role of alien and native birds in the dissemination of firetree (*Myrica faya* Ait. – Myricaceae) and associated plants in Hawaii. *Pacific Science*, 39(4).
- Landis, T.D. *et al.* (1990). Container tree nursery manual Vol II. Containers and growing media. Ch 1 Containers: Types and Functions. In: Landis T.D., Tinus, R.W., McDonald S.E., Barnett, J.P. (1961). The container tree nursery manual Volume II Agric. Handbk. 674, Wash., DC, USDA, Forest Service: 1-39.
- Li, H., Tang, C., Xu, Z. (2013). The effects of different light qualities on rapeseed (*Brassica napus* L.) plantlet growth and morphogenesis in vitro. *Scientia Horticulturae*, 150, 117-124.

- Li, H.M., Xu, Z.G., Tang, C.M. (2010). Effect of light-emitting diodes on growth and morphogenesis of upland cotton (*Gossypium hirsutum* L.) plantlets in vitro. *Plant Cell Tiss. Organ Cult*, 103, 155-163.
- Lian, M.L., Murthy, H.N., Paek, K.Y. (2002). Effect of light emitting diodes (LEDs) on the in vitro induction and growth of bulblets of *Lilium* oriental hybrid 'Pesaro'. *Sci. Hortic*, 94, 365-370.
- Lieffers, V.J., Messier, C., Stadt, K.J., Gendron, F., Comeau, P.G. (1999). Predicting and managing light in the understory of boreal forests. *Canadian Journal of Forest Research*, 29(6), 796-811.
- Lin, K.H., Huang, M.Y., Huang, W.D., Hsu, M.H., Yang, Z.W., Yang, C.M. (2013). The effects of red, blue, and white light-emitting diodes on the growth, development, and edible quality of hydroponically grown lettuce (*Lactuca sativa* L. var. capitata). *Scientia Horticulturae*. 150, 86-91.
- Loach, K. (1970). Shade tolerance in tree seedlings. *New Phytologist*, 69(2), 273-286.
- Lorenz, A., Kaldenhoff, R., Hertel, R. (2003). A major integral protein of the plant plasma membrane binds flavin. *Protoplasma*, 221, 19-30.
- Lowman, M.D. (1986). Light interception and its relation to structural differences in three Australian rainforest canopies. *Australian Journal of Ecology*, 11, 163-170.
- Maas, F.M., Bakx, E.J., Morris, D.A. (1995). Photocontrol of stem elongation and dry weight partitioning in *Phaseolus vulgaris* L. by the blue-light content of photosynthetic photon flux. *Journal of Plant Physiology*, 146, 665-671.
- Magini, E. (1977). *Appunti di vivaistica forestale*. Cooperativa libraria Universitatis Studii Fiorentini.
- Marras, T., Canali, F., Vessella, F., Schirone, B. (2015). Light needs for seed germination and early development of seedlings in cork oak (*Quercus suber* L.). Proceedings of "Reforestation Challenges Conference", 03-06 June 2015, Belgrade (Serbia).
- Marras, T., Pietrzak, M. (2015). Analysis of the effects of gibberellic acid and cold stratification on the germination of two endemic species of Azorean Islands. Proceedings of "Ecoplantmed International Conference", 14-16 October 2015, Beirut (Lebanon).

- Martineau, V., Lefsrud, M., Naznin, M.T., Kopsell, D.A. (2012). Comparison of light-emitting diode and high-pressure sodium light treatments for hydroponics growth on Boston lettuce. *HortScience*, 47(4), 477-482.
- Massa, G.D., Emmerich, J.C., Morrow, R.C., Bourget, C.M., Mitchell, C.A. (2006). Plant-growth lighting for space life support: a review. *Gravitational and Space Biology*, 19(2), 19-30.
- Massa, G.D., Kim, H., Wheeler, R., Mitchell, C.A. (2008). Plant productivity in response to LED lighting. *Hort. Science*, 43(7), 1951-1956.
- Matloobi, M. (2012). Light harvesting and photosynthesis by the canopy. In: Mohammad Mahdi N (ed) *Advances in photosynthesis fundamental aspects*. InTech: Janeza Trdine 9, 51000 Rijeka, Croatia, 235–256.
- Matsuda, R., Ohashi-Kaneko K., Fujiwara K., Goto E., Kurata K. (2004). Photosynthetic characteristics of rice leaves grown under red light with or without supplemental blue light. *Plant & Cell Physiol*, 45, 1870-1874.
- Menzel, A. *et al.* (2006). European phenological response to climate change matches the warming pattern. *Global change biology*, 12(10), 1969-1976.
- Mickens, M.A., Wheeler, R.M. (2012). Comparative Study of Lettuce and Radish Grown Under Red and Blue Light-Emitting Diodes (LEDs) and White Fluorescent Lamps. *Journal. Center-Based Research Experience (CBRE). JPPF*.
- Molnar, T.J., Baxer, S.N., Goffreda, J.C. (2005). Accelerated screening of hazelnut seedlings for resistance to eastern filbert blight. *Hortscience*, 40, 1667-1669.
- Montgomery, R.A. (2004), Effects of Understory Foliage on Patterns of Light Attenuation near the Forest Floor. *BIOTROPICA*, 36(1), 33-39.
- Moreira, O.C.B, Martins, J., Silva, L., Moura, M. (2012). Seed germination and seedling growth of the endangered Azorean cherry *Prunus azorica*. *HortScience*, 47(9), 1222-1227.
- Mortensen, L.M., Stromme, E. (1987). Effect of light quality on some greenhouse crops. *Scientia Horticulturae*, 33, 27-36.
- Moura, M. (1998). Conservation of *Hypericum foliosum* Aiton, an endemic Azorean species, by micropropagation. *In vitro Cellular & Developmental Biology – Plant*, 34(3), 244-248.

- Navarrete Poyatos, M.A., Navarro Cerrillo, R., Palacios Rodríguez, G., Chnais, E., Salman, H. (2011) Forest nurseries in Lebanon for native species production. Gland, Switzerland and Malaga, Spain: IUCN, Cordoba, Spain: University of Cordoba-IDAF, and Beyrouth, Lebanon: Association for Forest Development and Conservation. viii + 120 pp. ISBN: 978 - 2 - 8317 - 1398 – 4.
- Nhut, D.T., Hong, L.T.A., Watanabe, H., Goi, M., Tanaka, M. (2003a). Growth of banana plantlets cultured in vitro under red and blue light-emitting diode (LED) irradiation source. *Acta Horti*, 575, 117-124.
- Nhut, D.T., Takamura, T., Watanabe, H., Okamoto, K., Tanaka, M. (2003b). Responses of strawberry plantlets cultured in vitro under superbright red and blue lightemitting diodes (LEDs). *Plant Cell Tiss. Organ Cult*, 73, 43-52.
- Norriah, M.N., Reed, B.M., Yu, X. (1994), Seed storage and cryoexposure behavior in hazelnut (*Corylus avellana* L. cv. Barcelona). *Cryo-Letters*, 15, 315-322.
- Nozue, K., Kanegae, T., Imaizumi, T., Fukuda, S., Okamoto, H., Yeh, K.C., Lagarias, J. C., Wada, M. (1998). A phytochrome from the fern *Adiantum* with features of the putative photoreceptor NPH1. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 95(26), 15826-15830.
- Pandey, A., Nadeem, M., Palni, L.M.S. (2002). Improvement in seed germination of Himalayan yew through simple soil treatments. *Indian Journal of Forestry*, 25(2), 109-113.
- Parmesan, C. (2007). Influences of species, latitudes and methodologies on estimates of phenological response to global warming. *Global change biology*. 13(9), 1860-1872.
- Picard, J.F. (1962). Contribution à l'étude de la biologie florale et de la fructification du frêne commun (*Fraxinus excelsior* L.). *Revue Forestière Française*, 34, 97-107.
- Pignatti, S. (1994). *Ecologia del Paesaggio*. UTET, Torino.
- Pilotti, M., Brunetti, A., Tizzani, Z., Marani, O. (2009). *Platanus x acerifolia* genotypes surviving to inoculation with *Ceratocystis platani* (the agent of cancer stain): first screening and molecular characterization. *Euphytica*, 169, 1-17.
- Piotto, B. (1992). *Semi di alberi e arbusti coltivati in Italia. Come e quando seminarli*. SAF – Centro di Sperimentazione Agricola e Forestale. Roma. pp.47
- Piotto, B., Di Noi, A. (2001). *Propagation of Mediterranean trees and shrubs from seed*. APAT - Agency for the protection of the environment and for technical services, Rome.

- Polunin, O., Walters, M. (1987). Guida alle vegetazioni d'Europa. ed. Zanichelli Bologna.
- Poudel, P.R., Kataoka, I., Mochioka, R. (2008). Effect of red-and-blue-light-emitting diodes on growth and morphogenesis of grapes. *Plant Cell Tiss Organ Cult*, 92, 147-153.
- Prada, M.A., Arizpe, D. (Eds.) (2008). Riparian tree and shrub propagation Handbook. CIEF - Banc de Llavors Florestals, Valencia.
- Prasad, M.N.V. (1997). *Plant ecophysiology*. John Wiley & sons. 552 pp.
- Rajkovic, S., Markovic, M., Rakonjac, L. (2013). Incubation methods for forecasting the occurrence and development of *Lophodermium seditiosum* Minter, Staley & Millar on pine. In: *Fungicides – Showcases of Integrated Plant Disease Management from Around the World*. Ch. 8. Pag. 153-181. Intech.
- Raquin, C., Jung-Muller, B., Dufour, J., Frascaria-Lacoste, N. (2002). Rapid seedling obtaining from European ash species *Fraxinus excelsior* (L.) and *Fraxinus angustifolia* (Vahl.). *Ann. For. Sci.*, 59, 219-224.
- Raviv, M. (2007). *Soilless culture: theory and practice*. Elsevier Science. 608 pp.
- Reece, J.B., Meyers, N., Urry, L.A., Cain, M.L., Wasserman, S.A., Minorsky, P.V., Jackson, R.B., Cooke, B.N. (2014). *Campbell Biology Australian and New Zealand version*. Pearson Higher Education AU. 1521 pp.
- Riikonen, J. (2013). Personal communication. Suonenjoki, Finland: Finnish Forest Research Institute. Researcher.
- Royal Botanic Gardens Kew. (2008). Seed Information Database (SID). Version 7.1., Available from: <http://data.kew.org/sid/>, (May 2008).
- Samuolienė, G., Sirtautas, R., Brazaitytė, A., Sakalauskaitė, J., Sakalauskienė, S., Duchovskis, P. (2011). The impact of red and blue light-emitting diode illumination on radish physiological indices. *Cent. Eur. J. Biol.*, 6(5), 821-828.
- Schuerger, A.C., Brown C.S., Stryjewski E.C. (1997). Anatomical features of pepper plants (*Capsicum annuum* L.) grown under red light-emitting diodes supplemented with blue or far-red light. *Ann. Bot. (Lond.)*, 79, 273-282.
- Selby, C.P., Sancar, A. (2006). A cryptochrome/photolyase class of enzymes with single-stranded DNA-specific photolyase activity. *Proceedings of the National Academy of Sciences, USA* 103, 17696-17700.

- Shen, NGO. (1995). Project Report to establish and operate a forest tree and shrub nursery. Yerevan, Azerbaijan. 59 pp.
- Solangaarachchi, S.M., Harper, J.L. (1987). The effect of canopy filtered light on the growth of white clover *Trifolium repens*. *Oecologia*, 72, 372-376.
- Tafreshi, S.A.H., Shariati, M., Mofid, M.R., Nekui, M.K. (2011), Rapid germination and development of *Taxus baccata* L. by in vitro embryo culture and hydroponic growth of seedlings. *In Vitro Cellular & Developmental Biology - Plant*, 47(5), 561-568.
- Tanada, T. (1997). The photoreceptors in the high irradiance response of plants. *Physiologia Plantarum*, 101, 451-454.
- Tepper, H.B., Hollis, C.A., Galson, E.C, Sondheimer, E. (1967). Germination of excised *Fraxinus ornus* embryos with and without Phleomicin. *Plant Physiol*, 42, 1493-1496.
- Tylkowski, T. (1991). Mediumless stratification and dry storage of after-ripened seeds of *Fraxinus excelsior* L. in the book *Arboretum Kórnickie 1990*, publ. 1991 pp. 143-152.
- Ulm, R., Nagy, F. (2005). Signalling and gene regulation in response to ultraviolet light. *Current Opinion in Plant Biology*, 8(5), 477-482.
- Urbonavičiūtė, A., Samuolienė, G., Brazaitytė, A., Ulinskaitė, R., Jankauskienė, J., Duchovskis, Žukauskas A. (2008). The possibility to control the metabolism of green vegetables and sprouts using light emitting diode illumination. *SODININKYSTĖ IR DARŽININKYSTĖ*, 27(2), 83-92.
- Van de Walle, C. (1987). Germination uniformity of *Fraxinus excelsior* controlled by seed water content during cold treatment. *Physiologia Plantarum*, 69(4), 645–650.
- Vitousek, P.M., Walker Queit, L.R. (1989). Biological invasion by *Myrica faya*: Plant demography, nitrogen fixation, ecosystem effects. *Ecological Monographs*, 59 (3), 247-265. doi:10.2307/1942601. JSTOR 1942601
- Vitousek, P.M., Whiteaker, L.R., Mueller-Dombois, D., Matson, P.A. (1987). Biological invasion by *Myrica faya* alters ecosystem development in Hawaii. *Science*, 238 (4828), 802-804. doi:10.1126/science.238.4828.802.PMID 17814707.
- Voce, B. (1961). L'attività del Corpo forestale dello Stato nel campo vivaistico. *Monti e Boschi* 12(8/9).

- Walker, L.R.(1990). Germination of Invading Tree species (*Myrica faya*) in Hawaii. *Biotropica*, 22(2), 140-145.
- Walther, G.R. et al. (2002). *Ecological responses to recent climate change. Nature*, 416, 389-395.
- Wang, C.Y., Fu, C.C., Liu, Y.C. (2007). Effects of using light-emitting diodes on the cultivation of *Spirulina platensis*. *Biochemical Engineering Journal*, 37, 21-25.
- Wardle, P. (1961). *Fraxinus excelsior* L. *Journal of ecology*, 49(3), 739-751.
- Way, D.A. (2011). Tree phenology responses to warming: spring forward, fall back?. *Tree Physiology*, 31(5), 469-471.
- Wood, A., Bradbeer, J.W. (1967), *Studies in seed dormancy. New Phytologist*, 66, 17-26.
- Xu, B. (2011). First Report of Pomegranate Wilt Caused by *Ceratocystis fimbriata* in Sichuan Province. *The American Phytopathological Society*, 95(6), 776.
- Yanagi, T., Okamoto, K., Takita, S. (1996). Effect of blue and red light intensity on photosynthetic rate of strawberry leaves. *Acta Hort.* 440, 371-376.
- Zarek, M. (2007). A practical method for overcoming the dormancy of *Taxus baccata* isolated embryos under in vitro conditions. *In vitro cell. Dev. Biol. Plant.*, 43, 623-630.
- Zencirkiran, M., (2010). Determination of native woody landscape plants in Bursa and Uludag. *African J. Biotech.*, 8(21), 5737-5746.
- Zhiri, A., Jaziri, M., Homès, J., Vnhaelen, M., Shimomoura, K. (1994). Factors affecting the in vitro rapid germination of *Taxus* embryos and the evaluation of taxol content in the plantlets. *Plant Cell, Tissue and Organ culture*, 39, 261-263.

