



**UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PALERMO**  
DIPARTIMENTO DEMETRA / FACOLTÀ DI AGRARIA  
Dottorato di ricerca in “*Sistemi arborei agrari e forestali*”

**RICERCHE SU ASPETTI DELLA FISIOLOGIA DEL  
PISTACCHIO (*PISTACIA VERA L.*): ALTERNANZA DI  
PRODUZIONE E PROPAGAZIONE VEGETATIVA**

Settore scientifico disciplinare AGR/03

TESI DI  
**DOTT. GIULIA MARINO**

COORDINATORE DEL DOTTORATO  
**CHIAR.MO PROF. TIZIANO CARUSO**

TUTOR  
**CHIAR.MO PROF. FRANCESCO P. MARRA**

CICLO XXIII

---

DOTTORATO



## Indice

1 - Origine del pistacchio ( <i>Pistacia vera</i> L.) .....	3
2 – Aspetti ecologici.....	4
3 - Aree di diffusione.....	5
4 – Notizie botaniche.....	9
5 - Ciclo biologico .....	11
6 – L’alternanza di produzione.....	12
6.1 - Influenza dell’irrigazione sull’alternanza produttiva.....	15
6.2 - Accumulo e ripartizione della sostanza secca nei rami di pistacchio ..	17
7 - Scopo delle ricerche .....	20
8 - Stima dell’influenza dell’irrigazione sul bilancio del carbonio di un ramo di <i>Pistacia vera</i> L. con software stella. ....	22
8.1 – I modelli di simulazione .....	22
8.2 - I modelli in agricoltura.....	24
8.3 - Tipologie dei modelli di simulazione.....	25
8.4 - Struttura dei modelli utilizzati in agricoltura .....	28
8.5 - Modelli di simulazione della crescita e della ripartizione dei carboidrati .....	30
8.5.1 - Assimilazione del carbonio.....	32
8.5.2 - Respirazione.....	36
8.5.3 - Ripartizione del carbonio .....	38
8.6 – Scopo del lavoro .....	40
8.7 - Materiale e metodo.....	42
8.7.1 - Rilievi meteorologici.....	43
8.7.2 - Campionamento e rilievi .....	43
8.7.3 - Calcolo dell’Absolute Growth Rate.....	45
8.7.4 - Misure degli scambi gassosi .....	45
8.7.5 - Misura del PPFD incidente sulle foglie di un germoglio.....	47
8.7.6 - Respirazione della foglia e dell’infruttescenza .....	49
8.7.7 - Descrizione del modello.....	51
8.8 – Risultati e discussioni .....	56
8.8.1 – Input del modello (dati rilevati sperimentalmente) .....	56

8.8.2 – Output del modello (simulazioni effettuate con il modello) .....	72
8.9 - Conclusioni .....	85
9 - Emissione di germogli epicormici da grosse branche.....	88
9.1 - La propagazione del pistacchio.....	88
9.2 - I portinnesti .....	89
9.3 - La micropropagazione.....	90
9.4 - Cellule competenti .....	92
9.5 - La giovanilità .....	93
9.5 - Giovanilità e propagazione .....	93
9.5 - Cono di giovanilità.....	94
9.6 - Induzione di giovanilità .....	95
9.7 - Forzatura .....	96
9.8 - Forzatura di grosse branche .....	96
9.9 – Scopo del lavoro .....	98
9.10 - Materiale e metodo.....	99
9.11 - Risultati .....	102
9.7 – Conclusioni.....	110
Bibliografia.....	113

## 1 - Origine del pistacchio (*Pistacia vera* L.)

Il primo a redigere una monografia sul genere *Pistacia* è stato Engler (1883); egli classificò otto specie e poche varietà. Più tardi, Zohary (1952) condusse uno studio tassonomico più completo secondo il quale il genere *Pistacia* comprendeva undici specie appartenenti a quattro distinte aree fitogeografiche: Mediterranea, Irano-Turanica, Sino-Giapponese e Messicana. Piante spontanee delle specie *P. terebinthus* L., *P. lentiscus* L., *P. palaestina* Boiss. e *P. atlantica* Desf. sono ancora oggi distribuite, seppur in maniera piuttosto irregolare, in alcune aree del Mediterraneo, soprattutto in quelle più siccitose e meno fertili tra i 28° ed i 42° di latitudine nord.

Fra le dieci specie appartenenti al genere *Pistacia*, l'unica a conservare le caratteristiche primitive del genere (foglie imparipennate, numero minimo di foglioline per foglia, rachide non alato, ecc.) e a produrre frutti eduli, è *Pistacia vera* L.. Da essa sono probabilmente derivate altre specie quali *P. khinjuk* e *P. atlantica* (Zohary, 1952).

Dalla letteratura risulta che *Pistacia vera* era diffusa nell'economia e nella cultura dei popoli orientali sin dall'antichità. Riferimenti a questo frutto sono infatti presenti già nella Bibbia: "Prendete nei vostri bagagli i prodotti scelti del paese e portateli laggiù in dono a quell'uomo: un po' di balsamo, un po' di miele, del dragante, del laudano, dei pistacchi e delle mandorle" (Genesi XLIII, 11). Ciò indica che il pistacchio era già noto agli antichi Ebrei ed era considerato un frutto prezioso.

Vavilov (1951) individua nell'Asia medio-orientale due principali centri di diversificazione genetica di *Pistacia vera* L.: l'areale a sud del Mar Caspio e l'areale compreso fra l'Afghanistan occidentale e il Kirghizistan; centro secondario, più recente, di diversificazione genetica di questa specie sarebbe la Sicilia (Maggs, 1973).

In Italia il pistacchio fu introdotto, secondo quanto scrive Plinio nella sua "Historia Naturalis", nell'anno 30 d.C. ad opera di Lucio Vitellio, governatore generale della Siria durante il periodo di dominazione dell'Impero Romano.

Riguardo all'introduzione del pistacchio in Sicilia non si hanno dati precisi; probabilmente la coltura, già conosciuta, si diffuse maggiormente



durante il periodo della dominazione araba (IX-XI sec. d.C.) (Minà Palumbo, 1882). A conferma di ciò si può notare la somiglianza etimologica del nome dialettale siciliano “fastuca”, il frutto e “fastucara”, la pianta, con il corrispondente termine arabo “fustuq” (Spina, 1982; Caruso e Sottile, 1999). Dall’Italia il pistacchio si diffuse successivamente in Spagna, Francia e nell’Africa settentrionale.

## **2 – Aspetti ecologici**

Sia le specie coltivate che quelle spontanee si rinvencono principalmente in aree temperato-calde comprese fra i 28° e i 42° di latitudine nord. La distribuzione all’interno di queste zone è piuttosto irregolare. I luoghi di origine sono caratterizzati da un clima caldo asciutto nel periodo compreso fra la fioritura e la maturazione (aprile/settembre) e da una piovosità invernale complessivamente modesta (250-400 mm) e concentrata in due o tre mesi (Whitehouse, 1957). Durante il periodo della fioritura, piogge primaverili e venti secchi limitano il processo di impollinazione mentre, durante il periodo di crescita vegetativa e durante la maturazione dei frutti, una elevata umidità dell’aria può provocare l’insorgere di infezioni fungine sia nei frutti che nella vegetazione (Caruso *et al.*, 2008).

Grazie alla sua rusticità il pistacchio è contraddistinto da un’elevata tolleranza a temperature estreme: minime invernali di 20 °C o addirittura di 30 °C sottozero, durante il periodo di riposo vegetativo, e massime estive di 50 °C, purché accompagnate da scarsa umidità atmosferica, non risultano condizionarne la produzione (Khalife, 1959).

La specie presenta un fabbisogno in freddo di 600-1000 Chilling Units, variabile con la cultivar (molto elevato nelle cultivar Halebi in Turchia e Kerman negli Stati Uniti). In inverni miti, in California così come in Sicilia, il pistacchio ha mostrato ritardi nella fogliazione e nella fioritura oltre a malformazioni delle foglie che determinano abbassamenti produttivi (Caruso *et al.*, 2008).

La pianta tollera la salinità sia dei suoli che delle acque (fino a concentrazioni di sodio e di cloro di 20-30 meq/l, boro 4 ppm nel suolo). Infine, grazie alle sue spiccate caratteristiche di specie xerofila, il pistacchio vive e produce anche in zone con piovosità molto ridotta. L'esteso apparato radicale permette infatti alla pianta di adattarsi ad una grande varietà di suoli, ad eccezione di quelli in cui, anche per brevi periodi, vi sia ristagno idrico (Monastra *et al.*, 1987).

### **3 - Aree di diffusione**

La coltura del pistacchio (*Pistacia vera L.*), attualmente, in ragione della grande plasticità ecologica della specie, oltre che nelle zone di origine, i paesi dell'Asia centrale e meridionale (Iran, Afghanistan, Turkestan, Pakistan, India e Turkmenistan), è diffusa anche nei paesi del Bacino del Mediterraneo (Sicilia, Grecia, Turchia, Siria, Libano, Cipro) in seguito alle diverse vicende storiche, economiche dei vari popoli che si sono via via succeduti in questa area (Barone *et al.*, 1996) e negli USA (California, Texas, Arizona) dove è stato l'“USDA plant exploration service” ad introdurre la pianta di pistacchio per la prima volta nel 1890. In California il pistacchio ha assunto interesse colturale soltanto agli inizi degli anni '70 del XX secolo (Hendricks e Ferguson, 1995) con la cultivar Kerman, ottenuta per selezione nell'ambito di semenzali ricavati a partire da frutti di provenienza iraniana (Monastra *et al.*, 1987).

I paesi del Bacino del Mediterraneo costituiscono, dopo l'Iran, il secondo più importante centro di diversità del pistacchio (Padulosi *et al.*, 1998).

Più recente è stata la sua diffusione in Australia ad opera del C.S.I.R.O. (Maggs, 1982).

Secondo le rilevazioni statistiche della FAO negli anni 2000-2005, la superficie mondiale investita a pistacchio ha subito un incremento del 20%, passando da 403.930 ha nel 2000 ai 484.319 ha nel 2005 (Tab. 1).

Il 68% della superficie mondiale coltivata a pistacchio è localizzata in Iran con i suoi 332.000 ha. Negli Stati Uniti, nel periodo in considerazione, si è osservato un incremento delle superfici del 41%, passando da 30.000 ha nel 2000 a 42.000 ha nel 2005, con un'incidenza pari all'8,8% della superficie mondiale. La Turchia vede ridotta la propria incidenza mondiale, passando dal 9% nel 2000, all'8% nel 2005. Anche la Cina mostra un certo interesse verso la coltivazione del pistacchio con i suoi 16.000 ha, coltivati nel 2005, ed un incremento del 33% rispetto al 2000. La Grecia, al contrario degli altri paesi produttori, vede diminuire del 22% le superfici investite a pistacchio, passando da 4.900 ha nel 2000, a 3.800 ha nel 2005.

**Tabella 1 – Evoluzione delle superfici investite a pistacchio nei vari paesi produttori (Elaborazione su dati FAOSTAT, *Agricultural data*, varie annate).**

<b>Paesi</b>	<b>2000 (ha)</b>	<b>2005 (ha)</b>
Iran	274.730	332.590
Italia	3.600	3.600
Siria	18.500	22.000
Turchia	36.350	38.600
USA	30.200	42.530
Cina	12.000	16.000
Grecia	4.900	3.840
Altri	23.650	24.360
Mondo	403.930	484.319

Analogamente a quanto osservato per le superfici, anche le produzioni mondiali di pistacchio hanno subito un forte incremento a partire dagli anni 80. Infatti si è passati da 427.000 tonnellate nel quadriennio 1997-2000, a 491.000 tonnellate nel quadriennio 2002-2005, con un incremento del 15% (Tab. 2).

Al primo posto troviamo l'Iran, che da solo detiene il 45% della produzione mondiale. In questo paese la coltivazione del pistacchio possiede una certa rilevanza, tanto da costituire un organismo di ricerca statale, il "*Pistachio Research Institute*". Gli Stati Uniti, con più del 24% della produzione mondiale (119.000 tonnellate), hanno fatto registrare nel 2005 un incremento della produzione del 50% rispetto al quadriennio 1997-2000, dovuto soprattutto alle evoluzioni della ricerca scientifica. In tale contesto

l'Europa (Italia e Grecia) con un'incidenza mondiale del 2,1%, ha visto diminuire nel corso del periodo in esame le proprie produzioni.

**Tabella 2 – Evoluzione delle produzioni mondiali di pistacchio nei principali paesi produttori (Elaborazione su dati FAOSTAT, *Agricultural data*, varie annate).**

<b>Paesi</b>	<b>1997/00 tonnellate</b>	<b>2000/05 tonnellate</b>
Iran	215.250	223.660
Italia	2.732	2.060
Siria	33.790	50.710
Turchia	55.500	53.750
Usa	83.297	119.507
Cina	26.750	31.000
Grecia	8.945	8.420
Altri	1.615	1.527
Mondo	427.879	491.414

La produzione di pistacchio in Italia raggiunge interesse economico solamente in Sicilia (Barone e Marra, 2004), dove è caratterizzata da modalità d'impianto del tutto particolari, con piantagioni naturali, artificiali o miste che insistono su terreni lavici e ricchi di scheletro, pressoché inutilizzabili per altre finalità produttive agricole e per lo più gestite in asciutto o effettuando irrigazioni di soccorso (500-1000 m<sup>3</sup>/ ha/ anno).

In tali contesti territoriali il terebinto (*Pistacia terebinthus* L.) cresce spontaneamente e viene utilizzato come portainnesto per il *Pistacia vera*. Il pistacchio riveste, inoltre, un importante valore sia ambientale che paesaggistico e soprattutto economico, tanto da rientrare nelle iniziative promosse a sostegno dello sviluppo rurale dalla Politica Agricola Comune (PAC).

Le principali zone di coltivazione dell'Isola sono localizzate in due areali ben definiti, e precisamente nel versante orientale, in provincia di Catania, e nel versante centro-meridionale, nelle province di Agrigento e Caltanissetta (Barone *et al.*, 1985). Dai dati rilevati dall'ISTAT, relativi alle superfici investite a pistacchio in Sicilia nel periodo 2000/05, si è registrato un leggero decremento delle superfici (-4%) nella provincia Agrigento, che contribuisce per il 3% sul totale regionale, mentre, la provincia di Catania risulta essere

quella maggiormente interessata dalla coltivazione con 3.160 ettari pari ad oltre l'86% dei pistacchieti regionali. La provincia di Caltanissetta incide con il 10,4%, pari a 380 ettari, e, nel 2005, ha visto incrementare il suo peso relativo (+6%) rispetto al 2000. Poco rilevante risulta il contributo fornito dalla provincia Palermo (0,3% del totale regionale) che, nell'ultimo sessennio, mantiene pressoché invariata la superficie investite a tale coltura.

**Tabella 3 – Evoluzione (1984-2005) delle superfici (ha) investite a pistacchio nelle province siciliane.**

<b>Provincia</b>	<b>1984</b>	<b>1998</b>	<b>1999</b>	<b>2000</b>	<b>2001</b>	<b>2002</b>	<b>2003</b>	<b>2005</b>
Catania	3.540	3.160	3.160	3.160	3.160	3.160	3.160	3.160
Agrigento	315	115	115	115	114	115	112	110
Caltanissetta	225	360	360	360	360	360	340	380
Palermo	24	7	8	8	8	8	8	10
Tot. Sicilia	4.104	3.642	3.643	3.643	3.642	3.643	3.620	3.660

Per quanto riguarda la produzione di pistacchio in Sicilia sono state elaborate le medie quadriennali relative agli anni 1997-2000 e 2002-2005, in relazione alle caratteristiche di alternanza produttiva della coltura. Il dato regionale mostra un decremento del 35% nel complesso delle produzioni realizzate, le quali passano dalle 1.976 tonnellate nel quadriennio 1997/2000 alle 1.283 tonnellate nel quadriennio 2002/2005. Dall'analisi dei dati provinciali, si evince, a conferma di quanto detto in merito alle superfici, che in Sicilia il contributo maggiore è dato dalla provincia di Catania che, con 1.093 tonnellate nel periodo 2002/2005, detiene oltre l'85% delle produzioni regionali; pur tuttavia è da rimarcare il vistoso calo produttivo rispetto al quadriennio precedente durante il quale erano stati prodotti oltre 1.800 tonnellate di pistacchi, pari ad oltre il 91% del totale dell'Isola. Poco rilevante è il peso delle province di Caltanissetta (6,5%) ed Agrigento (6,2%) che incidono, nel quadriennio 2002/2005, per il 12,7% sul totale della produzione pistacchicola siciliana.

**Tabella 4 – Evoluzione (1997-2005) delle produzioni di pistacchio (q) nelle province siciliane.**

<b>Provincia</b>	<b>1997</b>	<b>1998</b>	<b>1999</b>	<b>2000</b>	<b>2001</b>	<b>2002</b>	<b>2003</b>	<b>2005</b>
Catania	18.050	3.160	25.000	26.000	15.800	316	18.000	10.930
Agrigento	690	706	678	692	680	683	785	800
Caltanissetta	810	1008	672	750	896	638	900	830
Palermo	210	245	140	240	240	240	240	270
Tot. Sicilia	19.760	5.119	26490	27.682	17.616	1.877	19.925	12.830

#### **4 – Notizie botaniche**

Il pistacchio (*Pistacia vera* L.) appartiene all'ordine *Terebinthales*, famiglia delle *Anacardiaceae* ed è l'unica delle numerose specie ascritte al genere *Pistacia* che produce frutti eduli. Molte delle altre specie, nelle diverse aree di origine e diffusione, vengono utilizzate come portinnesti del *P. vera* (Woodroof, 1967). L'albero di pistacchio cresce lentamente, è molto longevo (plurisecolare) e, nelle situazioni pedoclimatiche più favorevoli, la chioma può raggiungere 6-7 metri di altezza ed altrettanti di larghezza. L'habitus vegetativo della pianta è sensibilmente influenzato dalla accentuata dominanza apicale. L'emissione di nuova vegetazione si ha infatti quasi esclusivamente attraverso il germogliamento della gemma apicale di ciascun ramo. Di conseguenza, quando la pianta viene lasciata vegetare liberamente presenta una chioma relativamente rada che assume una conformazione globosa-espansa e portamento procombente, anche per effetto delle foglie e dei frutti (Di Marco e Caruso, 1988).

Il colore della corteccia è grigio cenere per il fusto e le branche, mentre per i rametti di un anno tende al rossiccio. Le foglie sono caduche, composte, imparipennate, costituite da 3-5 foglioline ovali, di colore verde, vellutate in giovane età, glabre e coriacee a sviluppo completo. Ad ogni foglia è sottesa una gemma ascellare.

Tutte le specie del genere *Pistacia* sono accomunate dal dioicismo e dalla presenza di sostanze resinose. L'impollinazione può essere assicurata da piante maschili di *Pistacia vera* o da piante spontanee di altre specie del genere (*P. terebinthus* L.; *P. atlantica* Desf.; *P. integerrima* Stewart). Gli alberi maschili sono riconoscibili da quelli femminili, oltre che dall'infiorescenza, anche dal maggior vigore, dal portamento più assurgente e per le foglie più grandi (Di Marco e Caruso, 1988). I fiori femminili sono apetalati, riuniti in infiorescenze ascellari a pannocchia portate sui rami di un anno. Il numero di fiori per ciascuna di esse, in genere, è compreso tra 100 e 400, ma di questi solo il 15-20% circa divengono frutti maturi (Caruso *et al.*, 1987). Ciascun fiore presenta un ovario molto appariscente, con un solo ovulo, stigma trifido, arcuato e papilloso. I fiori maschili, anch'essi in infiorescenze (cimosi), sono provvisti di 5-7 brattee disposte su piani diversi e di 5 stami con grosse antere giallo-citrine, che deiscono longitudinalmente emettendo abbondante polline.

I frutti, riuniti in grappoli, sono costituiti da una drupa monosperma, ovale, pedunculata e divisa in due valve. Il mallo (epicarpo e mesocarpo), è sottile, di colore variabile dal bianco-roseo al giallo-crema, al rosso-violaceo. L'endocarpo è legnoso, a maturità può essere deiscente o no in dipendenza dalla cultivar e dal carico di frutti, anche se il reale meccanismo che governa tale fenomeno non è pienamente conosciuto (Freeman e Ferguson, 1995). La deiscenza comincia all'apice del frutto e prosegue lungo le linee di sutura; il fenomeno ha inizio almeno un mese prima della maturazione del frutto. L'embrione, che costituisce la frazione edule del frutto, è provvisto di due cotiledoni molto sviluppati che, sempre in relazione alla cultivar e all'areale di provenienza delle stesse, possono avere colore variabile dal verde al giallo-verde. Il carattere "cotiledoni verdi" è spesso associato al carattere "indeiscenza" mentre le varietà a "cotiledoni gialli" tendono a fornire frutti deiscenti. Per il consumo diretto i frutti deiscenti sono preferiti a quelli indeiscenti.

Il potere calorico dei frutti di pistacchio è elevato per il notevole contenuto in lipidi e proteine. I frutti di pistacchio sono ricchi in sostanze estrattive inazotate, vitamine, glucidi, minerali, acidi grassi essenziali e sostanze antiossidanti.

L'ingestione di 100 g di semi garantisce un potere calorico di 590-630 calorie, 19-20 g di proteine, 54-56 g di grassi, 19-20 g di carboidrati totali, 2 g di fibre e 2,7 di ceneri (Duke, 1929; Tous e Ferguson, 1996).

## **5 - Ciclo biologico**

I primi segni di ripresa dell'attività della pianta sono evidenti alla fine di marzo con la schiusura delle gemme a fiore, seguita subito dopo dalla schiusura delle gemme vegetative poste all'estremità dei rami di un anno. Segue, dunque, la formazione delle infiorescenze e quindi la fioritura, che comincia generalmente i primi di aprile per le cultivar maschili e in aprile inoltrato sino a maggio per quelle femminili.

Con l'inizio della fioritura coincide l'inizio dell'accrescimento del germoglio che è molto intenso nelle prime settimane ma che poi si va gradatamente attenuando fino ad arrestarsi del tutto 30-35 giorni circa dopo la piena antesi (Barone *et al.*, 1994). All'ascella delle foglie si differenziano, durante i mesi di maggio e giugno, le gemme a fiore mentre, una singola gemma vegetativa viene differenziata all'apice del germoglio. Da studi condotti in Sicilia su piante adulte di pistacchio è emerso che nel medesimo intervallo di tempo durante il quale avviene gran parte dello sviluppo del germoglio si verifica un'abbondante colatura che mediamente interessa circa il 60% dei fiori; nelle settimane successive all'allegagione, inoltre, si registra una cascola di frutticini pari al 55% circa di quelli allegati. In genere, quindi, soltanto il 15-20% circa di frutticini allegati giungono a maturazione (Caruso *et al.*, 1987).

L'accrescimento del frutto consta di tre fasi, due delle quali relativamente intense, separate da una di minore intensità (Crane e Al-Shalan, 1974; Hendricks e Ferguson, 1995). In un primo stadio, che va dalla fine di aprile a metà maggio, si verifica il rapido accrescimento dell'endocarpo, ma non del seme; nella fase successiva l'endocarpo comincia lentamente ad ingrossarsi ed ha inizio la sua lignificazione; segue infine, dall'inizio di luglio a settembre, un



terzo momento durante il quale si accrescono i tegumenti dell'embrione, la nucella ed i cotiledoni (Crane e Iwakiri, 1981). La maturità fisiologica è segnalata dalla facile separazione del mallo dal guscio.

A maturità completa il guscio può essere totalmente, parzialmente o non deiscende e questo in dipendenza innanzitutto della cultivar ed in secondo luogo delle condizioni climatiche (Crane e Takeda, 1979) e nutrizionali (Pontikis, 1986).

Il pistacchio, dunque, nel corso di una stagione vegetativa, svolge al contempo due cicli biologici, uno in cui si estrinseca la produzione dell'anno, che inizia con l'antesi e si conclude con la maturazione dei frutti, e l'altro di accrescimento vegetativo, induzione e successiva differenziazione delle gemme a fiore per la produzione dell'anno successivo.

## **6 – L'alternanza di produzione**

L'alternanza di produzione, tipica di alcune specie arboree da frutto delle zone temperate, consiste in una variazione ciclica, in genere biennale, della entità di fruttificazione. Questo fenomeno è stato studiato nel mandorlo (Milella e Agabbio, 1978), melo (Beattie e Folley, 1978; Monselise e Goldschmidt, 1982; Williams, 1989), avocado (Chandler, 1950; Monselise e Goldschmidt, 1982), agrumi (Goldschmidt e Monselise, 1977; Monselise *et al.*, 1981), mango (Chacko, 1986), olivo (Monselise e Goldschmidt, 1982; Stutte e Martin, 1986), pecan (Wetzstein e Sparks, 1986) e nel pistacchio (Crane e Nelson, 1971; Monselise e Goldschmidt, 1982).

Studi sull'argomento hanno dimostrato che l'alternanza di produzione, nelle diverse specie, si può manifestare:

- con la riduzione delle gemme indotte e differenziate a fiore (Chan e Chan, 1967; Couranjon, 1989; Monselise e Goldschmidt, 1982; Post e Stam, 1983; Stutte e Martin, 1986);

- con una minore crescita vegetativa che può ridurre il numero potenziale di gemme a fiore prodotte (Addicott e Lyons, 1969; Couranjon, 1989; Crane e Al-Shalan, 1977);

- con l'abscissione delle gemme durante il rapido accrescimento dell'embrione (Crane, 1984; Crane e Iwakiri, 1987; Crane e Nelson, 1971; Monselise e Goldschmidt, 1982; Porlingis, 1974).

Nel pistacchio il meccanismo che regola l'alternanza di produzione è molto complesso ed articolato; le modeste produzioni che si ottengono l'anno successivo ad uno di elevata carica, infatti, sono determinate dalla cascola estiva delle gemme a fiore piuttosto che dalla loro mancata induzione e differenziazione morfologica (Caruso *et al.*, 1993; Crane e Nelson, 1971). Essendo il pistacchio originario di zone aride o semi-aride, caratterizzate da una scarsa piovosità estiva, tutte le principali fasi vegetative e riproduttive vengono portate a termine dalla pianta in un breve periodo, compreso tra la seconda decade di marzo e la fine di maggio; la restante parte della stagione è quasi esclusivamente dominata dall'accrescimento e dalla maturazione dell'embrione. L'abscissione delle gemme a fiore comincia proprio alla fine di giugno, ovvero, qualche giorno dopo l'inizio della fase di attiva proliferazione cellulare dello zigoto (Porlingis, 1974), si intensifica a luglio ed agosto, durante il rapido accrescimento dell'embrione, e si protrae fino alla maturazione (settembre). Tuttavia, i processi che innescano l'alternanza di produzione in questa specie non sono ancora completamente chiari e le ipotesi prese in considerazione sono due, delle quali una vede coinvolti fattori nutrizionali e l'altra fattori ormonali.

In base all'ipotesi nutrizionale sarebbe la competizione dell'embrione in accrescimento per l'utilizzo dei metaboliti, carboidrati e azoto, a determinare l'abscissione delle gemme a fiore (Crane, 1984; Crane *et al.*, 1973; Crane e Nelson, 1971, 1972; Garcia-Luis *et al.*, 1988; Sparks e Davis, 1974).

Alle sostanze ormonali sono stati attribuiti due differenti meccanismi d'azione: il richiamo, da parte dei frutti, di un inibitore dell'abscissione delle gemme a fiore, sintetizzato nelle foglie, e la trasmissione, da parte del frutto, di un promotore dell'abscissione delle gemme a fiore (Agrawal *et al.*, 1980; Chacko *et al.*, 1972; Crane e Iwakiri, 1987; Crane e Nelson, 1972).

Osservazioni effettuate da Crane e Nelson negli anni 70 a sostegno della teoria nutrizionale si basavano sull'evidenza che la cascola avveniva in coincidenza della massima velocità di accrescimento dell'embrione e che, in rami sottoposti a decorticazione anulare, si riusciva a mantenere la cascola su livelli accettabili e paragonabili a quelli di rami privati delle infruttescenze.

Tuttavia, la possibilità di una interazione dei due meccanismi, nutrizionale e ormonale, è emersa da prove sperimentali che dimostrarono da un lato, come già 20 frutti per ramo, valore ben al disotto del numero medio di frutti portato da ogni singolo rametto (circa 60), determinavano una cascola prossima al 100% (Crane *et al.*, 1973) e dall'altro, come interventi differenziati di defogliazione su singole branchette non causavano un aumento della percentuale di cascola (Porlingis, 1974). Inoltre, Crane e collaboratori (1976) non avevano osservato differenze sensibili confrontando il contenuto di carboidrati e azoto nei tessuti di branche cariche e scariche. D'altro canto, esperimenti condotti in seguito da Takeda e Crane (1980) sui livelli dell'acido abscissico (ABA) nei frutti e nelle gemme a fiore in accrescimento, non avevano evidenziato alcuna relazione tra i livelli dell'ormone e la cascola. Allo stesso tempo veniva, altresì, confermato (Takeda *et al.*, 1980) che le gemme a fiore in accrescimento competevano piuttosto modestamente con i frutti per i prodotti della fotosintesi e che le gemme sulle branche senza frutti ricevevano una quantità di fotoassimilati doppia rispetto a quelle dei rami con frutti. In seguito, Caruso e collaboratori (1993), asportando in misura differente gli organi riproduttivi da varie piante adulte di pistacchio della cultivar Bianca, hanno dimostrato chiaramente che la cascola delle gemme a fiore era positivamente correlata con la percentuale di frutti lasciati sull'intera pianta, rimarcando così come la competizione fra gli organi vegetativi e quelli riproduttivi fosse un fenomeno che interessava l'albero nel suo complesso piuttosto che le singole branche. Più recentemente, in un'approfondita indagine condotta in Sicilia, su piante di pistacchio (cv. Bianca), circa gli effetti della fruttificazione sull'accumulo e la ripartizione della sostanza secca nei diversi organi di piante in regolare ciclo di alternanza produttiva (cariche/scariche) e degemmate per due anni consecutivi, Marra e collaboratori (1998) hanno mostrato, confermando i risultati ottenuti precedentemente da Barone *et al.*,

(1994), che la presenza dell'infruttescenza influenza precocemente, in maniera sfavorevole, l'accrescimento, in termini di sostanza secca, di tutti gli altri organi del germoglio. Per di più, nella stessa ricerca veniva riportato che le tesi defruttificate per due anni successivi raggiungevano un maggiore potenziale di crescita rispetto a quelle lasciate nel normale ciclo biennale di produzione, sottolineando che le riserve reintegrate durante il regolare anno di scarica potevano non essere sufficienti per consentire la piena espressione del potenziale di crescita. Questi risultati rimarcano, inoltre, il grande ruolo potenzialmente giocato dalle riserve sia nelle fasi iniziali sia in quelle finali di accrescimento del frutto.

### **6.1 - Influenza dell'irrigazione sull'alternanza produttiva**

Il pistacchio è considerata una specie resistente all'aridità ed alla salinità (Behboudian *et al.*, 1986; Rieger, 1995) ed in tutto il bacino del mediterraneo è principalmente coltivata in asciutto (Crane e Iwakiri, 1981). Grazie ad un apparato radicale che riesce a far fronte a potenziali idrici del suolo altamente negativi, il pistacchio è in grado di mantenere, sotto stress idrico, dei livelli produttivi superiori a quelli di altre specie arboree da frutto (Spiegel-Roy *et al.*, 1977). Nonostante ciò, l'irrigazione per il pistacchio è fattore di condizionamento dello sviluppo e della produttività.

In condizioni di ottima disponibilità idrica, la quantità di acqua che può essere traspirata dal pistacchio è sensibilmente superiore rispetto ad altri alberi da frutto e può raggiungere, nei mesi estivi, valori che si aggirano intorno ai 200 l/giorno per pianta adulta (Goldhamer *et al.*, 1985).

Analizzando i risultati emersi da studi condotti in diverse aree di coltivazione del pistacchio nel mondo è emerso che l'utilizzo dell'irrigazione influisce positivamente sulle rese sia in termini quantitativi che in termini qualitativi (Goldhamer, 2005; Polito e Pinney, 1999).

Prove condotte in Turchia hanno dimostrato, su cultivar Kirmizi/*P. vera*, il ruolo positivo dell'irrigazione sull'incremento delle rese (+74%), del grado di deiscenza (+56%), e della percentuale di frutti pieni (+18%) (Ak e

Agackesen, 2006). Risultati simili sono emersi da ricerche condotte in Spagna sulla cultivar *Kerman* innestata su terebinto (Gijon *et al.*, 2009).

Kanber *et al.* (1993) hanno registrato un incremento del 50% nelle produzioni delle piante in seguito al trattamento irriguo oltre che una minore percentuale di frutti vuoti (37%) ed una maggiore resa in sgusciato.

Oltre che sulla produzione dell'anno, diversi autori indicano un'influenza dello stato idrico delle piante sulle produzioni dell'annata successiva (Goldhamer, 1995; Kanber *et al.*, 1993).

Gli studi effettuati da Goldhamer *et al.* (1985) riportano una riduzione delle produzioni del 50% in seguito ad una annata di forte stress idrico rispetto alle piante irrigate.

Sebbene l'alternanza produttiva sia geneticamente controllata (Kanber *et al.* 1993) è ormai accertato che alcuni fattori esterni come impollinazioni e fertilizzazioni inadeguate, metodi di raccolta tradizionali, la mancanza di pratiche colturali e prolungati periodi di stress idrico possono accentuare questo fenomeno (Geurts, 1982).

Diversi aspetti della crescita di una pianta risultano sensibili agli stress idrici. A livello cellulare, bassi potenziali idrici fogliari influenzano l'espansione cellulare, la sintesi di proteine e l'attività di alcuni enzimi, la regolazione stomatica, gli scambi gassosi con l'ambiente, i processi di traslocazione e la sintesi della parete cellulare (Hsiao, 1973; Kramer, 1983; Khanna-Chopra *et al.*, 1980).

A conferma di ciò, ricerche condotte dal Dipartimento di Colture Arboree dell'Università di Bari sulla cultivar Larnaka hanno evidenziato che l'irrigazione induce un incremento nel tasso di assimilazione fogliare di CO<sub>2</sub> (De Palma e Novello, 1998).

Tutto ciò si traduce in una riduzione generale dei tassi di crescita delle piante (Sepaskhah e Maftoun, 1981; Sepaskhah e Karimi-Goghary, 2003, 2005; Tajabadi Pour *et al.*, 2005) ed in cambiamenti nella ripartizione dei carboidrati (Jones *et al.*, 1981; Kramer, 1983).

Molti lavori riportano un diminuzione della produzione di sostanza secca in seguito a stress idrici in piante erbacee (Kramer, 1983).

In particolare lo stress idrico riduce il tasso di crescita e l'emissione di nuovi germogli (Goldhamer *et al.*, 1987; Hoogenboom, 1987), l'espansione fogliare (Boyer, 1968; Hsiao, 1973) la dimensione ed il peso dei frutti. Inoltre la mancata irrigazione sembra incrementare la filloptosi a fine stagione con forti ripercussioni sulla produzione dell'anno successivo.

Come afferma Bilgen nel 1979 l'irrigazione rappresenta una delle più importanti tecniche preventive che devono essere considerate ed applicate per ridurre l'irregolarità produttiva dovuta ai fenomeni di alternanza.

Tuttavia, nelle condizioni colturali prevalenti in Sicilia il pistacchio è ancora coltivato in asciutto o al più con irrigazioni di soccorso (500-1.000 m<sup>3</sup>/ha/anno). Valori anche di poco superiori (1.000-1.500 m<sup>3</sup>/ha/anno) sono ritenuti già sufficienti per migliorare le performance produttive delle piante in Sicilia (Caruso e Motisi, 1996).

## **6.2 - Accumulo e ripartizione della sostanza secca nei rami di pistacchio**

La crescita e la produttività di una pianta sono fortemente condizionate dalla produzione di fotoassimilati da parte delle foglie e dalla loro ripartizione tra i vari organi vegetativi, produttivi e di riserva della pianta (Daie, 1985; Gifford e Evans, 1981; Watson, 1984). In teoria, infatti, tanto maggiore è l'efficienza fotosintetica e l'investimento dei metabolici in organi utili (di riserva e riproduttivi), tanto più efficace è il sistema.

I fotoassimilati vengono prodotti da tutti quegli organi, definiti "source", che hanno capacità fotosintetica; mentre le cellule, i tessuti e gli organi non verdi, che importano gli assimilati o che non ne producono a sufficienza per sostenere il loro fabbisogno di accrescimento e di accumulo, sono considerati "sink" (Venkateswarlu e Visperas, 1987).

La relazione tra source e sink gioca un ruolo fondamentale nell'utilizzazione dei carboidrati nelle piante da frutto. La forza del source viene definita come la capacità dei siti di fissazione fotosintetica di sintetizzare

ed esportare nuovi prodotti, mentre la forza del sink come la capacità potenziale dei tessuti di accumulare o utilizzare i metaboliti (Faust, 1989).

La ripartizione dei carboidrati, infatti, segue una scala di priorità in cui al primo gradino si trovano i frutti e poi, nell'ordine, le giovani foglie, i fiori e le radici (gerarchia dei sink).

Inoltre, fattori come le relative dimensioni, lo stadio ontogenetico, la posizione rispetto al source e la disponibilità di risorse sono importanti nel determinare la forza di un sink rispetto l'intera pianta (Ho, 1988; 1980; Banghert e Ho, 1984).

Nel corso della stagione muta non solo la funzione di alcune parti della pianta che da sink passano a source (Wardlaw, 1990), ma anche la gerarchia con la quale i metabolici sono allocati nei diversi organi.

Nel pistacchio, così come in tutte le specie arboree a foglia caduca, la ripresa vegetativa, dal punto di vista energetico, è sostenuta dalle sostanze di riserva. Durante questa prima fase di crescita, infatti, gli organi di riserva rappresentano un source mentre le foglioline, ancora nelle prime fasi di crescita e dunque eterotrofe, un sink.

Diversi studi, effettuati su piante decidue di zone temperate, hanno evidenziato un abbassamento del livello dei carboidrati di riserva delle branche in corrispondenza del flusso di crescita vegetativo primaverile, fino ad un valore minimo ad inizio estate, subito seguito da una risalita a fine estate/inizio autunno, prima dell'entrata in riposo invernale (Kozłowski e Keller, 1966; Kramer e Kozłowski, 1979; Oliveira e Priestly, 1988; Kozłowski, 1992).

Nel pistacchio, infatti, la fruttificazione condiziona fortemente i processi di crescita del ramo e di tutte le sue parti. Da una analisi effettuata da Nzima *et al.* (1997a) emerge un incremento nella concentrazione di amido e zuccheri solubili in rami di pistacchio subito dopo la fioritura, sia nelle piante cariche che in quelle scariche, seguito da un marcato declino negli alberi in carica circa 100 GDPF, in coincidenza con lo sviluppo dell'embrione all'interno del frutto.

Durante le prime fasi di sviluppo dei frutti le riserve della pianta e le condizioni climatiche non ancora limitanti consentono, generalmente, lo sviluppo contemporaneo dell'apparato fotosintetico e degli organi di fruttificazione dell'anno in corso e dell'anno successivo (Marra, 1998). Con

l'avanzare della stagione produttiva e con l'intensificarsi dei ritmi di crescita dell'embrione, soltanto i sink più forti, ovvero i frutti, riescono ad avere la meglio nella competizione per i fotoassimilati di nuova sintesi.

I “nutrienti” necessari per portare a termine i processi di maturazione vengono dunque richiamati dalle riserve fino ad allora costituite e precocemente sottratti ad altri organi quali, per esempio, foglie e gemme a fiore (sink deboli).

Questo viene confermato dall'entità di sostanza secca accumulata complessivamente nella pianta e dalla sua ripartizione tra organi vegetativi e riproduttivi (rami, foglie, gemme, frutti) (Barone *et al.*, 1994).

Analogamente, nelle gemme a fiore degli alberi in fruttificazione, proprio per la modesta forza di attrazione di questi organi nei confronti dei fotoassimilati dell'anno, viene accumulata una quantità di amido di molto inferiore a quella riscontrata nelle gemme a fiore delle piante senza frutti (Marra *et al.*, 1998).

Il tasso di cascola delle gemme a fiore è infatti correlato positivamente col numero di frutti (Porlingis, 1974, Crescimanno *et al.*, 1987; Wolpert e Ferguson, 1990; Caruso *et al.*, 1992) e negativamente con il livello di carboidrati disponibili nella pianta (Crane *et al.*, 1973; Crane e Al-Shalan, 1977; Takeda *et al.*, 1980; Marra *et al.*, 1998; Spann *et al.*, 2008), a conferma della forte competizione tra organi per le risorse disponibili.

Da attribuire alla fruttificazione è anche il minore sviluppo complessivo (in termini di sostanza secca, superficie e peso specifico) e la ridotta efficienza fotosintetica delle foglie delle piante cariche rispetto a quelle prive di frutti (Marra *et al.*, 1998).

Pertanto nel bilancio dell'intera stagione vegetativa, le piante in fruttificazione, investendo la maggior parte del carbonio utilizzabile nella produzione di frutti, non riescono più a sostenere né la crescita e neanche la funzionalità dei rimanenti organi vegetativi e riproduttivi che si disarticolano e cadono precocemente.

La produzione dell'anno successivo viene dunque compromessa non solo in maniera diretta (mancanza di gemme a fiore) ma anche indirettamente, attraverso il completo drenaggio delle riserve disponibili nella pianta. Inoltre,



la precoce senescenza delle foglie impedisce lo svolgersi della fase finale di accumulo di fotoassimilati negli organi fissi della pianta per la formazione delle riserve utili per la ripresa vegetativa dell'annata successiva.

Nzima *et al.* (1997a) hanno osservato un limitato incremento nella concentrazione degli zuccheri solubili e dell'amido in rami carichi in seguito alla maturazione dei frutti. Rosecrance *et al.* (1998) e Weinbaum *et al.* (1994), tramite analisi effettuate su branche di piante in riposo invernale in seguito ad una stagione di carica, hanno registrato, un quantitativo nettamente minore di amido rispetto a quelle che hanno appena ultimato una stagione di scarica, suggerendo, per l'appunto, che l'accumulo di amido nelle fasi finali della stagione è poco significativo durante l'anno di carica.

In particolare, le foglie dei germogli in produzione, grazie alle risorse accumulate l'anno precedente, si espandono più rapidamente di quelle dei rami scarichi ma, probabilmente a causa del depauperamento di carboidrati ed elementi minerali esercitato dai frutti nella fase finale di crescita, ingialliscono e cadono precocemente (Weinbaum *et al.*, 1994a).

L'alternanza produttiva nel pistacchio risulta quindi essere fortemente correlata al bilancio annuale delle riserve ed alla mobilitazione dei carboidrati (Spann *et al.* 2008).

## **7 - Scopo delle ricerche**

Negli ultimi 30 anni la produzione mondiale ed i consumi pro-capite di pistacchio hanno fatto registrare un forte incremento in relazione all'ampliamento della gamma di utilizzazione del prodotto, allo sviluppo dei redditi, ma anche ai cambiamenti nei gusti e nelle preferenze dei consumatori.

L'aumento d'interesse verso questa specie è dovuto anche al fatto che il pistacchio, oltre ad essere una pianta capace di vivere in condizioni pedoclimatiche difficili, da un punto di vista economico rappresenta, tra le colture arboree da frutta secca, una delle specie più redditizie.

Nonostante la modernizzazione che ha recentemente interessato il comparto pistacchicolo, l'estensione della pistacchicoltura su territori più ampi

è al giorno d'oggi limitata a causa delle forti difficoltà legate alla propagazione vegetativa di questa specie nonché alla sua spiccata tendenza all'alternanza di produzione.

Queste problematiche sono dovute in parte alla natura fisiologica della pianta e per il resto alla configurazione tecnica, colturale ed ambientale delle tradizionali aree pistacchicole.

Soprattutto nel nostro paese, il pistacchio, a causa della sua rusticità, è stato da sempre relegato in situazioni colturali di estrema marginalità, poco adattabili alla meccanizzazione, dove spesso risulta difficile l'esecuzione delle pratiche colturali più essenziali (Barone *et al.* 1985). In queste aree la coltivazione avviene rigorosamente in asciutto ed il terebinto, grazie alla sua spiccata frugalità, è il portinnesto più utilizzato (Caruso, Motisi e Barone, 1990).

Questo modello colturale di tipo tradizionale si traduce in un allungamento del periodo improduttivo delle piante che entrano in produzione dopo 15-20 anni dalla messa a dimora ed in un'estremizzazione dei fenomeni di alternanza produttiva.

Nonostante i forti costi di produzione determinati dalle suddette condizioni colturali rendano difficile la competizione con gli altri paesi, il pistacchio siciliano, grazie alle sue particolari caratteristiche pomologiche ed organolettiche, è particolarmente ricercato e rientra in un mercato di nicchia che rende possibile la vendita a prezzi più elevati rispetto a quelli medi internazionali.

Alla luce di tutto ciò si è deciso di approfondire gli aspetti fisiologici legati all'alternanza di produzione ed alla propagazione vegetativa del pistacchio per rendere questa coltura più competitiva a livello internazionale.

## **8 - Stima dell'influenza dell'irrigazione sul bilancio del carbonio di un ramo di *Pistacia vera* L. con software stella.**

### **8.1 – I modelli di simulazione**

L'avvento dei computer ha prodotto cambiamenti rilevanti in molti aspetti dell'attività scientifica e della ricerca.

La simulazione e la modellistica rappresentano, da un punto di vista scientifico, una delle più importanti applicazioni dei computer.

Un modello di simulazione al computer è uno strumento per l'analisi dei sistemi che tenta di rappresentare il comportamento dei sistemi stessi attraverso un certo numero di equazioni e algoritmi logici, codificati in un linguaggio di programmazione.

Purtroppo, al giorno d'oggi, l'applicazione dei modelli di simulazione a tutte quelle discipline legate allo studio di sistemi biologici come le scienze agrarie è stata meno rilevante.

La ragione di ciò è data dalle complesse interazioni tipiche di questi sistemi, dalla mancanza di una comprensione completa delle leggi che governano il loro comportamento e dalla natura interdisciplinare delle problematiche relative che spaziano dalla fisica alla chimica, dalla matematica alla biologia, dall'informatica alla statistica e ad altre ancora.

Secondo una definizione di Banks e Carson (1984), un sistema è un gruppo di elementi che sono uniti insieme in una qualche interazione o interdipendenza finalizzata ad ottenere un determinato scopo. Leffelaar e Ferrari (1989) hanno invece definito un sistema come una parte di realtà che contiene elementi interrelati. Come discusso da Thornley e Johnson (1990), i sistemi biologici sono sistemi gerarchici caratterizzati da numerosi livelli di organizzazione.

Esempi di sistemi biologici vanno dagli organuli delle cellule di una pianta al sistema respiratorio di un animale o ad un sistema di simulazione di un bioprocesso come un sistema colturale o ecologico.

L'analisi dei sistemi consiste nello studio del sistema ad un tempo determinato, oppure lo studio del comportamento del sistema stesso nel tempo in risposta a perturbazioni che alterano lo stato di equilibrio cui tende.

Banks e Carson (1984) hanno definito la simulazione come l'imitazione di un processo reale nel tempo. Secondo Spain, (1982) la simulazione, nella sua forma più semplice, consiste nel codificare un modello matematico in un programma, da utilizzare in un computer per produrre dati simulati. I dati, prodotti dal modello matematico, possono venire comparati con dati sperimentali rilevati nel sistema reale per verificare la bontà della previsione del modello. Effettuata questa verifica, il modello può essere utilizzato per l'analisi dei sistemi.

Ci sono numerose ragioni per cui l'applicazione di simulazioni al computer dovrebbe giocare un ruolo importante nella ricerca e nello studio, così come nella gestione dei sistemi biologici ed agricoli (Colella *et al.*, 1974; Spain, 1982; Stockle, 1989; Thornley e Johnson, 1990).

In particolare:

- valutare l'effetto di scelte operative su molti sistemi biologici;
- comprendere meglio i meccanismi di funzionamento di un sistema, individuando eventuali mancanze, che richiederanno quindi successivi approfondimenti;
- permettere a ricercatori o manager di eseguire "esperimenti" con il modello di sistema in condizioni estreme o esterne agli intervalli normalmente utilizzati;
- analizzare sistemi che hanno interazioni multiple e non lineari, come quelli ecologici e fisiologici;
- ottenere informazioni o elementi su sistemi per i quali sono scarsi i dati sperimentali, e per i quali la sperimentazione sarebbe lenta, difficile o costosa;
- sviluppare strumenti computerizzati che possono essere utilizzati nell'insegnamento e nell'addestramento;
- stimolare uno studio multidisciplinare del problema.

Bisogna ricordare comunque che i modelli rappresentano, nella migliore delle ipotesi, lo stato dell'arte della conoscenza di un dato sistema e sono dunque rappresentazioni più o meno semplificate della realtà. Non esiste un modello biologico che includa tutte le caratteristiche del sistema reale.

## **8.2 - I modelli in agricoltura**

La necessità di capire i meccanismi alla base del funzionamento delle piante, di comprendere le dinamiche ambientali e le numerose interazioni pianta-ambiente, hanno portato allo sviluppo di numerosi modelli relativi a processi biologici, fisici, biofisici, biochimici e fisiologici in agricoltura. Questi modelli, definiti “modelli di processo”, vanno dal livello di organizzazione della cellula a quello del tessuto, da quello dell'organo a quello dell'intera pianta.

Ci sono stati molti contributi per lo sviluppo di una base matematica per descrivere il trasporto dell'acqua nelle cellule delle piante (Molz e Ferrier, 1982), sono state sviluppate le equazioni di base per descrivere il movimento dell'acqua nella cellula, e sono stati sviluppati metodi per misurare vari parametri (permeabilità delle membrane, modulo elastico delle parete delle cellule, ecc.). Sono inoltre disponibili modelli che descrivono le relazioni acqua-tessuto, che prevedono il controllo della crescita dei tessuti o rappresentano la dinamica delle traslazioni di sostanze all'interno delle piante (Dale *et al.*, 1981; Boyer, 1985; Cosgrove, 1986).

La fotosintesi, sia a livello di foglia che di manto vegetale, è stata modellata estensivamente da diversi autori, sia in funzione di diverse variabili ambientali (De Wit, 1965; Goudriaan, 1977; Lommen *et al.*, 1971) sia in maniera più dettagliata su base biochimica (Hall e Bjorkman, 1975; Berry e Farquhar, 1978; Farquhar *et al.*, 1980).

Esistono molti modelli di processo, come ad esempio sulla respirazione, sull'assimilazione di nutrienti, sulla ripartizione del carbonio nella pianta, sulla crescita delle foglie e delle radici, sulla traspirazione di foglie e sul comportamento degli stomi, sullo sviluppo fenologico della pianta, sul

movimento di acqua ecc. (Rose e Charles-Edwards, 1981; Monteith, 1975; Campbell, 1977; Wisiol e Hesketh, 1987; Nobel, 1983; Charles-Edwards *et al.*, 1986).

I modelli capaci di simulare l'accrescimento delle piante vengono definiti “modelli di crescita delle colture”. Essi differiscono tra loro per i diversi livelli di complessità e per il livello di empirismo delle funzioni che contengono e sono disponibili per un ampio spettro di colture.

Joyce e Kickert (1987) hanno classificato questi modelli in: empirici (principalmente regressioni multiple), modelli di crescita di colture modificati (utilizzando appunto i modelli per colture come base), modelli che enfatizzano l'idrologia o il ciclo dei nutrienti, modelli che enfatizzano la dinamica dell'accrescimento della biomassa e modelli pianta-animale.

Ci sono infine modelli di simulazione, definiti “modelli a larga scala”, sviluppati con lo scopo di analizzare sistemi agricoli a livello di campo, di azienda agricola o di bacino. Tra questi ricordiamo:

- L'EPIC (Erosion-Productivity Impact Calculator) è un modello a scala di campo sviluppato per determinare le relazioni tra erosione del suolo e produzione delle colture negli USA (Williams *et al.*, 1984).
- Lo SWRRB (Simulator for Water Resources in Rural Basins) è un modello a scala di bacino che simula l'idrologia, il clima, il suolo e la produzione di biomassa (Arnold *et al.*, 1989).
- Il CREAMS (Chemical, Runoff, and Erosion from Agricultural Management Systems) è stato sviluppato per fare previsioni sull'effetto di pratiche agricole sul destino dei prodotti chimici di sintesi impiegati come input (Knisel, 1980).

### **8.3 - Tipologie dei modelli di simulazione**

In funzione degli obiettivi e degli scopi si può far ricorso all'utilizzazione di differenti tipologie di modelli, quali: empirici, meccanicistici, statici, dinamici, deterministici e stocastici.

### Modelli empirici

Per definizione i modelli empirici descrivono direttamente i dati osservati e vengono definiti stimando i diversi parametri di una regressione multipla. Questi modelli descrivono il comportamento di un sistema e dimostrano l'esistenza di una relazione tra le variabili selezionate, ma non spiegano il perché di questa relazione. Esempi di questo tipo di modelli sono la stima della produzione in rapporto alle variabili ambientali o l'accumulo di sostanza secca come funzione del tempo.

A partire dai risultati di questi modelli, non è possibile però effettuare nessun tipo di estrapolazione dei dati, limitandosi quindi ad analizzare i dati rilevati tal quale.

### Modelli meccanicistici

A differenza dei modelli empirici, i meccanicistici, tentano di spiegare le relazioni che intercorrono tra i differenti elementi del sistema. Modelli di questo tipo vengono utilizzati in biologia per studiare cellule, tessuti, organi, individui, popolazioni o ecosistemi. Per effettuare stime con modelli di questo tipo, viene prima selezionato un livello, il modello cercherà poi di descrivere il sistema analizzando i livelli al di sotto di quello di interesse per la simulazione. La costruzione di tali livelli viene effettuata in modo empirico. Il processo di produzione di biomassa di una coltura rappresenta un esempio di modello meccanicistico. Questo processo è il risultato della fissazione di CO<sub>2</sub> da parte delle foglie e del trasporto nei differenti organi, solo dopo però che il mantenimento fisiologico della pianta sia stato soddisfatto. La fotosintesi e la respirazione sono processi complessi che però possono essere schematizzati utilizzando alcuni empirismi.

La fotosintesi dipende dall'irraggiamento cui la foglia è soggetta, che dipende a sua volta dall'irraggiamento dell'intero manto vegetale, che è anche questo un processo complesso. Un modello meccanicistico considererà tutti questi elementi per calcolare l'accumulo di biomassa, probabilmente usando un passo d'integrazione temporale di un minuto o al più di un'ora.

Saranno quindi considerate la posizione del sole nel suo evolversi durante la giornata, la struttura spaziale del manto vegetale (altezza, angolo

d'inserzione delle foglie, superficie, ecc.), le proprietà ottiche del manto vegetale, ecc.

### Modelli statici

Un modello statico non ha il tempo come variabile. Questi modelli non sono interessanti in campo biologico, vista l'assenza del tempo che invece risulta essere parametro importante che regola i diversi processi biologici. Esempi di modelli statici sono i modelli di regressione dove la produzione di una coltura è funzione di alcuni parametri meteorologici.

### Modelli dinamici

I modelli dinamici, a differenza di quelli statici, presentano il tempo come variabile esplicita. Le differenti componenti del modello vengono espresse sotto forma di equazioni differenziali continue o di equazioni discrete, integrate per descrivere il comportamento del sistema con l'avanzare del tempo.

### Modelli deterministici

Un modello deterministico effettua una previsione fornendo come output un valore numerico senza dare nessuna misura della distribuzione probabilistica di quel risultato. Per esempio, un modello deterministico simulerà la crescita della biomassa ad intervalli giornalieri, producendo valori per ogni passo d'integrazione, ma senza fornire alcuna informazione sulla variabilità di queste quantità nel campo.

### Modelli stocastici

Un modello stocastico è caratterizzato invece dal contenere procedure che tengano conto delle distribuzioni di probabilità, assieme ad elementi che aggiungono una componente casuale nel caratterizzare lo stato di alcune o tutte le variabili.



**Tabella 5 - Caratteristiche principali di modelli colturali comunemente utilizzati per l'analisi di sistemi agricoli (modificato da Steiner, 1987)**

<b>Caratteristiche principali</b>	<b>modelli regressivi</b>	<b>modelli di simulazione semplici</b>	<b>modelli di simulazione meccanicistici</b>
<b>tipo</b>	statistico, statico	dinamico	dinamico
<b>relazioni utilizzate</b>	empirico	empirico, meccanicistico	meccanicistico, empirico
<b>livelli di organizzazione:</b>	coltura	Coltura, pianta	coltura, pianta, organo
<b>scala spaziale</b>	regionale	campo	m <sup>2</sup> , foglia
<b>intervallo di tempo</b>	stagionale	giornaliero	orario o più breve
<b>uso</b>	gestionale	gestionale, ricerca	ricerca
<b>caratteristiche</b>	richiedono molti anni di dati	producono outputs con vari elementi	producono outputs più dettagliati

#### **8.4 - Struttura dei modelli utilizzati in agricoltura**

La maggior parte dei modelli utilizzati in agricoltura sono modelli dinamici e deterministici. I principali elementi che costituiscono queste tipologie di modello sono le variabili, i parametri e le costanti. Le variabili, in un modello dinamico, possono essere classificate come variabili di stato, di tasso, ausiliarie e di guida.

##### Variabili di stato

Vengono definite prima di avviare il processo di simulazione, e definiscono lo stato di un sistema in un determinato punto nel tempo. Esempi sono: biomassa, carbonio disponibile, contenuto di acqua nel suolo, ecc... Questo tipo di variabili in teoria dovrebbero essere sempre misurabili in modo piuttosto facile così da validare e calibrare il modello con i dati ottenuti dalle misurazioni.

##### Variabili di tasso

Sono variabili associate alle variabili di stato e ne determinano il tasso di cambiamento nel tempo come risultato di qualche specifico processo. Rappresentano flussi di materia o energia tra le varie variabili di stato o tra una

sorgente e una variabile di stato o ancora da una variabile di stato ad un punto di accumulo. Questo tipo di variabili non possono essere misurati nel tempo continuamente ma solo su incrementi temporali. Alcuni esempi di questo tipo di variabili sono: tasso di fotosintesi, tasso di traspirazione, tasso di decadimento.

#### Variabili ausiliarie

Queste variabili variano nel tempo ma la loro definizione non rappresenta necessariamente il comportamento del sistema. Possono però tornare utili quando si vuole rappresentare una quantità da comparare con i dati rilevati nel sistema reale o per comprendere meglio il funzionamento del sistema capendone tutti i passaggi intermedi.

#### Variabili guida

Rappresentano funzioni che sono al di fuori del sistema ma che agiscono ai confini, condizionando il funzionamento dello stesso. Nei processi biologici, per esempio, variabili come temperatura, radiazione, vento ecc., sono variabili guida in quanto non sono intrinseche al sistema biologico stesso ma influenzano sicuramente lo svolgersi dello stesso.

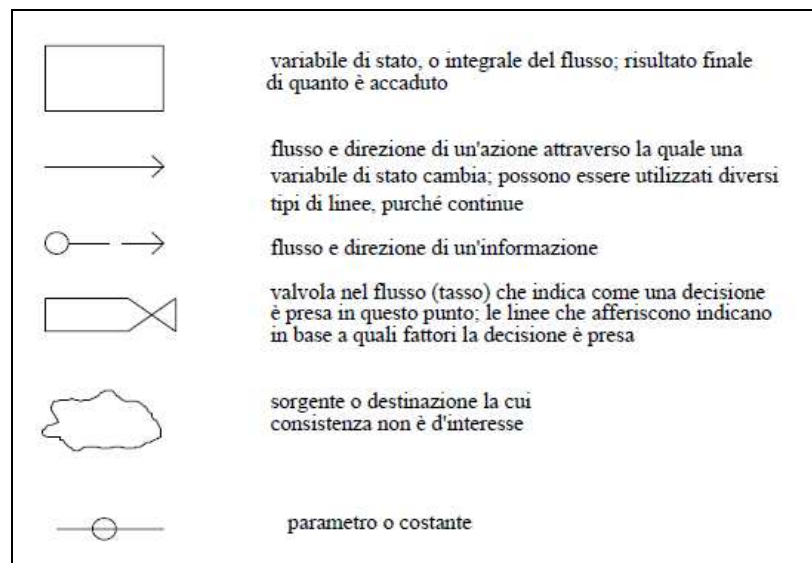
#### Parametri e costanti

In un modello dinamico sono anche presenti quantità come parametri e costanti che non variano nel tempo. Per costante intendiamo quindi una quantità il cui valore è stato accuratamente determinato e che non varia nelle condizioni in cui gira il nostro modello (es. n° di secondi in un giorno). I parametri sono invece quantità che vengono mantenute costanti durante tutta la simulazione ma che alla successiva simulazione possono cambiare (es. riserva massima di carboidrati).

#### Modello concettuale del sistema

Tutte le componenti del sistema in studio vengono integrate nel modello concettuale del sistema che definisce le relazioni tra queste componenti. I modelli concettuali sono in genere esplicitati attraverso diagrammi relazionali i quali riassumono le relazioni e gli elementi più importanti del modello, semplificano la definizione delle equazioni di tasso e di stato e facilitano infine la comunicazione con altri. Un sommario di convenzioni comunemente

utilizzate nel costruire questi diagrammi, utilizzata per rappresentare modelli di impianti industriali, è quella proposta da Forrester nel 1961 e riportata in fig. 1.



**Figura 1 - Simboli convenzionali per diagrammi relazionali proposti da Forrester nel 1961.**

### **8.5 - Modelli di simulazione della crescita e della ripartizione dei carboidrati**

Durante l'ultimo trentennio lo sviluppo di modelli di crescita di alberi si è spostata dalla produzione di modelli su base semplicemente statistica (ovvero descrittivi o di previsione sotto determinate condizioni), a modelli basati su processi di tipo meccanicistico (ovvero esplicativi) fino ai più recenti basati su descrizioni dettagliate dei processi ecofisiologici (Isebrands *et al.*, 1990). Questi modelli sono di natura più complessa ed utilizzati maggiormente in campo scientifico di ricerca agronomica rispetto ai modelli statistici più adatti per supportare scelte di tipo gestionale e manageriale (Landsberg *et al.*, 1991; Mohren *et al.*, 1994; Thornley, 1991).

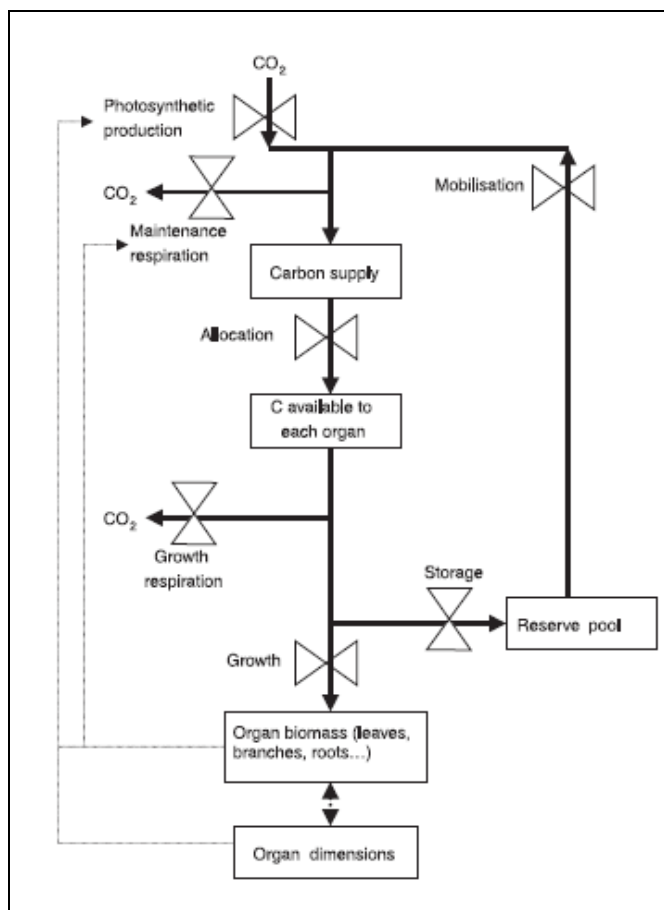
Sono stati sviluppati diversi modelli di simulazione della radiazione e degli scambi gassosi che non considerano la ripartizione del carbonio che porta alla crescita dell'albero (Wang *et al.*, 1990; Chen *et al.*, 1994; Friend, 1995; Sinoquet *et al.*, 2001), modelli di simulazione della crescita di foreste che non sono basati in maniera esplicita sul singolo albero (Bossel, 1996; Dixon *et al.*,

1978; Landsberg *et al.*, 1997) e modelli che sono stati sviluppati per simulare la crescita del singolo germoglio integrando un bilancio del carbonio dello stesso e/o la crescita dell'intera pianta (Bosc, 2000; Ford *et al.*, 1990; Johnson *et al.*, 1986). In genere questi modelli operano ad intervalli di tempo variabili tra un ora ed un anno e simulano processi relativi all'intera pianta o singoli processi su scale spaziali più ridotte (singolo ramo o singola foglia).

L'albero o il ramo vengono generalmente divisi in un certo numero di compartimenti (organi).

Lo scopo di questi modelli è di integrare tra loro singoli processi (fissazione del carbonio, respirazione e partizione dei fotosintetati) per simulare la crescita vegetativa di un albero o di parti di esso, la produzione di frutti, le dinamiche di architettura di una pianta o ancora processi individuali come l'allocazione dei carboidrati nei vari organi.

A prescindere dai loro differenti obiettivi e livelli di applicazione, i modelli di simulazione del bilancio del carbonio, a causa della loro complessità, sono generalmente costituiti da diversi sub-modelli, ognuno dei quali descrive un processo base del ciclo del carbonio nella pianta, ovvero la produzione di fotosintetati, la respirazione, la dinamica delle riserve e l'allocazione dei carboidrati (fig 2). Infatti, il processo di distribuzione dei carboidrati e crescita delle piante è fondamentalmente identico tra le diverse specie. Di conseguenza, molti modelli sviluppati per una determinata specie hanno in realtà un esteso range di applicabilità anche su colture e condizioni climatiche differenti.



**Figura 2 - Rappresentazione schematica di un tipico modello di simulazione della crescita di un albero sulla base del bilancio del carbonio ( Le Roux et al., 2001).**

### 8.5.1 - Assimilazione del carbonio

Tutti i modelli di simulazione del bilancio del carbonio e di crescita della pianta includono dunque un sub-modello che stima il carbonio guadagnato dalla pianta tramite la fotosintesi in funzione di parametri climatici e dello stato fisiologico della foglia. Essi differiscono principalmente per il modo in cui viene formulata l'assimilazione del carbonio, per il livello di influenza ambientale su questo processo e per il modo in cui considerano la distribuzione spaziale dell'assimilazione tra le varie foglie della pianta.

Per quanto concerne la formulazione della produzione di fotoassimilati i modelli possono essere divisi in tre categorie; la prima comprende quei modelli che non calcolano la fotosintesi fogliare ma la considerano proporzionale ad

alcuni parametri come l'area fogliare (Deleuze *et al.*, 1995, 1997; Mäkelä, 1986; Promnitz, 1975), il peso secco della foglia o del germoglio (Mäkelä, 1997) la radiazione assorbita (Monteith, 1972), la traspirazione (Reffye *et al.*, 1997) o ancora la domanda di carbonio (Williams, 1996). Questi modelli di solito non rappresentano esplicitamente l'effetto di importanti variabili ambientali sulle produzioni e utilizzano una scala temporale annuale.

La seconda classe include i modelli che descrivono l'effetto di variabili ambientali sulla fotosintesi tramite relazioni di tipo empirico.

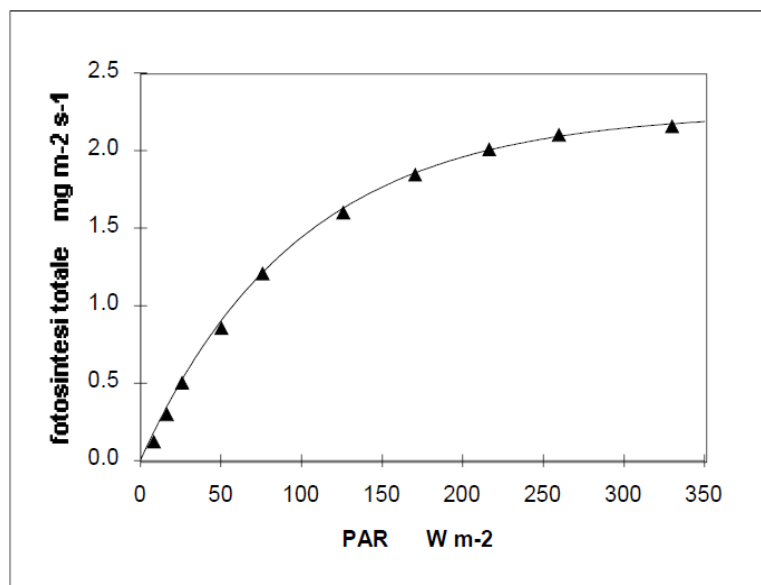
In questi modelli di solito la fotosintesi fogliare è rappresentata come segue:

$$P = P_{\max} f(\text{PAR}) g_1(T_a) g_2(C_a) g_3(\text{VPD}) g_4(Y) g_5(N) g_6(\text{age})$$

Dove  $P_{\max}$  è la fotosintesi massima osservata ad elevati livelli di radiazione luminosa incidente sulla foglia ed in ottimali condizioni ambientali,  $f(\text{PAR})$  è una funzione chiave empirica di irradiazione della foglia, i fattori "gi" sono funzioni moltiplicative che tengono conto dell'effetto della temperatura dell'aria ( $T_a$ ), della concentrazione di  $\text{CO}_2$  dell'aria ( $C_a$ ), del deficit di pressione di vapore dell'aria (VPD), del potenziale idrico della pianta ( $Y$ ), del contenuto in azoto delle foglie ( $N$ ) e dell'età della foglia ( $\text{age}$ ).

La terza classe usa un approccio di tipo biochimico per determinare l'influenza dell'ambiente sulla fotosintesi fogliare.

Se irraggiamo una foglia e misuriamo il tasso di fotosintesi in situazioni nelle quali la luce sia il fattore limitante, otteniamo una risposta di tipo simile a quella di figura 3.



**Figura 3 - Fotosintesi in funzione del PAR incidente su foglie di *Panicum maximum* (da Johnson *et al.*, 1989).**

Questo caratteristico tipo di risposta dell'assimilazione all'illuminazione, riconosciuto come "curva luce", è stato rappresentato con diverse tipologie di funzioni (esponenziali, iperboli rettangolari e non-rettangolari).

Queste funzioni producono un incremento lineare della fotosintesi quando la luce è a livelli bassi; si ha invece una risposta di "saturazione" ad alti livelli di luce, dove ulteriori incrementi del PAR incidente sulla foglia non determinano alcun aumento della fotosintesi.

Per stimare la fotosintesi (o l'assimilazione) fogliare, Spitters suggerisce l'equazione:

$$A_L = A_m \left( 1 - e^{-\frac{\alpha I_L}{A_m}} \right)$$

dove  $A_m$  è il tasso di assimilazione massima alla saturazione luminosa ( $\text{mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ ),  $I_L$  è la densità di flusso di PAR incidente sulla foglia e  $\alpha$  è l'efficienza nell'uso della luce ( $\text{mg CO}_2 \text{ J}^{-1}$ ).

Un modo semplificato di rappresentare la curva in figura 3 è quello proposto da Blackman (1905), che consiste in un modello lineare discontinuo.

Questo modello prevede l'assimilazione totale ("gross assimilation",  $A_g$ ) come funzione lineare dell'intensità luminosa, per intensità da 0 a  $I_m$ , quest'ultima individuata come l'intensità oltre la quale non c'è ulteriore incremento ( $A_g = \alpha I_L$  per  $0 < I < I_m$ ;  $A_g = A_m$  per  $I > I_m$ ).

Johnson *et al.* (1989) hanno utilizzato il modello dell'iperbole non-rettangolare (NHR). La forma di questo modello è la stessa rispetto a quella del modello di Farquhar *et al.* 1980, suggerendo una base biochimica per il modello e per i parametri del modello stesso:

$$A_{Lg} = \frac{\alpha I_L + A_m - \sqrt{(\alpha I_L + A_m)^2 - 4\theta \alpha I_L A_m}}{2\theta}$$

dove  $\theta$  è un parametro adimensionale che varia tra 0 e 1.

I parametri delle equazioni descritte dipendono da numerosi fattori che includono la specie, l'età della foglia, fattori nutrizionali e la temperatura. Attualmente dobbiamo affidarci a misurazioni dirette per determinare la maggior parte di queste relazioni di dipendenza, anche se si stanno facendo progressi nel modellarle.

Dal momento che la posizione del sole nel cielo cambia durante la giornata e le foglie hanno una angolazione diversificata nel manto vegetale, c'è una variazione spaziale e temporale dell'irraggiamento delle foglie che nell'arco della giornata possono essere più o meno ombreggiate o soleggiate. Questa variabilità di intercettazione deve essere integrata alla risposta della fotosintesi alla luce per avere il tasso di assimilazione reale della foglia nel tempo e nello spazio. La fotosintesi stimata al livello di foglia può essere associata a modelli che descrivono la quantità di luce intercettata da diversi strati del manto vegetale. Il contributo di ogni strato viene poi sommato per determinare la fissazione di carbonio dell'intero manto vegetale.



### 8.5.2 - Respirazione

La produzione netta di biomassa di una pianta è influenzata dalle perdite dovute alla respirazione.

Purtroppo i modelli di respirazione che siano abbastanza realistici sono pochi per cui, la maggior parte dei modelli di crescita delle piante utilizza delle rappresentazioni semplicistiche e teoriche di questo processo.

In questi modelli la respirazione viene stimata in maniera molto approssimativa tramite una semplicistica rappresentazione teorica dei processi respirativi che la valutano intorno al 50% degli assimilati totali (Agren *et al.*, 1991; Ryan *et al.*, 1996; Le Roux *et al.*, 2001) o la stimano sottraendo una frazione fissa (40-70%) alla fotosintesi lorda (Coops *et al.*, 1998; Waring *et al.*, 1998; Kimura, 1970; Pate *et al.*, 1979; Farrar, 1980; Massimino *et al.*, 1980; Lambers *et al.*, 1981; Peterson e Zelitch, 1982; Lakso *et al.*, 2001).

È ormai ampiamente accettato che la respirazione si divide in due componenti, di cui una di “crescita” e uno di “mantenimento”. La respirazione di crescita è definita come la respirazione associata ai processi di sintesi di nuova biomassa mentre la respirazione di mantenimento come quella necessaria per il mantenimento ed il turnover della biomassa esistente (Amthor, 1984, 1989; Johnson, 1990; McCree K, 1986; Ruget, 1981; Thornley, 1970).

Secondo questa scomposizione proposta da Thornely nel 1970 si ha:

$$RT = RG + RM$$

Dove RT è la respirazione totale, RG la frazione di crescita ed RM quella di mantenimento.

In particolare:

$$RM = m \cdot W;$$

$$RG = [(1 - YG) / YG] \cdot (\Delta W / t).$$

Dove  $W$  è un parametro relativo alla biomassa,  $m$  rappresenta una costante numerica,  $YG$  viene definita come produttività o efficienza di crescita e  $\Delta W$  indica la biomassa di nuova produzione.

Tra i vari fattori ambientali, la temperatura è quella che maggiormente influenza i tassi di respirazione (Penning de Vries *et al.*, 1983; Bepete e Lakso, 1997; Cannell e Thornley, 2000; Thornley e Cannell, 2000); la respirazione risulta infatti essere esponenzialmente correlata con la temperatura (Martin *et al.*, 1994; Thierron e Laudelout, 1996). La dipendenza della respirazione dalla temperatura è nella maggior parte dei casi tenuta in conto tramite l'utilizzo di alcune costanti definite  $Q_{10}$  (Balandier *et al.*, 2000; Berninger *et al.*, 1997; Grossman e DeJong, 1994; Webb *et al.*, 1991; Weinstein *et al.*, 1992; Wermelinger *et al.*, 1991; Williams, 1996).

Questi coefficienti sono generalmente considerati costanti per la respirazione di mantenimento per tutti i tessuti di una determinata specie (Edwards e McLaughlin, 1978; Negisi, 1981; Thierron e Laudelout, 1996).

Più recentemente è stato suggerito che un incremento nel tasso di respirazione provoca un decremento nei valori del  $Q_{10}$  (van Iersel, 2003); infatti la respirazione di crescita è meno sensibile alla temperatura rispetto a quella di mantenimento.

La respirazione è quindi correlata non solo alla tipologia di organo in questione, ma anche al suo stadio di sviluppo (Marra *et al.*, 2009) oltre che alla sua età.

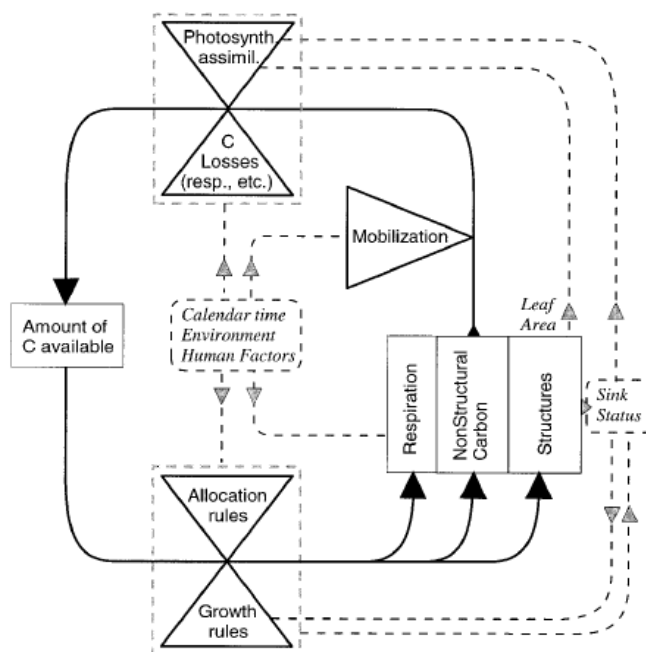
Infatti è generalmente accettato che durante le fasi di maggior accumulo di biomassa, il consumo di carbonio è maggiormente dovuto alla respirazione di crescita (Adu-Bredu *et al.* 1997) mentre quando la crescita diminuisce la respirazione per unità di massa fresca diventa la più significativa in termini percentuali (McCree e Kresovich 1978; Amthor 1984, 1989).

### 8.5.3 - Ripartizione del carbonio

La ripartizione dei carboidrati tra i vari organi di una pianta rappresenta un processo chiave nello sviluppo dei modelli di simulazione di crescita delle piante (Valentine, 1985; Landsberg, 1986; Cannell, 1989).

Sebbene i meccanismi base e le leggi principali che regolano questo processo siano abbastanza semplici e conosciute, la ripartizione della sostanza secca nella modellizzazione della crescita di una pianta rimane ancora un problema non del tutto risolto.

Infatti la ripartizione della sostanza secca tra i vari organi di una pianta causa, nel lungo termine, il relativo tasso di crescita degli stessi; questo processo determina una serie di cambiamenti che si ripercuotono conseguentemente sulla ripartizione futura degli assimilati. Basti pensare alle giovani foglie che inizialmente sono dipendenti dalla ripartizione dei carboidrati ed in un secondo momento, in seguito alla loro crescita, diventano fonte di fotoassimilati. Inoltre la crescita di un sink è contemporaneamente sia il risultato della ripartizione del carbonio verso se stesso sia uno dei fattori che più influenzano la ripartizione stessa (Fig. 4).



**Figura 4 - Struttura di un modello dove si nota l'interazione tra i la ripartizione dei carboidrati e la crescita degli organi (Lacointe, 2000).**

Tra i modelli di crescita, alcuni sono stati sviluppati soltanto allo scopo di studiare la ripartizione dei carboidrati in una pianta o di testare ipotesi riguardo la ripartizione dei carboidrati (Minchin *et al.*, 1993). Wilson (1988), Mäkelä (1990), Marcelis (1993), Cannell e Dewar (1994) e Lacoite (2000) hanno studiato e discusso ampiamente i differenti meccanismi usati per la costruzione di modelli di simulazione della ripartizione dei carboidrati tra le varie parti della pianta.

Fino ad oggi i modelli di ripartizione dei carboidrati possono essere suddivisi in 4 classi, ovvero:

- modelli empirici;
- modelli che si basano sulla crescita;
- modelli di “trasporto-resistenza”;
- modelli basati su relazioni source-sink.

Nei modelli empirici non si stabilisce nessun meccanismo base o regola generale per descrivere la distribuzione dei carboidrati. Vengono misurati sperimentalmente dei coefficienti di distribuzione. Ciò può essere ottenuto direttamente, evidenziando il carbonio in movimento da ciascun source e rintracciandolo successivamente nei diversi sink (Rauscher *et al.*, 1990; Zhang *et al.*, 1994), o indirettamente, a partire dai tassi di crescita dei sink (McMurtrie *et al.*, 1983; Promnitz, 1975); in questo ultimo caso non possono essere fatte distinzioni tra le diverse origini dei carboidrati. Purtroppo, sebbene questi coefficienti possano essere modulati parzialmente sulla base di fattori ambientali, i modelli empirici risultano adattati solo ad uno specifico range di condizioni esterne.

I modelli di trasporto-resistenza si basano sul concetto che i processi di trasporto ed utilizzo da soli sono sufficienti per prevedere gran parte delle risposte di distribuzione dei carboidrati (Thornley, 1972; Minchin *et al.*, 1993).

Infine, i modelli basati su relazioni source-sink sostengono che i flussi di assimilati e la loro distribuzione sia dipendente dalla rispettiva capacità di attrazione di un determinato sink. Questi modelli utilizzano dunque delle classi

di “forza di un sink”, quest’ultima definita come il flusso netto (grammi di C/unità di tempo) che è importato da un sink in determinate condizioni.

### **8.6 – Scopo del lavoro**

Nel pistacchio, a differenza delle altre specie alternanti, la variazione ciclica della produttività non è determinata dalla mancata differenziazione delle gemme a fiore nell’anno di carica, ma dalla loro cascola estiva durante il rapido sviluppo dell’embrione (Crane e Nelson, 1971; Monselise e Goldschmidt, 1982). Secondo un’ipotesi “nutrizionale” l’abscissione delle gemme a fiore è determinata dalla competizione esercitata dall’embrione in accrescimento per l’utilizzo degli elaborati della foglia (Barone *et al.*, 1994; Caruso *et al.*, 1995; Crane e Nelson, 1971, 1972; Marra *et al.*, 1998; Takeda *et al.*, 1980). L’accumulo di sostanza secca nei frutti avviene non solo attraverso l’utilizzazione di larga parte dei fotoassimilati di nuova sintesi ma anche tramite il drenaggio completo delle riserve disponibili nel ramo (Marra *et al.*, 1998). Pertanto nel bilancio dell’intera stagione vegetativa, i rami in fruttificazione, investendo la maggior parte del carbonio utilizzabile nella produzione di frutti, non riuscirebbero più a sostenere né la crescita e neanche la funzionalità dei rimanenti organi vegetativi e riproduttivi.

Al di là di questi meccanismi di controllo genetico, l’alternanza produttiva è incrementata da diversi fattori ambientali tra i quali, particolare importanza assumono i periodi di prolungato stress idrico. Infatti, nonostante il pistacchio venga considerata una specie resistente all’aridità, diversi studi condotti in differenti aree di coltivazione del pistacchio nel mondo hanno confermato che l’irrigazione è fattore di condizionamento dello sviluppo e della produttività (Goldhamer, 2005; Polito e Pinney, 1999; Ak e Agackesen, 2006; Gijon *et al.*, 2009) oltre a rappresentare una tra le principali tecniche preventive che debbono essere utilizzate per ridurre l’alternanza di produzione.

La possibilità di integrare in un unico sistema le informazioni sui processi biologici che intervengono nel fenomeno dell’alternanza di produzione ha portato molti studiosi a realizzare diversi modelli ecofisiologici per simulare lo

sviluppo vegetativo e riproduttivo delle piante allo scopo di pervenire ad una migliore comprensione delle relazioni di competizione tra i vari organi (Bruchou e Genard, 1999; Vivin *et al.*, 2002; Witowski, 1997; Bassow *et al.* 1990). In questi la crescita è espressa come il risultato dell'interazione tra processi fisiologici quali la fotosintesi, la respirazione, la traslocazione e l'accumulo di carbonio, che possono essere osservati a differenti livelli di organizzazione: cellula, organo e pianta. Secondo l'approccio meccanicistico che caratterizza le basi teoriche dei modelli, la pianta è costituita da un complesso di organi semi-autonomi ma interagenti e la ripartizione del carbonio è regolata dalla competizione tra gli organi (Grossman e DeJong, 1994). In particolare, il flusso e l'allocazione degli assimilati sono fondamentalmente governati dai sink che competono, ciascuno con una propria forza, per le risorse rese disponibili dai source. Nel bilancio del carbonio, quindi, gli assimilati costituiscono l'"offerta", la quale sostiene la crescita e la respirazione delle varie parti della pianta che, perciò, rappresentano la "domanda".

La Mantia (1998) ha realizzato un modello per il calcolo del bilancio del carbonio (con software Stella) a partire da dati fisiologici, climatici e vegetativi, in grado di stimare il guadagno stagionale di carbonio in rami di pistacchio con frutti e senza frutti.

Considerata la forte influenza che l'irrigazione ha sulla lunghezza dei nuovi germogli, l'area fogliare, il tasso di traspirazione e fotosintesi della pianta, la dimensione ed il peso dei frutti, la possibilità di integrare questo modello con dei dati provenienti da piante sottoposte a diversi trattamenti irrigui appare di fondamentale importanza per contribuire ulteriormente alla comprensione del meccanismo che sta alla base del fenomeno dell'alternanza di produzione del pistacchio, avvalorando, in termini di bilancio del carbonio, l'ipotesi che un adeguato quantitativo di acqua riduce la variabilità produttiva delle piante.

Scopo del presente lavoro, che fa parte di una più ampia indagine di tipo fisiologico su piante di pistacchio, è stato la stima del bilancio stagionale del carbonio in rami carichi di piante di pistacchio sottoposte a differenti

trattamenti irrigui attraverso un modello di simulazione dell'accrescimento vegetativo e riproduttivo.

### 8.7 - Materiale e metodo

Le prove sono state condotte durante l'anno 2010 presso l'azienda "Fratelli Morello" (fig. 5) sita in agro di Caltanissetta (Sicilia - 37°26'04" N, 14°03'08" E, 360 m s.l.m.). Il pistacchieto è costituito da piante della cultivar Bianca innestata su Terebinto (*Pistacia terebinthus* L.) impiantate circa venti anni fa secondo un sesto rettangolare (6,5 X 4,5 m). L'impollinazione viene assicurata da alcuni genotipi maschili di origine sconosciuta, caratterizzati da una fioritura abbondante e scalare (15-20 gg.), nonché da una notevole produzione di polline. Il clima della zona è tipicamente mediterraneo, con precipitazioni medio-annue di 500 mm circa concentrate nel periodo autunno-vernino e temperature che raramente raggiungono valori minimi inferiori a 0°C.



**Figura 5 – Immagine satellitare (google map) del campo sperimentale su cui sono state svolte le ricerche, sito in territorio di Caltanissetta (Sicilia) presso l'azienda dei fratelli Morello (37°26'04" N, 14°03'08" E, 350 m. s.l.m.).**

L'impianto di irrigazione localizzata a goccia è costituito da due ali gocciolanti per fila e da gocciolatori auto compensanti da 1,6 l/h posti a 80 cm. Nove piante irrigate secondo i criteri normalmente adottati in azienda (500 m<sup>3</sup>/ha) sono state messe a confronto con altrettante piante mantenute in asciutto (controllo non irrigato).

Il disegno sperimentale era costituito da tre blocchi per tesi, ognuno costituito da tre file di alberi. Per ciascun blocco sono state selezionate, per omogeneità produttiva e di sviluppo vegetativo, tre piante dalla fila centrale, per un totale di 9 piante per tesi.

Le piante durante l'annata 2010 hanno usufruito delle normali cure colturali quali potature, lavorazioni del terreno, concimazioni minerali (36 kg/ha di N, 18 Kg/ha di P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e 18 kg/ha di K<sub>2</sub>O) e trattamento contro le cimici (prodotti commerciali a base di Spinosad). La raccolta meccanica tramite scuotitore da tronco è stata effettuata il 6 e il 7 settembre 2010.

### **8.7.1 - Rilievi meteorologici**

È stata installata una capannina meteorologica per la raccolta dei dati climatici durante l'intera stagione vegeto-produttiva della sperimentazione. La temperatura e l'umidità relativa dell'aria sono state misurate con un sensore MP100 (Rotronic Instruments (UK) Ltd), mentre il PPFD (*photosynthetic photon flux density* – flusso fotonico fotosinteticamente attivo) è stato rilevato mediante un sensore Li-190 Quantum (Li-Cor Biosciences – Nebraska, USA) e contemporaneamente con un fotodiodo al silicene (Micropto, silicon NPN phototransistor, model DFT02). È stato inoltre installato un pluviometro per il rilevamento dei dati relativi alla piovosità. Un datalogger CR1000 (Campbell Scientific Inc. – Utah, USA), collegato agli strumenti, ha permesso la registrazione delle medie orarie dei dati rilevati.

### **8.7.2 - Campionamento e rilievi**

Su ciascuna delle 18 piante in tesi sono state etichettate quattro branchette esposte secondo i quattro punti cardinali. Su queste, dalla data del germogliamento, ovvero 7 giorni prima della fioritura (avvenuta il 26 aprile),



sino alla data di raccolta (127 GDPF) sono stati eseguiti bisettimanalmente i seguenti rilievi:

- lunghezza del germoglio;
- n. di foglie composte per ramo;
- n. di foglioline per foglia composta;
- n. di gemme a fiore per ramo;
- n. di infruttescenze;
- n. di frutti per infruttescenze.

Sempre a cadenza bisettimanale, tre branchette per tesi irrigua sono state recise e portate in laboratorio dove sono stati effettuati, oltre ai medesimi rilievi biometrici di campo, ulteriori osservazioni di tipo distruttivo e in particolare sono stati determinati:

- la superficie complessiva delle foglie mediante “Leaf Area Meter” (WinFOLIA System, Regent Instruments Inc., Quebec, Canada);

- la superficie fotosinteticamente attiva, ottenuta sottraendo alla superficie complessive delle foglie la percentuale che aveva perso, a causa di fenomeni di clorosi, i pigmenti fotosintetici;

- il peso fresco e, dopo essiccazione in stufa a ventilazione forzata alla temperatura di circa 60°C, il peso secco dei singoli organi che componevano la branchetta (foglie, germoglio, infruttescenze e ramo di un anno).

Alla raccolta, inoltre, le branchette etichettate sono state recise e portate in laboratorio per eseguire i rilievi biometrici e distruttivi.

I dati ottenuti dai rilievi biometrici sono stati interpolati tramite l’utilizzo del software Tablecurve 2D (Jandel Scientific, San Rafael-CA, USA) per determinare delle curve che riproducessero l’andamento dei suddetti parametri nel corso dell’intera stagione vegeto-produttiva.

### 8.7.3 - Calcolo dell'Absolute Growth Rate

L'Absolute Growth Rate (AGR – Tasso di accumulo assoluto) è un parametro che caratterizza la crescita degli organi nel tempo. Gli organi in accrescimento di una pianta (sink) attraggono fotoassimilati con diversa forza (Ho, 1988). L'AGR, descrivendo la velocità di accumulo dei fotoassimilati nell'unità di tempo, permette di valutare la forza con cui ciascun organo attrae le risorse disponibili. In condizioni di risorse non limitanti il tasso di accumulo assoluto esprime la forza “potenziale” di un sink; esso rappresenta, in pratica, la massima intensità di accumulo di carbonio da parte di un organo (DeJong e Goudrian, 1989; Grossman e DeJong, 1994). Quando la disponibilità di risorse è modesta l'AGR esprime la forza “apparente” nel contesto del quale il sink si accresce.

Il suo calcolo è stato effettuato come segue:

$$AGR = (W_2 - W_1) / (t_2 - t_1) \quad (1)$$

dove:

$W_1$  e  $W_2$  = carbonio (grammi) in due epoche di campionamento successive;

$t_1$  e  $t_2$  = tempo intercorso tra le due epoche in giorni.

### 8.7.4 - Misure degli scambi gassosi

Da giugno a settembre, periodicamente, sono state effettuate le misure di fotosintesi netta ( $A_n$ ) su una foglia apicale del tratto mediano del ramo. Le osservazioni sono state eseguite utilizzando un analizzatore di gas ( $CO_2$  e  $H_2O$ ) a raggi infrarossi (IRGA) portatile CIRAS-2 (PP Systems®), collegato ad una camera di assimilazione automatica (Parkinson Leaf Cuvette).

Tutti i rilevamenti sono stati eseguiti tra le ore 11.00 e le 13.00 in giornate prive di nubi ( $PPFD > 1500 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ ). Le misure sono state effettuate su una porzione di foglia, di superficie circolare pari a  $2,5 \text{ cm}^2$  posta all'interno della camera di assimilazione. La foglia è stata posizionata con la

pagina superiore esposta in piena luce e i valori di  $A_{max}$  (assimilazione massima) sono stati registrati dopo un breve periodo per consentirne la stabilizzazione.

La camera di assimilazione era provvista, oltre che di sensori per la misura della radiazione incidente (PPFD –  $\mu\text{mol m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) e della temperatura ( $^{\circ}\text{C}$ ), di un illuminatore, in grado di generare luce a diverse intensità, che ha permesso di effettuare delle curve di risposta della fotosintesi alla luce. Le misurazioni sono state effettuate tra giugno e luglio (35, 56 e 65 GPPF) quando le foglie, pienamente espanse, mostravano la massima attività fotosintetica. La temperatura, la concentrazione di  $\text{CO}_2$  e l'umidità all'interno della cuvette sono state mantenute a livelli costanti; il flusso di aria all'interno del sistema è stato fissato su una portata di 300 ml al minuto; infine, l'intensità del flusso fotonico fotosinteticamente attivo è stata diminuita progressivamente da 1500 a 0  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  ad intervalli di tempo costanti. I valori di assimilazione per ogni livello di PPFD sono stati registrati solo dopo che, nell'intervallo di tempo definito, si erano stabilizzati. Le curve di risposta della fotosintesi alla luce, così ottenute, sono state interpolate mediante le procedure di interpolazione non-lineare implementate nel software Tablecurve 2D (Jandel Scientific, San Rafael-CA, USA) secondo una funzione asintotica del tipo:

$$y = a + b \cdot (1 - e^{-cx}) \quad (2)$$

Dove:

$y$  = fotosintesi netta ( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ );

$x$  = PPFD ( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ );

$a$  = intercetta della funzione con l'asse  $y$ ;

$b$  = assimilazione massima;

$c$  = resa quantica.

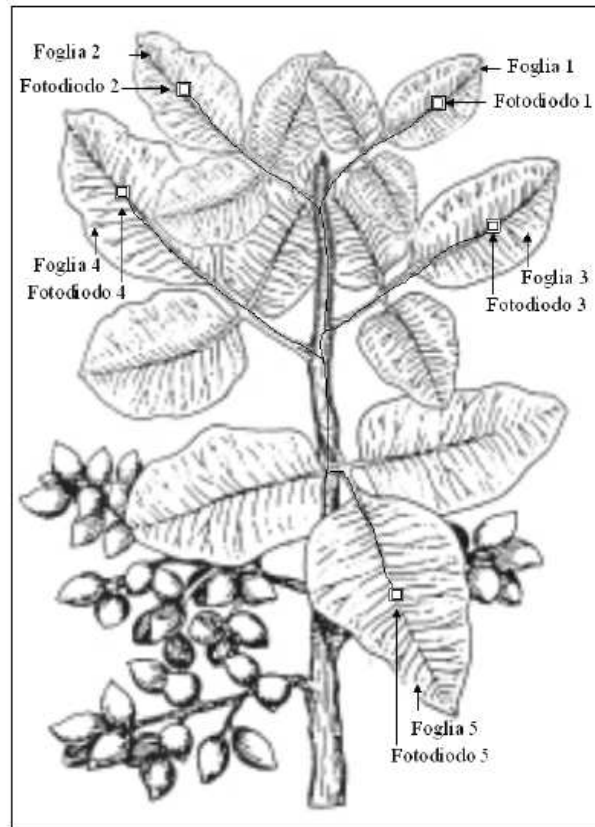
Dalle curve di risposta sono stati quindi ricavati i valori di PPFD corrispondenti al punto di compensazione delle piante in asciutto e irrigate.

### **8.7.5 - Misura del PPFD incidente sulle foglie di un germoglio**

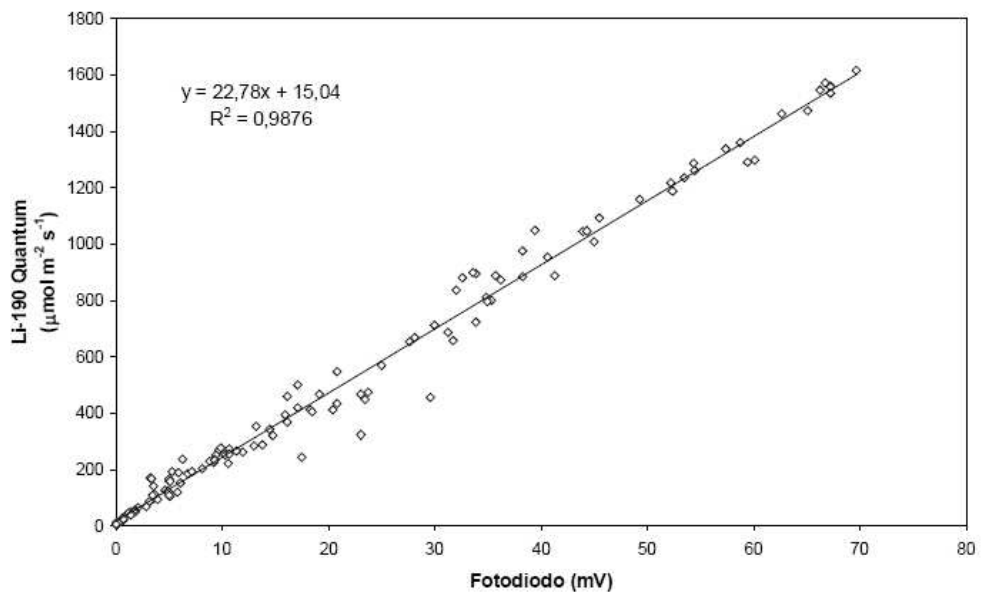
Nel mese di luglio, al fine di misurare la variazione della radiazione incidente sulle foglie di un ramo, 1 fotodiodo al silicene (Micropto, silicon NPN phototransistor, model DFT02) è stato disposto sulla fogliolina apicale di ciascuna foglia di un germoglio, a partire da quella più esterna (fig. 6). Viste le ridotte dimensioni e peso dei sensori, nessuna limitazione è stata imposta al libero movimento delle foglie; così, il valore di PPFD registrato in ogni momento è stato quello che realmente raggiungeva ciascuna fogliolina, rispettando il suo naturale orientamento, l'altezza del sole, le condizioni atmosferiche e i movimenti della chioma dovuti al vento.

Due set di sensori, ciascuno dei quali era costituito da un fotodiodo al silicene e da un sensore Li-190 Quantum (Li-Cor Biosciences – Nebraska, USA), sono stati posizionati uno all'interno e l'altro all'esterno della chioma; in questo modo è stato possibile, una volta individuata la correlazione fra le letture dei due differenti sensori, calibrare i fotodiodi per la misurazione del PPFD. Tutti i dati rilevati dai sensori sono stati mediati ogni minuto e registrati ininterrottamente per una settimana tramite un datalogger CR10 (Campbell Scientific Inc. –Utah, USA).

I dati di PPFD, rilevati dai sensori posizionati su ciascuna foglia del germoglio, sono stati ricalcolati in termini di frazione di PAR che ha raggiunto la foglia rispetto a quella registrata dal sensore di riferimento posto in piena luce (fig 7). I valori percentuali ottenuti, quindi, sono stati utilizzati per il calcolo della quantità di luce che ogni singola foglia del germoglio ha intercettato durante tutta la stagione vegetativa.



**Figura 6 - Rappresentazione schematica del posizionamento dei fotodiodi sulle foglie del germoglio.**



**Figura 7 - Correlazione lineare tra le letture effettuate con i fotodiodi al silicene e quelle con i sensori Li-190 Quantum, posizionati all'interno e all'esterno della chioma di una pianta di pistacchio.**

### 8.7.6 - Respirazione della foglia e dell'infruttescenza

Durante l'intera stagione vegetativa, periodicamente, sulle piante in tesi, sono stati selezionati 2 rami con caratteristiche simili a quelli etichettati ed è stato misurato il tasso di respirazione della foglia e dell'infruttescenza. Lo strumento utilizzato per i rilievi di respirazione è stato un analizzatore di gas (CO<sub>2</sub> e H<sub>2</sub>O) a raggi infrarossi (IRGA) portatile CIRAS-2 (PP Systems®), al quale è stata collegata, tramite appropriati connettori pneumatici, una camera in plexiglas oscurata nella quale è stato introdotto l'organo di cui si intendeva misurare la respirazione; la temperatura alla quale è stata effettuata la misurazione è stata monitorata tramite un sensore di temperatura thermistor (OAKTON\_ TEMP4 Acorn Meter, OAKTON Instruments, Vernon Hills, IL) posizionato all'interno della camera.

La differenza di concentrazione di CO<sub>2</sub> in ingresso ed in uscita dalla camera è stata registrata a partire da 1 minuto dopo il raggiungimento dello stato di equilibrio per 5 volte ad intervalli di 15 secondi. L'organo è stato dunque reciso e portato in laboratorio per la determinazione del peso fresco. Il tasso di respirazione per grammo di sostanza fresca è stato calcolato secondo l'equazione (Long and Hallgren, 1985):

$$R = (F * \Delta C) / g_{pf} \quad (3)$$

dove:

R = tasso di respirazione, espresso in  $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ;

F = flusso d'aria, espresso in  $\text{moli}\cdot\text{s}^{-1}$ ;

$\Delta C$  = differenziale della concentrazione di CO<sub>2</sub> in ingresso ed in uscita dalla camera (ppm) ;

$g_{pf}$  = grammi di peso fresco.

In particolare le moli d'aria (F), sono state calcolate convertendo il flusso volumetrico tramite la seguente equazione:

$$F = \left( \frac{F_v}{1000} * \frac{1}{22,4} * \frac{273,15}{(273,15 + T^{\circ}\text{C})} * \frac{p}{101,3} * \frac{1}{60} \right) \quad (4)$$

dove:

F= flusso d'aria (mol sec<sup>-1</sup>);

F<sub>v</sub> = flusso volumetrico dell'aria (cm<sup>3</sup>·min<sup>-1</sup>);

22,4 = volume in dm<sup>3</sup> di una mole di aria a S.T.P.;

T = temperatura registrata durante le misurazioni (°C);

p = pressione atmosferica durante la misurazione (KPa).

I valori di “respirazione effettiva” (R<sub>eff</sub>) per grammo di sostanza fresca della foglia e dell'infruttescenza, misurati nel corso della stagione a diverse temperature ambientali, sono stati ricalcolati riferendoli ad una temperatura standard (20°C) per ottenere la “respirazione di riferimento” (R<sub>rif</sub>).

A tal fine, sulla base delle ricerche già effettuate da Marra et al. nel 2009, si è utilizzata una funzione non lineare che descrive la risposta esponenziale della respirazione alla temperatura; in particolare:

$$R_{rif}(20) = R_{eff}(T) \cdot Q_{10}^{(20-T)/10} \quad (5)$$

dove:

R<sub>eff</sub>(T) = respirazione effettiva istantanea (nmol·sec<sup>-1</sup>·g<sup>-1</sup>) misurata ad una determinata temperatura (T);

T = temperatura della misurazione (°C);

R<sub>rif</sub>(20) = tasso di respirazione di riferimento a T = 20 °C;

Q<sub>10</sub> = aumento del tasso di respirazione per ogni incremento di 10 °C di temperatura.

Sono stati utilizzati i valori di Q<sub>10</sub> determinati sperimentalmente da Marra et al. nel 2009 su piante di pistacchio nello stesso campo sperimentale riportati in tabella 6.

**Tabella 6 - Parametri dell'equazione  $R_{rif}(20) = R_{eff}(T) \cdot Q_{10}^{(20-T)/10}$  (eq. 5) determinati sperimentalmente da Marra *et al.* nel 2009 su piante di pistacchio.**

Organs	DFB	$R_{T_{ref}}$ (nmol CO <sub>2</sub> s <sup>-1</sup> )	$Q_{10}$
Vegetative	-4	15.35 (0.63)	1.23 (0.05)
	9	12.69 (0.98)	1.64 (0.10)
	19	8.69 (0.24)	1.42 (0.27)
	22	6.14 (0.38)	1.18 (0.09)
	≥ 36	1.58 (0.18)	2.64 (0.26)
Reproductive	-4	10.41 (1.10)	1.97 (0.25)
	9	6.58 (0.55)	1.58 (0.11)
	≥ 22	0.25 (0.03)	3.50 (0.35)

Tutti i dati acquisiti sono stati sottoposti ad analisi della varianza (ANOVA) usando la procedura GLM (General Linear Model) del pacchetto Systat (SPSS© Inc.).

### 8.7.7 - Descrizione del modello

I dati climatici stagionali, le funzioni, i parametri e le relazioni ottenute sperimentalmente, sono stati implementati in un modello di simulazione meccanicistico (Stella research software; High Performances Systems, Inc.), di tipo deterministico e dinamico, che ha consentito di calcolare il bilancio stagionale del carbonio su base oraria (134 giorni ovvero 3216 ore) di un ramo in funzione del trattamento irriguo. Nella simulazione, per ciascuna tesi irrigua sono state definite le principali variabili di stato ricavate dall'interpolazione dei dati ottenuti tramite le misurazioni biometriche effettuate nel corso della stagione vegeto-produttiva, ovvero:

- evoluzione del numero di foglie;
- evoluzione del peso secco e fresco della foglia;
- evoluzione della superficie fogliare fotosinteticamente attiva;
- evoluzione del peso fresco e secco del germoglio;
- evoluzione del peso fresco e secco dell'infruttescenza.



Il modello di simulazione è stato suddiviso in 3 sub-modelli, ognuno dei quali descrive un processo base del ciclo del carbonio nella pianta, ovvero la produzione di fotosintetati, la respirazione e l'allocazione dei carboidrati.

Il bilancio stagionale del carbonio di un ramo è positivo se gli input, ovvero la quantità di assimilati (A) prodotta, risultano superiori agli output, cioè il quantitativo di carbonio utilizzato per la respirazione (R) e per la crescita (C) dei diversi organi, ovvero:

$$A > R + C$$

e più precisamente,

$$AN > R_{fo} + C_{fo} + R_g + C_g + R_{infr} + C_{infr} \quad (6)$$

dove:

AN = Assimilazione netta dell'intero ramo;

R<sub>fo</sub> = Respirazione di tutte le foglie;

C<sub>fo</sub> = Crescita di tutte le foglie;

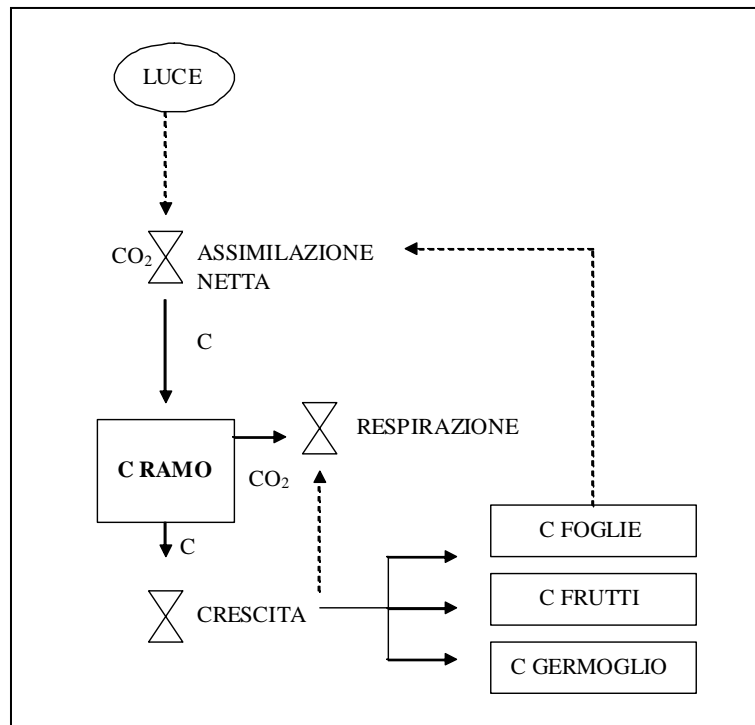
R<sub>g</sub> = Respirazione del germoglio;

C<sub>g</sub> = Crescita del germoglio;

R<sub>infr</sub> = Respirazione di tutte le infruttescenze;

C<sub>infr</sub> = Crescita di tutte le infruttescenze.

Nella figura 8 viene riportato il diagramma relazionale schematico del modello in cui sono rappresentate tutte le componenti del sistema in studio, ovvero le voci attive (input o source) e passive (output o sink) del bilancio.



**Figura 8 - Schema relazionale del modello tramite l'uso dei diagrammi di flusso (box = accumulo di carbonio; valvole = processo; cerchi = input esterno; linee continue = flussi di carbonio; linee tratteggiate = flussi di informazione).**

L'assimilazione netta istantanea ( $\mu\text{mol CO}_2 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) delle foglie del ramo ( $\text{AN}_i$ ) è stata calcolata tramite l'equazione di risposta della fotosintesi alla luce (eq. 2) utilizzando i parametri ottenuti dalle misurazioni effettuate sulle diverse tesi. In particolare, quando i valori del PAR incidenti sulla singola foglia (ottenuti come percentuale di intercettazione della foglia rispetto al PAR misurato dalla capannina meteorologica) risultavano inferiori al punto di compensazione ottenuto per ciascuna tesi, allora l'assimilazione netta è stata considerata pari a zero. Nel caso in cui la luce incidente fosse risultata maggiore del punto di compensazione allora è stata utilizzata l'equazione 2.

I valori di  $A_{\text{max}}$  (parametro  $b$ ) ottenuti dalle curve di risposta (eq. 2) sono stati modificati nel corso della stagione sulla base dei valori riscontrati dalle misurazioni effettuate in campo, in modo da avere una simulazione realistica della sua variabilità nel corso della stagione. Il PAR ambientale,

misurato dalla capannina, è stato corretto sulla base dell'intercettazione effettiva (% del PAR ambientale) di ciascuna foglia in funzione della sua posizione ed inclinazione nel manto vegetale che ha determinato differenti livelli di irraggiamento nel tempo e nello spazio.

In seguito il valore di assimilazione netta istantanea ( $AN_i$ ) ottenuto è stato corretto per l'area fogliare della singola foglia e quindi moltiplicato per il numero totale di foglie del germoglio.

I valori medi di respirazione di riferimento a 20°C ( $\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ) della foglia e dell'infruttescenza, misurati nel corso della stagione vegeto-produttiva, sono stati corretti in funzione della temperatura effettivamente registrata ogni ora dalla capannina meteorologica (eq. 5 – Marra et al., 2009).

I valori di respirazione effettiva istantanea per grammo di sostanza fresca così ottenuti sono stati dunque moltiplicati per il peso fresco dei diversi organi del ramo nel corso della stagione vegeto-produttiva per ottenere l'andamento del tasso di respirazione istantanea.

L'assimilazione lorda istantanea è stata quindi ricavata sommando i valori di respirazione effettiva istantanea della foglia ai valori di  $AN_i$ .

I valori di respirazione effettiva istantanea e ed assimilazione lorda istantanea sono stati moltiplicati per 3600 (numero di secondi per ora) per ottenere un andamento dei suddetti parametri su base oraria.

Il carbonio utilizzato per la crescita dei vari organi è stato calcolato tramite l'Absolute Growth Rate dell'organo (eq.1) e viene espresso in  $\mu\text{mol}$  per ora.

Il peso secco di ciascun organo (g) nel corso della stagione è stato trasformato in  $\mu\text{mol}$  di C tramite la seguente formula:

$$C_{T_1}(\mu\text{mol}) = \frac{(PS_{(T_1)} \cdot 0,45)}{12} \cdot 1000000 \quad (7)$$

dove T rappresenta il tempo (GDPF),  $PS_{(T_1)}$  rappresenta il valore di peso secco nella data T1; 0,45 i grammi di carbonio per grammo di sostanza secca (Negi *et al.*, 2003); 12 il peso in grammi di una mole di carbonio.

Tutti i parametri e le relative unità di misura utilizzate nel modello sono riassunte in tab. 7.

**Tabella 7 - Riassunto di tutti i parametri utilizzati nella costruzione del modello e delle relative unità di misura.**

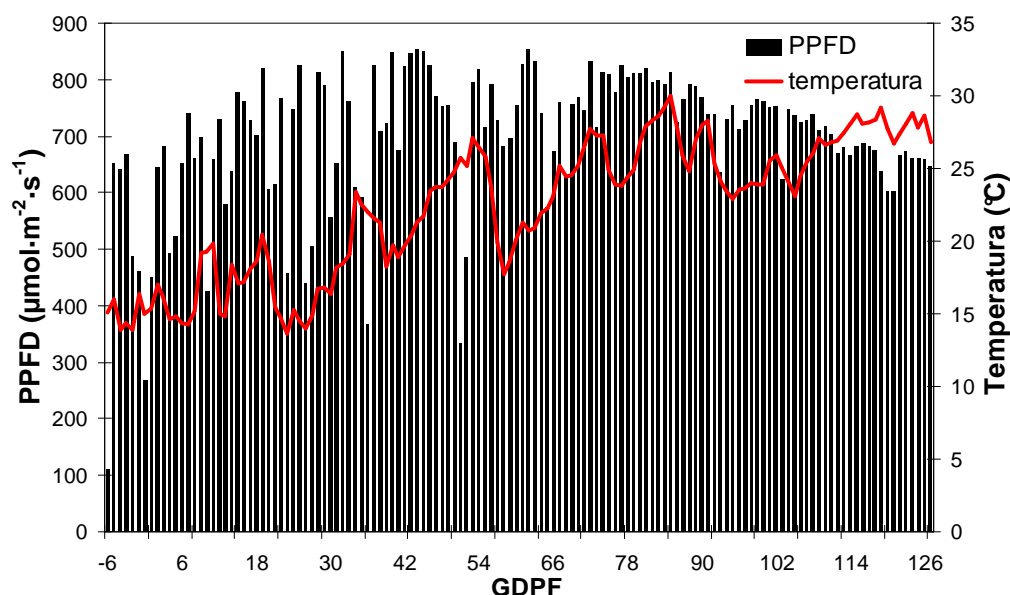
Submodello	parametro	Unità di misura	origine
<b>Fotosintesi</b>	Tempo	Ore	
	Sec_ora	3600	
	PAR ambiente	$\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$	misurato
	Intercettazione foglia	%	misurato
	PAR_foglia	$\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$	$(\text{PAR}_{\text{amb.}}) * (\text{interc}_{\text{foglia}})$
	Amax	$\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$	misurato
	Area fogliare	$\text{m}^2$	misurato
	Intercetta (a)	Adimens.	misurato
	Eff.quantica (c)	Adimens.	misurato
	Punto_di_comp.	$\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$	$\logn((a + \text{Amax})/\text{Amax})/c$
	N° foglie germoglio	Adimens	Misurato
	<b>ASSIMILAZIONE 1</b>	$\mu\text{mol/s}$	$[(a + (\text{Amax} - a) * (1 - \exp(C * \text{par}_{\text{fog}})) * \text{area}_{\text{fog}})]$
	<b>ASSIMILAZIONE TOT.</b>	$\mu\text{mol/ora}$	$(\text{Ass.1}) * (n_{\text{foglie}}) * (\text{sec}_{\text{ora}})$
	<b>Respirazione</b>	Temperatura ambiente	°C
Q <sub>10</sub>		Adimens.	Marra et al. 2009
T <sub>ref</sub>		20°C	
PF_organo		$\text{g}_{\text{pf}}$	Misurato
Resp_ref (20°C)		$\mu\text{mol g}_{\text{pf}}^{-1}\text{s}^{-1}$	Marra et al 2009
Resp_corr_temp		$\mu\text{mol g}_{\text{pf}}^{-1}\text{s}^{-1}$	$\text{resp}_{\text{ref}} * Q_{10}^{((\text{temperatura} - T_{\text{ref}})/10)}$
<b>RESPIRAZIONE ORGANO</b>		$\text{Umol/ora}$	$(\text{Resp}_{\text{corr}_{\text{temp}}}) * (\text{PF}_{\text{org}}) * (\text{sec}_{\text{ora}})$
<b>Crescita organi</b>	PS_organ	g	Misurato
	%_C_PS	0,45	Negi <i>et al.</i> , 2003
	Peso_mole_C	12 g	
	$\mu\text{mol C organi}$	$\mu\text{mol}$	$(\text{PS} * \%_{\text{C\_PS}}) / \text{peso}_{\text{mol\_C}} * 1000000$
	AGR	$\mu\text{mol/ora}$	$\text{Umol C organi f(x) tempo}$
	<b>ACCUMULO C ORGANO</b>	$\mu\text{mol/ora}$	$\Sigma \text{AGR}$

## 8.8 – Risultati e discussioni

### 8.8.1 – Dati rilevati sperimentalmente

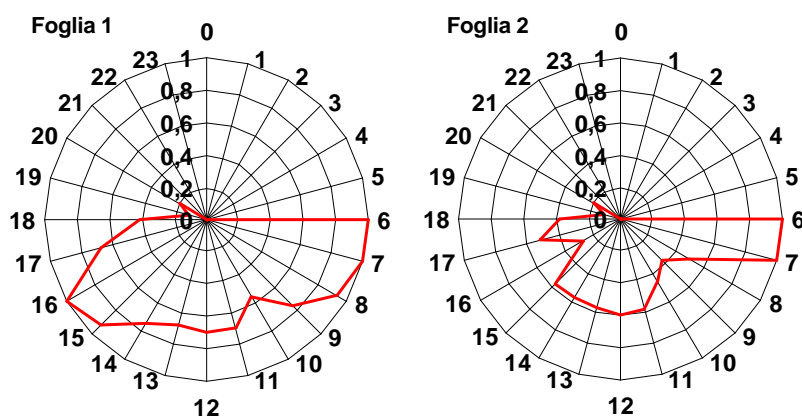
I dati relativi ai fattori climatici ed ai parametri biometrici e fisiologici dei vari organi del ramo sono stati elaborati in modo tale da ottenere funzioni e/o andamenti da implementare nel modello per effettuare la simulazione.

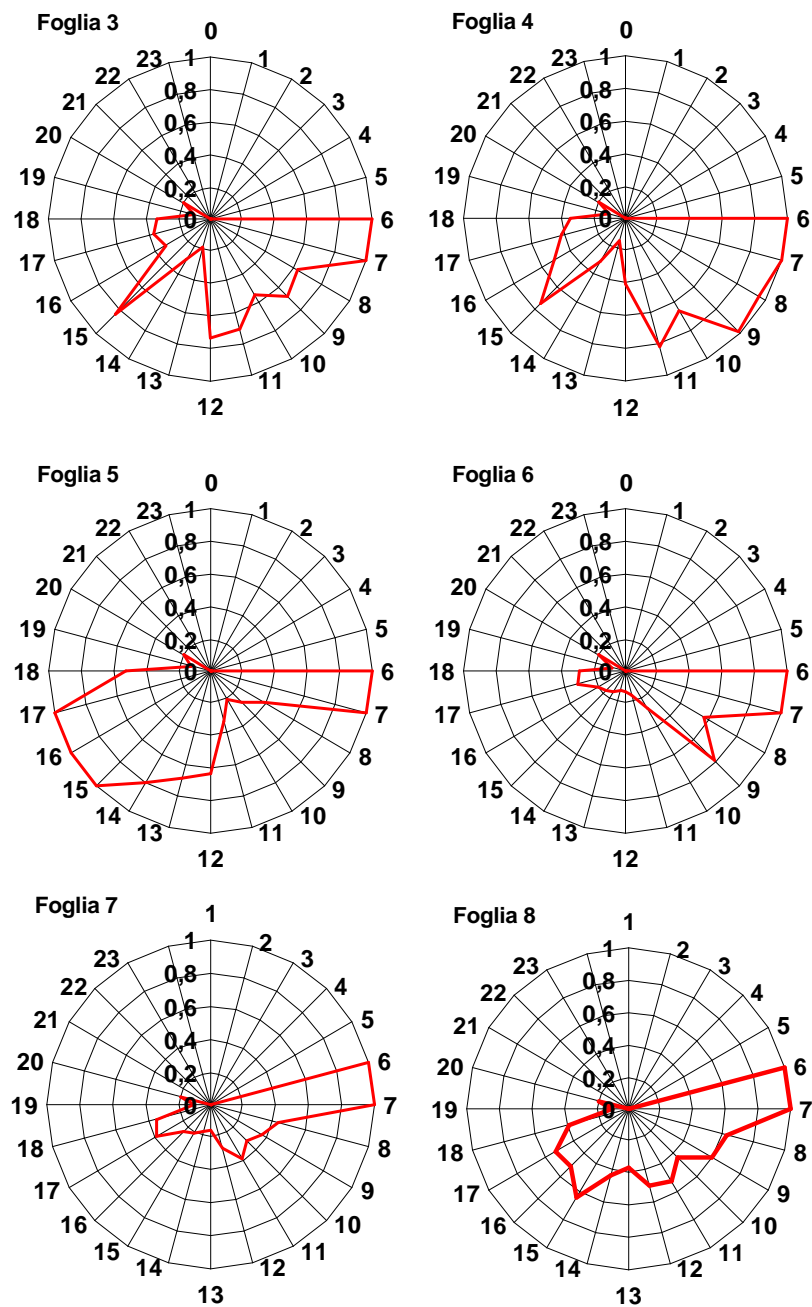
Nella figura 9 sono riportati i valori medi giornalieri di PPFD (dalle ore 6.00 alle 20.00) e di temperatura registrati nel corso dell'intera stagione vegeto-produttiva 2010. Le temperature hanno fatto registrare valori medi giornalieri di circa 15° C nelle prime fasi del ciclo delle piante; dai 30 GDPF fino a settembre si è osservato un incremento delle temperature medie giornaliere con valori di circa 25-30°C. Il PPFD medio giornaliero non ha mai superato le 800  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  e si è sempre mantenuto al di sopra delle 600  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  ad eccezione, soprattutto nella prima metà del ciclo vegeto-produttivo delle piante, di qualche giornata particolarmente nuvolosa durante le quali è sceso al di sotto delle 400  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ .



**Figura 9 - Valori medi giornalieri di PPFD (registrato dalle ore 5.00 alle 20.00) e temperatura rilevati nel corso dell'intera stagione vegeto-produttiva 2010.**

I grafici in fig. 10 mostrano l'andamento della luce mediamente intercettata dalle singole foglie del ramo nell'arco della giornata (dalle 6.00 alle 20.00), espressa come frazione (%) del PPFD misurato all'esterno della chioma. Dalle 6.00 alle 8.00 del mattino tutte le foglie del germoglio hanno intercettato totalmente la radiazione luminosa ambientale. Infatti, l'elevata inclinazione dei raggi solari e la posizione del rametto su cui sono state effettuate le misure, hanno fatto sì che nelle prime ore del mattino la totalità della radiazione luminosa filtrasse attraverso la chioma della pianta. A partire dalle 8.00, al diminuire dell'inclinazione dei raggi solari, si è osservata una riduzione della radiazione incidente su quasi tutte le foglie fino a valori del 40% (foglia 2) o addirittura in alcuni casi del 20% (foglia 5); la foglia 1 e la foglia 4, contrariamente alle altre, alle 9 del mattino intercettavano rispettivamente il 100% e l'80% della radiazione misurata all'esterno della chioma. Nelle ore successive, a causa dell'intensificarsi dei fenomeni di ombreggiamento, si è verificata una diminuzione dell'intercettazione dell'intero germoglio anche con una variabilità tra le diverse foglie in relazione all'angolo di inserzione sul ramo. In particolare, la luce incidente sulle foglie 6 e 7 ha fatto registrare valori del 20% intorno alle ore 13, ed è rimasta sempre al di sotto del 40% nel corso del resto della giornata. Comportamento simile hanno mostrato le foglie 2 e 8 con valori percentuali che vanno dal 40 al 60%. Le foglie 3, 4 e 5 invece hanno fatto registrare una risalita della percentuale di intercettazione sino a valori del 80/100% nelle prime ore pomeridiane. Infine, particolare è stato il comportamento della foglia 1 che non ha mai fatto registrare valori inferiori al 60%.

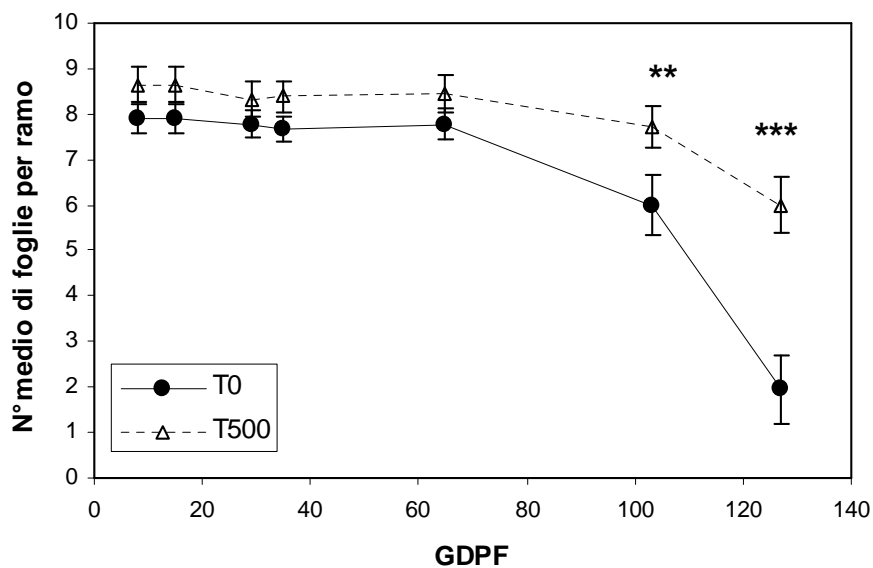




**Figura 10 - Andamento giornaliero (dalle 6.00 alle 20.00) della radiazione luminosa mediamente intercettata dalle singole foglie del germoglio, espressa come frazione (%) del PPF misurato all'esterno della chioma.**

Il numero medio di foglie per germoglio è stato influenzato positivamente dal trattamento irriguo (fig. 11). In particolare, ad inizio stagione il germoglio faceva registrare la media di 8 foglie circa in entrambe le tesi e le differenze tra le piante irrigate e quelle in asciutto non sono risultate statisticamente

significative. I processi di filloptosi sono iniziati a partire dai 65 GDPF e sono stati molto più marcati nelle piante non irrigate; da questo momento in poi l'influenza dell'irrigazione sul numero di foglie del germoglio diventa evidente; a 100 GDPF le differenze tra le due tesi irrigue risultano statisticamente significative ( $P < 0,01$ ). Alla raccolta (127 GDPF) le piante in asciutto avevano perso mediamente il 78% delle foglie del germoglio mentre le piante irrigate soltanto il 25% ( $P < 0,001$ ).



**Figura 11 – Evoluzione stagionale del numero medio di foglie per ramo in piante di pistacchio in asciutto (T0) ed in irriguo (T500) nel 2010. (\*\* statisticamente significativo  $P \leq 0,01$ ; \*\*\* statisticamente significativo  $P \leq 0,001$ ).**

Nessuna differenza significativa è stata riscontrata nei valori di peso secco della singola foglia al variare del trattamento irriguo (fig.12). I dati sono stati interpolati per mezzo della medesima funzione sigmoidale del tipo:

$$y = \frac{a}{1 + e^{\left(\frac{x-b}{c}\right)}} \quad (8)$$

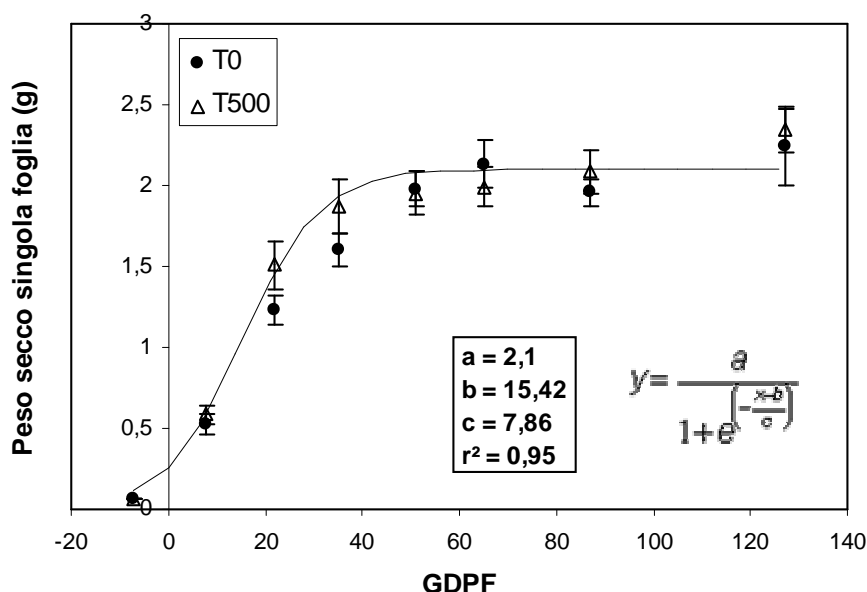
Dove:

$$a = 2,1; b = 15,42; c = 7,863; r^2 = 0,95.$$



In particolare  $y$  rappresenta la variabile dipendente (ovvero il peso secco della foglia in grammi),  $x$  è il tempo inteso come giorni dopo la piena fioritura,  $a$  è l'asintoto della funzione,  $b$  rappresenta il valore (in giorni) al quale la funzione è il 50% della sua ampiezza e  $c$  definisce la forma della curva (valore adimensionale).

Il peso secco della singola foglia è aumentato in maniera esponenziale nelle prime fasi di crescita sino a raggiungere valori di circa 1 grammo a 15 GDPF ( $x = b$ ); la crescita prosegue linearmente fino ad un peso secco medio della singola foglia di 2,1 grammi ( $y = a$ ) che viene raggiunto intorno ai 56 GDPF. Da questo momento in poi non si è registrato più alcun incremento del peso secco della singola foglia.



**Figura 12 – Evoluzione stagionale del peso secco della singola foglia (g) in piante in asciutto (T0) ed in irriguo (T500) di pistacchio nel 2010.**

L'andamento stagionale del peso fresco della singola foglia (fig. 13) è stato ottenuto interpolando i dati sperimentali tramite una funzione esponenziale del tipo:

$$y = 4 \cdot a \cdot e^{\left(\frac{x-b}{c}\right) \left(1 - e^{\left(\frac{x-b}{c}\right)}\right)} \quad (9)$$

Dove:

y = peso fresco della foglia (g);

a = valore massimo di peso fresco della foglia nel corso della stagione;

b = l'intersezione della curva con l'asse delle ascisse;

c = valore adimensionale che determina la forma della curva.

Per la tesi non irrigata (T0):

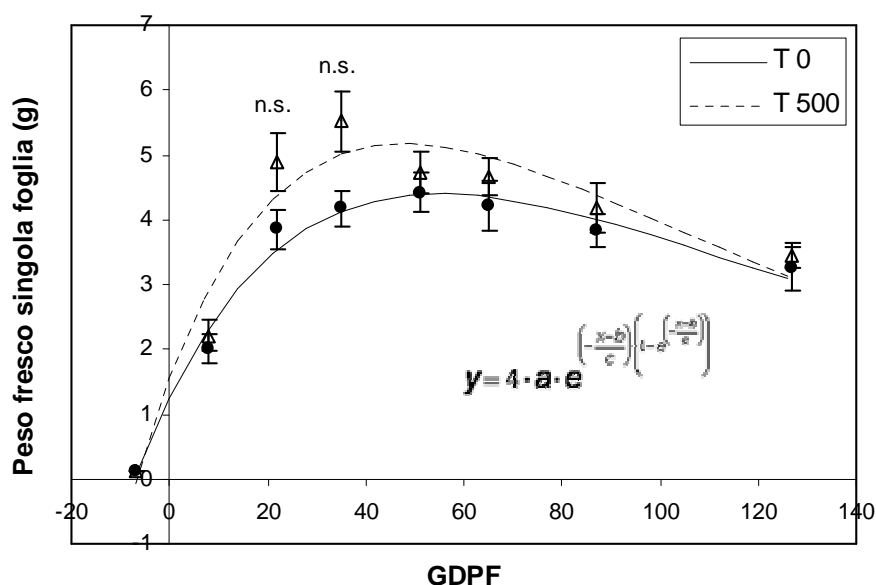
a = 4,39; b = -7,23; c = 89,85.

Per la tesi irrigata (T500):

a = 5,1; b = -6,76; c = 79,99.

I coefficienti di correlazione ( $r^2$ ) sono stati molto elevati in entrambe le interpolazioni (0,98 per la tesi in asciutto e 0,92 per la tesi in irriguo) ma le differenze tra le due tesi non sono risultate statisticamente significative.

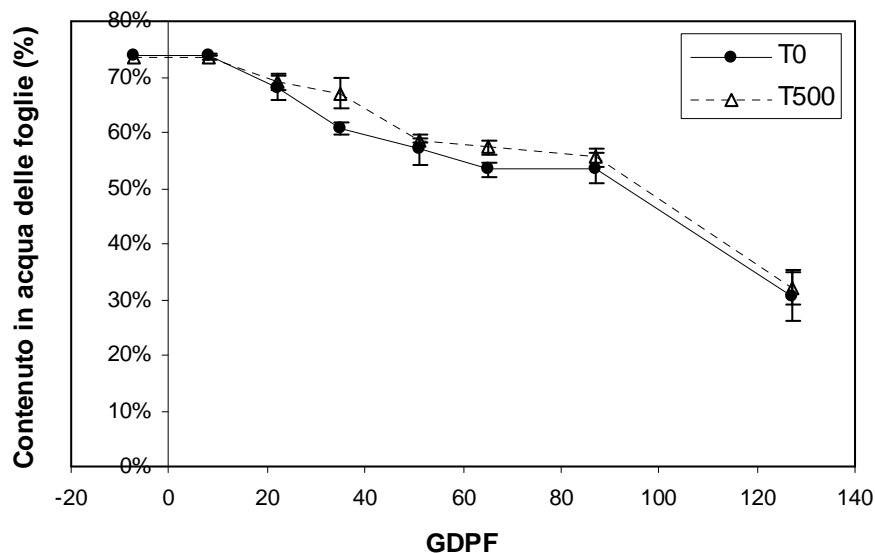
La foglia ha iniziato ad accrescersi circa 7 giorni prima della piena fioritura (parametro b) e ha raggiunto i valori massimi di peso fresco (parametro a) a 56 GDPF. Da questo momento in poi si è assistito ad una diminuzione del peso fresco della singola foglia che alla raccolta ha fatto registrare valori medi di 3 grammi in entrambe le tesi.



**Figura 13 – Evoluzione stagionale del peso fresco della singola foglia (g) in piante in asciutto (T0) ed in irriguo (T500) di pistacchio nel 2010.**  
(n.s.=non significativo).

La figura 14 mostra l'andamento del contenuto idrico delle foglie nel corso della stagione vegeto-produttiva, espresso come percentuale rispetto al peso fresco della singola foglia.

Le differenze tra le due tesi non sono apparse significative. Il contenuto idrico della foglia diminuisce progressivamente nel corso della stagione passando da valori pari a circa 70% del peso fresco della foglia ad inizio stagione a valori del 30% alla raccolta. Questa perdita di acqua spiega la diminuzione dei valori di peso fresco della singola foglia che si verifica a dopo i 56 GDPF (fig.13); a partire da questa data, infatti, non si registra più alcun incremento in peso secco (fig. 12) mentre il contenuto in acqua della foglia continua a diminuire.



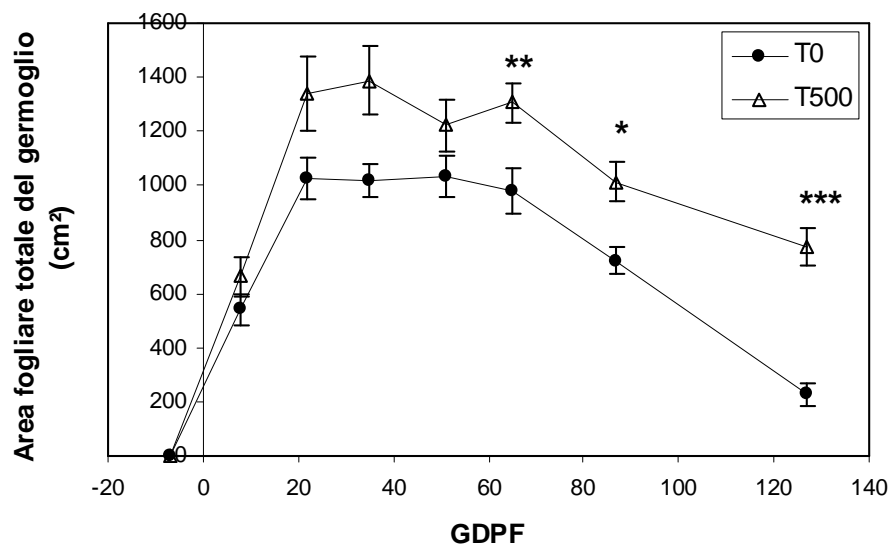
**Figura 14 – Andamento stagionale del contenuto idrico della foglia espresso come frazione (%) del peso fresco in piante di pistacchio in asciutto (T0) ed in irriguo (T500) nel 2010.**

L'irrigazione ha influito positivamente sull'andamento della superficie fogliare complessiva del germoglio nel corso della stagione vegeto-produttiva (fig. 15).

I fenomeni di filloptosi discussi in figura 11 hanno determinato differenze significative tra le due tesi già a partire da 65 GDPF; a fine stagione le piante

non irrigate hanno fatto registrare una superficie fogliare totale del germoglio di 226 cm<sup>2</sup> mentre nelle piante irrigate è risultata di 774 cm<sup>2</sup>.

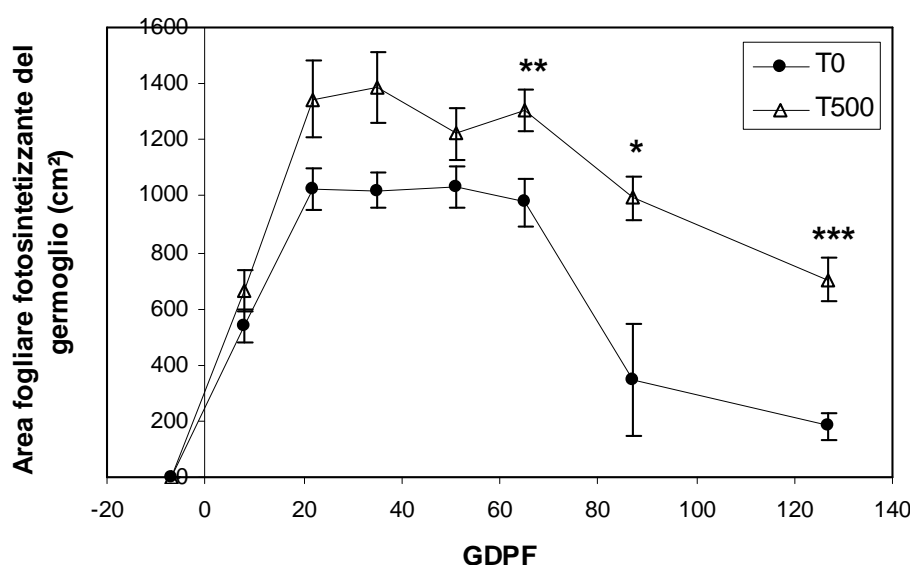
Inoltre, a partire dagli 87 GDPF si sono verificati dei fenomeni di clorosi nelle foglie non cadute che nelle piante in asciutto hanno determinato una riduzione della superficie fogliare fotosinteticamente attiva pari al 57,7% contro il 2,06% delle piante irrigate (tab.8). Questo fenomeno ha incrementato le differenze già riscontrate tra le due tesi in termini di superficie totale. Alla raccolta, infatti, le foglie rimaste nel germoglio delle piante non irrigate hanno presentato una superficie fotosintetizzante complessiva di 183 cm<sup>2</sup>, ovvero il 74% di quella totale; di contro, le piante irrigate hanno fatto registrare una superficie fotosintetizzante di 702 cm<sup>2</sup>, pari cioè all'89% di quella totale (fig 16; tab 3).



**Figura 15 – Evoluzione stagionale della superficie fogliare complessiva del germoglio (cm<sup>2</sup>) in piante di pistacchio in asciutto (T0) ed in irriguo (T500) nel 2010.** (\*statisticamente significativo P≤0,05; \*\* statisticamente significativo P≤0,01; \*\*\* statisticamente significativo P≤0,001).

**Tabella 8 – Numero medio di foglie e percentuale di superficie non fotosinteticamente attiva (in seguito a clorosi) del germoglio di piante di pistacchio in asciutto (T0) ed in irriguo (T500) a fine stagione vegeto-produttiva 2010 (87 GDPF; 127 GDPF).**

GDPF	T0		T500	
	N° medio foglie/germoglio	Superficie fogliare clorotica (%)	N° medio foglie/germoglio	Superficie fogliare clorotica (%)
87	6 ( $\pm 0,64$ )	57,78 ( $\pm 24,76$ )	7,72 ( $\pm 0,44$ )	2,06 ( $\pm 1,86$ )
127	1,94 ( $\pm 0,76$ )	26,40 ( $\pm 8,16$ )	6 ( $\pm 0,62$ )	11,30 ( $\pm 2,74$ )



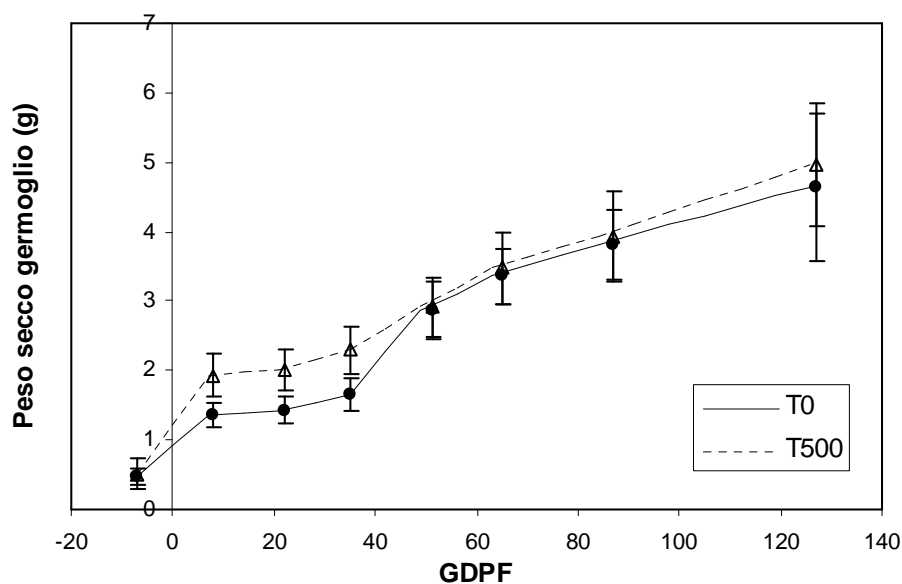
**Figura 16 – Evoluzione stagionale della superficie fogliare fotosinteticamente attiva del germoglio (cm<sup>2</sup>) in piante di pistacchio in asciutto (T0) ed in irriguo (T500) nel 2010. (\*statisticamente significativo  $P \leq 0,05$ ; \*\* statisticamente significativo  $P \leq 0,01$ ; \*\*\* statisticamente significativo  $P \leq 0,001$ ).**

Nessuna differenza significativa è stata rilevata in funzione del trattamento irriguo per quanto riguarda il peso secco (fig. 17) ed il peso fresco (fig. 18) del germoglio.

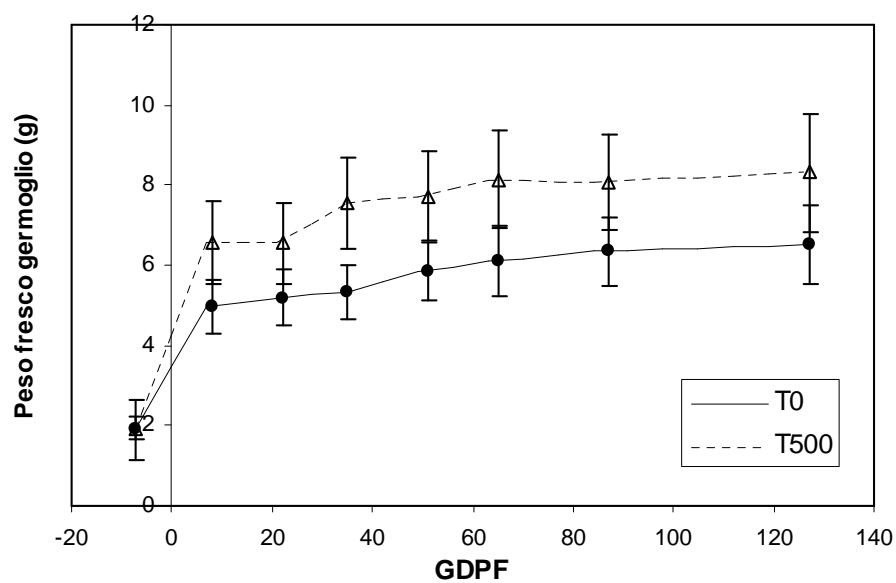
Nel corso della stagione vegeto-produttiva il germoglio ha fatto registrare due fasi caratterizzate da differenti tassi di crescita. Durante le prime settimane il germoglio ha mostrato, ad eccezione di una breve stasi avvenuta tra i 15 ed i 35 GDPF, un tasso di crescita espresso in termini di sostanza secca elevato ( $AGR = 0,06/0,08 \text{ g} \cdot \text{d}^{-1}$ ). Dai 70 GDPF in poi si assiste ad un

abbassamento del tasso di crescita assoluto che si assesta intorno a valori di  $0,02 \text{ g}\cdot\text{d}^{-1}$ .

Il peso fresco non subisce alcun incremento in questa fase del ciclo infatti l'accumulo di sostanza secca viene compensato dalla disidratazione cui vanno incontro i tessuti nel corso della stagione.



**Figura 17 – Evoluzione stagionale del peso secco del germoglio (g) in piante di pistacchio in asciutto (T0) ed in irriguo (T500) nel 2010.**



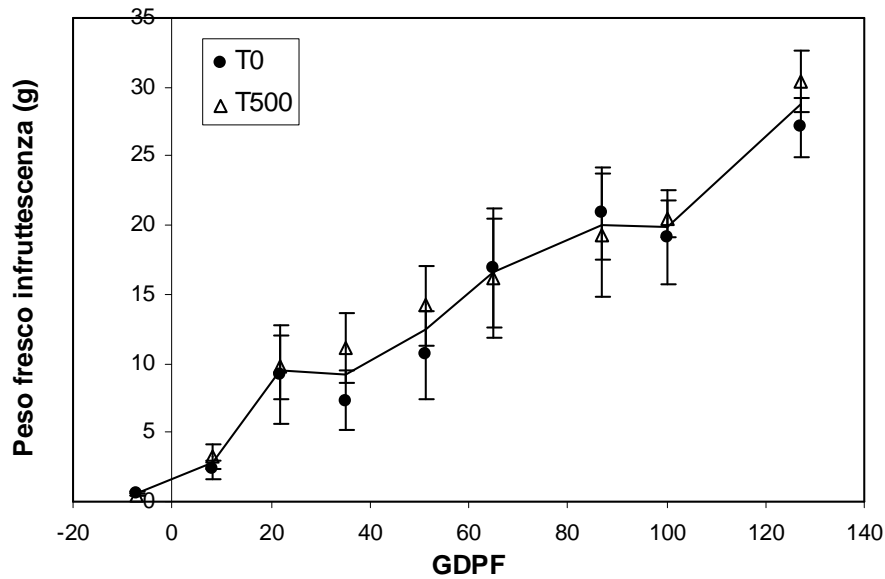
**Figura 18 – Evoluzione stagionale del peso fresco del germoglio (g) in piante di pistacchio in asciutto (T0) ed in irriguo (T500) nel 2010.**

Da un punto di vista produttivo, un ramo carico ha prodotto mediamente 3 infruttescenze costituite da 13 frutti nelle piante in asciutto e 14 nelle piante irrigate (tab. 9).

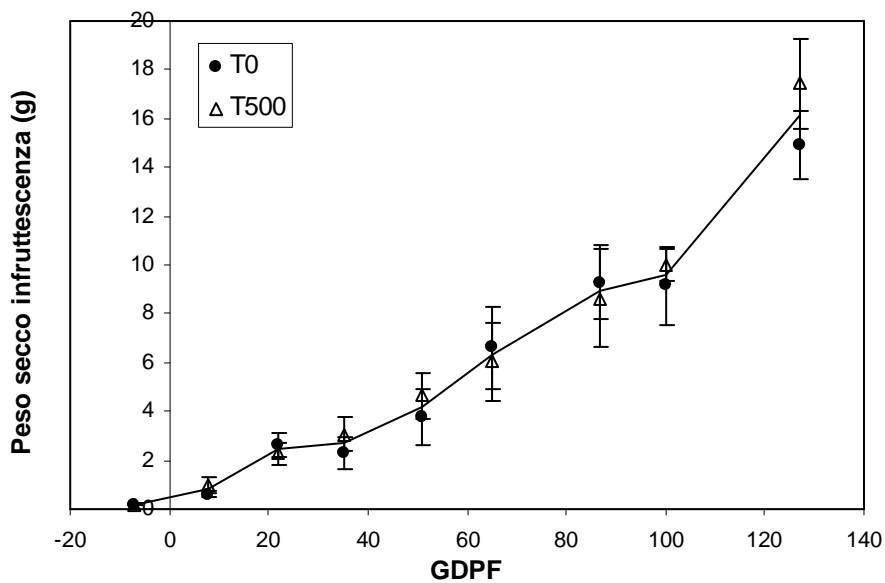
Il tasso di crescita dell'infruttescenza, espressa sia in termini di peso fresco che di peso secco, non ha mostrato variabilità in funzione del trattamento irriguo, pertanto i dati delle due tesi sono stati interpolati tramite la medesima curva (fig. 19 e fig. 20).

Durante le prime settimane dopo l'antesi, durante la fase di rapida espansione dell'endocarpo, l'infruttescenza ha mostrato un tasso di crescita assoluto molto elevato ( $0,1 \text{ g}\cdot\text{d}^{-1}$ ). A partire dai 22 GDPF, durante le ultime due settimane di maggio, si assiste ad una stasi ( $\text{AGR} = 0,01\text{-}0,09 \text{ mg}\cdot\text{d}^{-1}$ ) dovuta all'intensa cascola dei frutticini. Il peso secco dell'infruttescenza continua ad aumentare ( $\text{AGR} = 0,11 \text{ g}\cdot\text{d}^{-1}$ ) in maniera costante sino ad 87 GDPF. A fine luglio si assiste ad un decremento nel tasso di crescita dell'infruttescenza fino a valori di  $\text{AGR}$  pari a circa  $0,04\text{-}0,08 \text{ g}\cdot\text{d}^{-1}$ ; in questa fase l'espansione dei frutti si ferma ed inizia la lignificazione dell'endocarpo, che si protrae per circa 2 settimane.

Infine, nell'ultimo mese prima della raccolta, in concomitanza con la fase di rapida crescita dell'embrione, il peso secco dell'infruttescenza aumenta nuovamente, passando da circa 10 g registrati durante la prima settimana di agosto al peso finale di 16g (primi di settembre); l'AGR dell'infruttescenza in questa fase è stato di  $0,24 \text{ g}\cdot\text{d}^{-1}$



**Figura 19 – Evoluzione stagionale del peso fresco dell’infruttescenza (g) in piante di pistacchio in asciutto (T0) ed in irriguo (T500) nel 2010.**

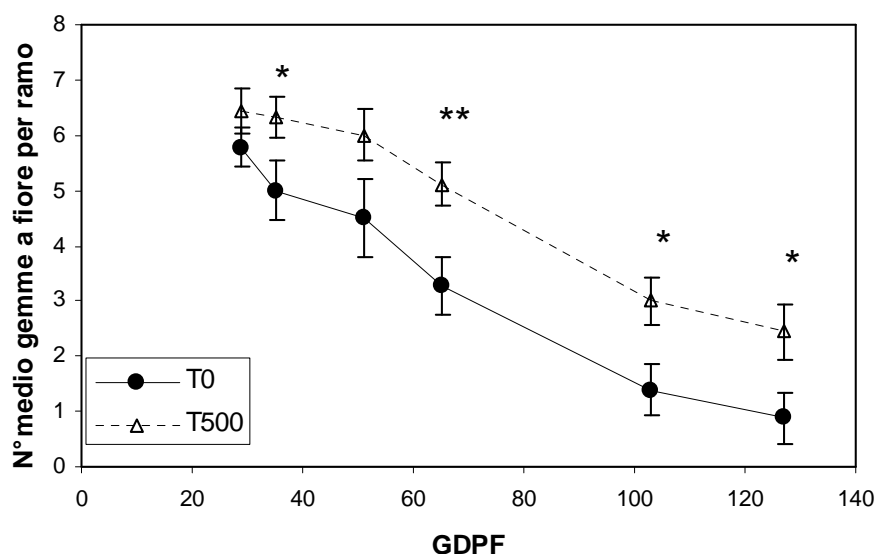


**Figura 20 –Evoluzione stagionale del peso secco dell’infruttescenza (g) in piante di pistacchio in asciutto (T0) ed in irriguo (T500) nel 2010.**

Nessuna differenza significativa è stata registrata a 29 GDPF tra il numero medio di gemme a fiore per ramo delle piante in asciutto (5,7) ed in irriguo (6,4). L’irrigazione ha invece determinato una riduzione della cascola delle gemme a fiore (fig. 21). A fine stagione, infatti, il numero di gemme rimaste sui rami delle piante irrigate (2,4) è risultato significativamente superiore ( $p \leq 0,05$ ) rispetto a quello delle piante non irrigate (0,8). La



percentuale di gemme absconse è stata dunque l'86% nelle piante in asciutto ed il 63% in quelle in irriguo; inoltre la massima intensità di cascola si è verificata tra i 65 ed i 100 GDPF.



**Figura 21 – Andamento stagionale del numero medio di gemme a fiore per ramo in piante di pistacchio in asciutto (T0) ed in irriguo (T500) nel 2010** (\* = statisticamente significativo  $P \leq 0,05$ ; \*\* = statisticamente significativo  $P \leq 0,01$ ).

**Tabella 9 – Numero medio di infruttescenze, di gemme a fiore e di foglie per ramo; numero medio di frutti per infruttescenza, in piante di pistacchio in asciutto (T0) ed in irriguo (T500) al momento della raccolta (127 GDPF).** (n.s. = non significativo; \* = statisticamente significativo  $P \leq 0,05$ ; \*\*\* = statisticamente significativo  $P \leq 0,001$ ).

Parametro	Tesi 0	Tesi 500
N°foglie per germoglio	1,94 ( $\pm 0,76$ ) ***	6,00 ( $\pm 0,62$ )
N°gemme a fiore per ramo	0,88 ( $\pm 0,46$ ) *	2,44 ( $\pm 0,50$ )
N°infruttescenze per ramo	3,00 ( $\pm 0,29$ ) n.s.	3,22 ( $\pm 0,23$ )
N°frutti per infruttescenza	12,94 ( $\pm 1,51$ ) n.s.	13,84 ( $\pm 1,34$ )

Per quanto riguarda gli effetti dell'irrigazione sulla fotosintesi (tab. 10), durante la prima parte del ciclo vegeto-produttivo delle piante il tasso di assimilazione massima non è risultato statisticamente differente nella tesi irrigata rispetto al controllo.

A partire dai 63 GDPF il tasso medio di assimilazione massima delle piante in asciutto è risultato sempre inferiore a quello della tesi sottoposta ad

irrigazione. Vale la pena di osservare poi che in entrambe le tesi si è registrato, in accordo con quanto riscontrato da Vemmos *et al.* (1994) su piante di pistacchio, un drastico calo della fotosintesi in corrispondenza del periodo di intenso accrescimento dell’embrione, compreso fra 86 e 100 GDPF, cui è seguita una modesta ripresa nelle epoche successive. La prolungata assenza di acqua alla quale sono state sottoposte le piante in asciutto e di conseguenza, i più consistenti fenomeni di clorosi fogliare, hanno determinato un abbattimento dei tassi fotosintetici molto più marcato (valori di circa  $5 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) rispetto alle piante irrigate (circa  $10 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ).

**Tabella 10 – Tasso di assimilazione massima ( $A_{\text{max}}$ ) di  $\text{CO}_2$  ( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ) in piante di pistacchio in asciutto (T0) ed in irriguo (T500) nel corso della stagione vegeto-produttiva 2010.** (n.s. = non significativo; \*\* = statisticamente significativo  $P\leq 0,01$ ).

GDPF	$A_{\text{max}}$ ( $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ )	
	T0	T500
29	10,98 ( $\pm 0,97$ ) n.s.	10,94 ( $\pm 0,84$ ) n.s.
44	15,62 ( $\pm 0,58$ ) n.s.	16,97 ( $\pm 0,53$ ) n.s.
65	16,98 ( $\pm 1,69$ ) n.s.	17,13 ( $\pm 0,78$ ) n.s.
86	4,66 ( $\pm 0,81$ ) n.s.	10,32 ( $\pm 2,78$ ) n.s.
94	4,17 ( $\pm 0,94$ ) **	9,82 ( $\pm 1,28$ ) **
130	7,85 ( $\pm 1,59$ ) **	15,89 ( $\pm 1,00$ ) **

L’irrigazione non ha avuto alcuna influenza significativa sul tasso di respirazione ( $\text{nmol CO}_2\cdot\text{g}_{\text{pf}}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ ) della foglia e dell’infruttescenza (tab. 11). Inoltre, i valori di respirazione di riferimento ( $20^\circ\text{C}$ ), stimati nel corso della stagione, coincidono con quanto già osservato da Marra *et al.* nel 2009 su piante di pistacchio. La respirazione ha mostrato dei tassi molto elevati ad inizio stagione in coincidenza con le fasi di rapido sviluppo dell’organo; in particolare, il tasso di respirazione della foglia registrato in coincidenza con l’antesi è stato di  $18/19 \text{ nmol CO}_2\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$  mentre l’infruttescenza ha fatto registrare tassi di respirazione di  $9/10 \text{ nmol CO}_2\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$ . Man mano che l’organo raggiunge le sue dimensioni definitive e la sua crescita rallenta anche il tasso di respirazione diminuisce. Le foglie pienamente espanse ( $>36$  GDPF)

hanno fatto registrare tassi di respirazione di  $2 \text{ nmol CO}_2 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ . Valori intermedi di circa  $8 \text{ nmol CO}_2 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$  sono stati riscontrati tra gli 8 ed i 15 GDFP. A fine stagione il tasso di respirazione dell'infruttescenza si assesta intorno a valori di  $0,2 \text{ nmol CO}_2 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ .

**Tabella 11 – Tasso di respirazione di riferimento ( $\text{nmol CO}_2 \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$ ) a  $20^\circ\text{C}$  della foglia e dell'infruttescenza di piante di pistacchio in asciutto (T0) ed in irriguo (T500) nel corso della stagione vegeto-produttiva 2010.** (n.s. = non significativo; \* = statisticamente significativo  $P \leq 0,05$ ).

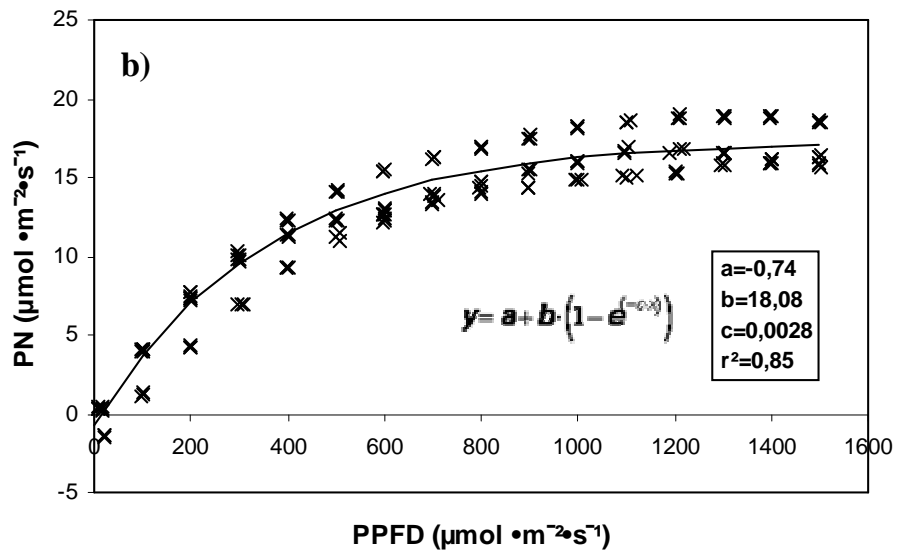
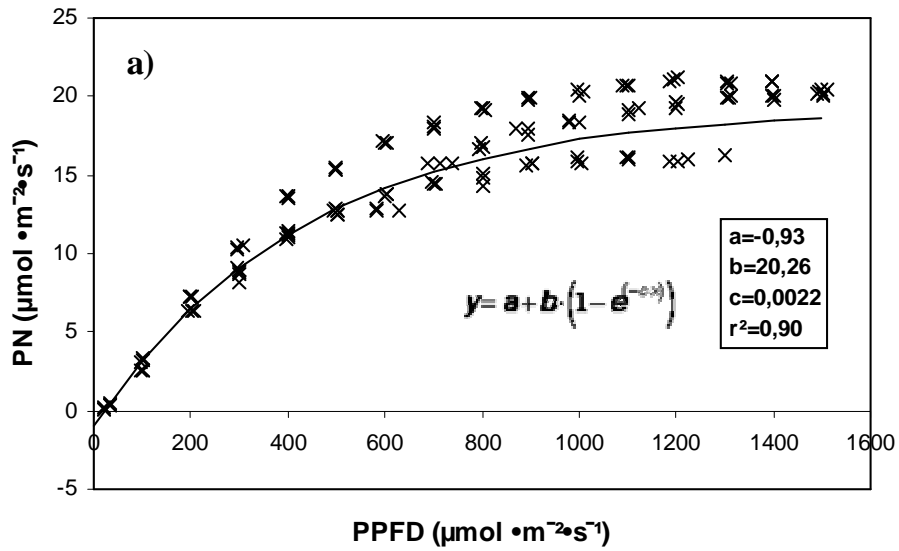
GDFP	Respirazione foglia ( $\text{nmol g}^{-1} \text{ s}^{-1}$ )		Respirazione infruttescenza ( $\text{nmol g}^{-1} \text{ s}^{-1}$ )	
	T0	T500	T0	T500
0	18,57 ( $\pm 1,54$ ) n.s.	19,65 ( $\pm 0,71$ ) n.s.	8,88 ( $\pm 0,47$ ) n.s.	10,59 ( $\pm 0,39$ ) n.s.
8	7,49 ( $\pm 0,77$ ) n.s.	10,47 ( $\pm 2,46$ ) n.s.	6,38 ( $\pm 0,02$ ) n.s.	7,26 ( $\pm 0,73$ ) n.s.
15	5,90 ( $\pm 1,27$ ) n.s.	8,31 ( $\pm 0,81$ ) n.s.	6,26 ( $\pm 0,71$ ) n.s.	4,53 ( $\pm 0,64$ ) n.s.
22	8,22 ( $\pm 0,04$ ) n.s.	8,66 ( $\pm 2,03$ ) n.s.	1,11 ( $\pm 0,07$ ) *	1,91 ( $\pm 0,24$ ) *
51	1,50 ( $\pm 0,04$ ) n.s.	1,38 ( $\pm 0,00$ ) n.s.	0,11 ( $\pm 0,02$ ) n.s.	0,17 ( $\pm 0,02$ ) n.s.
73	1,54 ( $\pm 0,25$ ) n.s.	1,15 ( $\pm 0,31$ ) n.s.	0,22 ( $\pm 0,02$ ) n.s.	0,19 ( $\pm 0,02$ ) n.s.

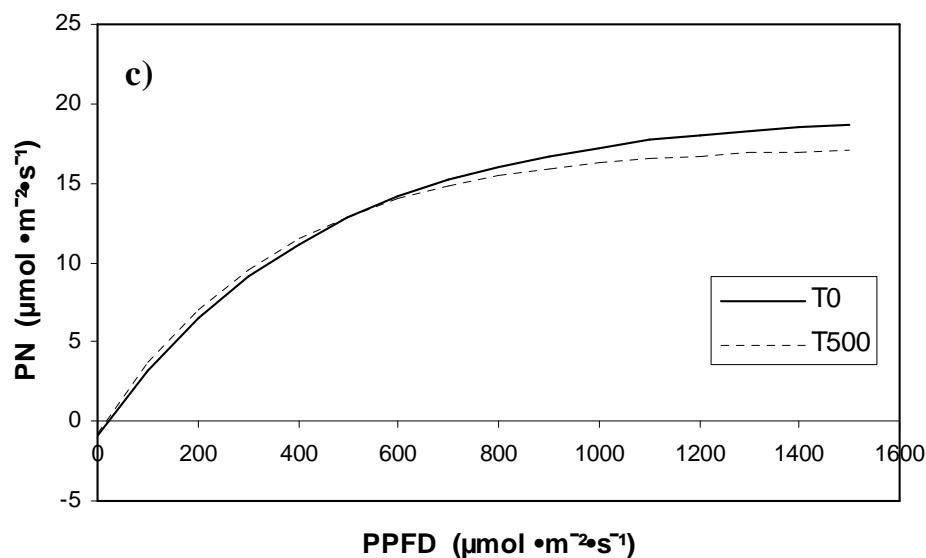
I valori di assimilazione delle piante (fig 22 a e b) ottenuti al variare dei livelli di intensità luminosa ( $\text{PPFD } \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ) sono stati interpolati tramite l'utilizzo della funzione di risposta della fotosintesi alla luce (eq.2). I parametri ottenuti per le due differenti tesi sono mostrati in tab. 12 e non sono statisticamente differenti.

**Tabella 12 - Parametri della curva di risposta della fotosintesi alla luce misurati su foglie di piante di pistacchio in asciutto (T0) ed in irriguo (T500).**

Parametro	$y=a+b*(1-\exp(-c*x))$	
	T0	T500
a	- 0,93	- 0,74
b	20,26	18,08
c	0,0022.	0,0028
$r^2$	0,85	0,90

Dalle curve di risposta sono stati quindi ricavati i valori di PPFD corrispondenti al punto di compensazione delle piante “irrigate” e “in asciutto” pari a  $6,48 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  e  $9,27 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , rispettivamente.

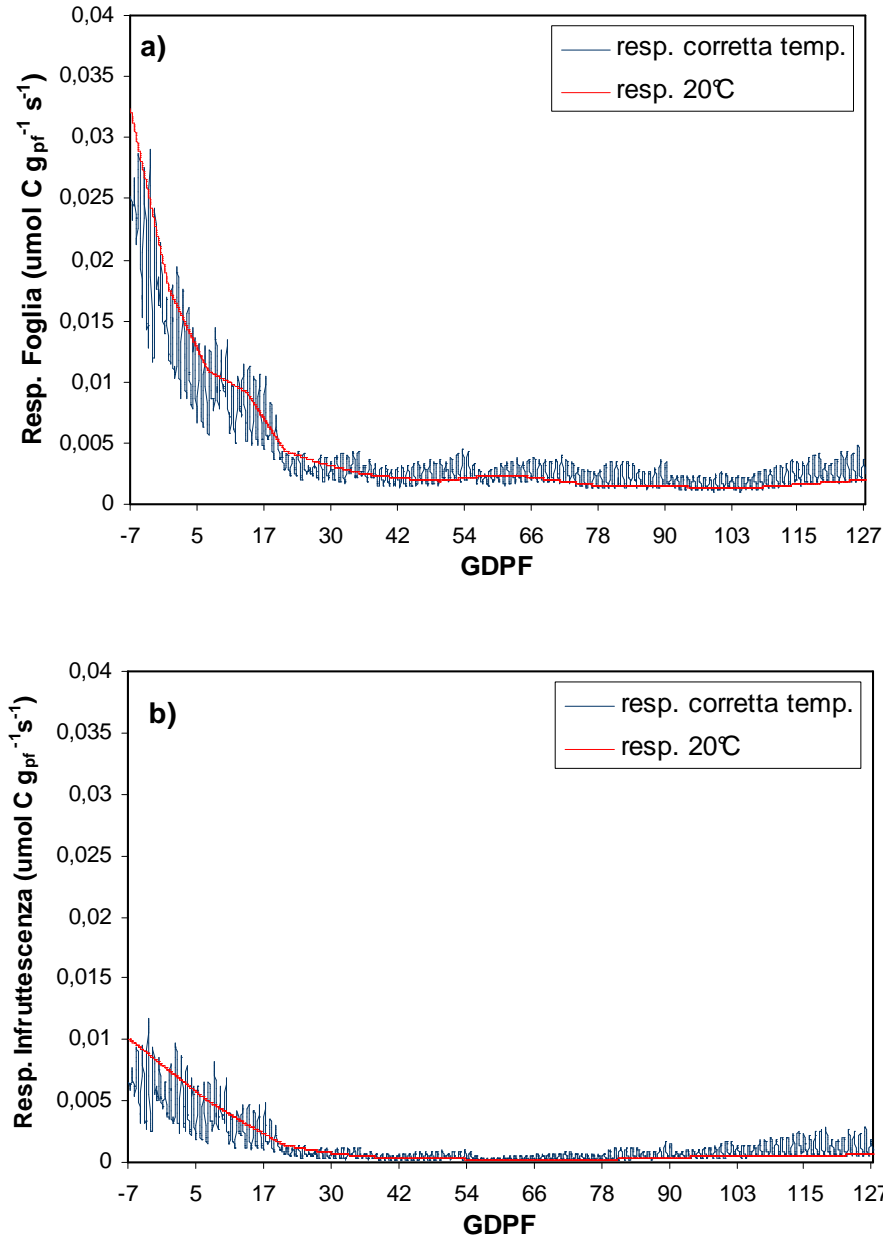




**Fig 22 (a, b, c) – Interpolazione dei valori di fotosintesi ottenuti a diversi valori di irradiazione (PAR) per mezzo dell’equazione 1 per piante appartenenti alla tesi in asciutto (a) ed in irriguo (b) e confronto tra le due curve di risposta (c).**

### 8.8.2 – Simulazioni effettuate con il modello

Tutte le funzioni determinate a partire dai dati sperimentali sono state implementate nel modello. È stato così possibile integrare su base oraria e per l’intera stagione vegetativa tutti i processi (output ed input) fisiologici del ramo nel suo complesso e/o singolarmente dei vari organi che lo compongono. La figura 23 mostra l’andamento della respirazione delle foglie e dell’infruttescenza a 20°C corretta per le temperature effettivamente registrate nel corso della stagione. Nelle prime fasi del ciclo la temperatura dell’aria ha fatto registrare valori quasi sempre al di sotto dei 20°C ( $T_{\text{ref.}}$ ) ed il tasso di respirazione effettiva è risultato inferiore rispetto a quella di riferimento. A partire dai 43 GDPF, in seguito all’aumento delle temperature medie ambientali, si è osservato un incremento dei tassi di respirazione effettiva che è risultato mediamente superiore alla respirazione di riferimento (fig 23 a e b).

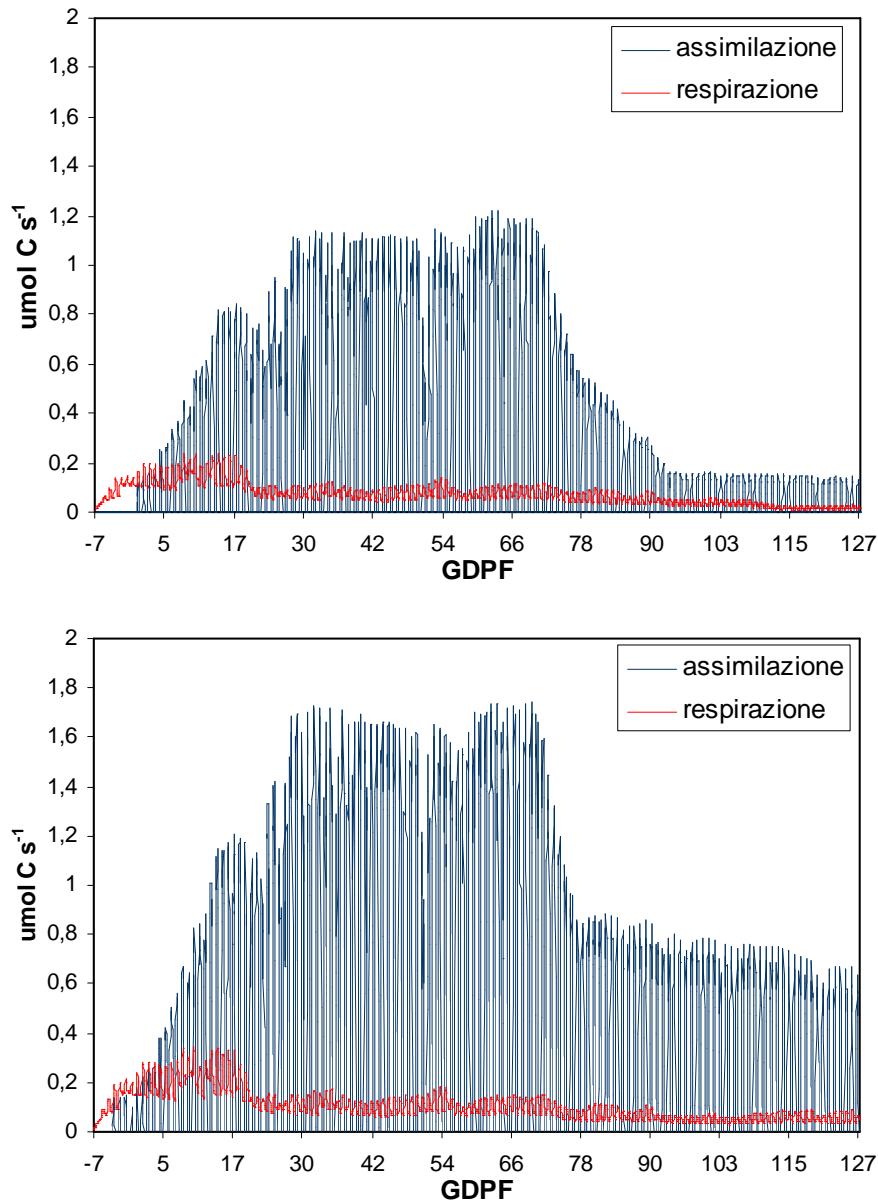


**Figura 23 (a, b) – Tasso di respirazione ( $\mu\text{mol}\cdot\text{g}_{\text{pf}}^{-1}\cdot\text{sec}^{-1}$ ) corretta per la temperatura dell'ambiente ( $R_{\text{eff}}$ ) e tasso di respirazione a  $20^{\circ}\text{C}$  ( $R_{\text{rif}}$ ) della foglia (a) e dell'infruttescenza (b) nel corso della stagione vegeto-produttiva 2010.**

Le figure 24 mostrano la variazione oraria del tasso di respirazione e di assimilazione lorda ( $\mu\text{mol C} \cdot \text{s}^{-1}$ ) del totale delle foglie del germoglio di piante in asciutto (fig. 24 a) ed in irriguo (fig. 24 b) durante la stagione vegeto-produttiva.

Le foglie delle piante non irrigate hanno cominciato ad assimilare ad 1 GDPF, ovvero 4 giorni in ritardo rispetto alle piante irrigate ed il tasso di

assimilazione è stato crescente fino a 30 GDPF; da questa data in poi, per circa un mese e mezzo, l'assimilazione ha fatto registrare i valori massimi, ovvero  $1,6 \mu\text{mol C}\cdot\text{s}^{-1}$  nelle piante irrigate e  $1,2 \mu\text{mol C}\cdot\text{s}^{-1}$  nelle piante non irrigate. Dai 70 GDPF si osserva una riduzione dei tassi di assimilazione fino a valori di  $0,2 \mu\text{mol C}\cdot\text{s}^{-1}$  nelle piante in asciutto e  $0,7 \mu\text{mol C}\cdot\text{s}^{-1}$  in quelle in irriguo.



**Figura 24 (a, b) – Simulazione della variazione oraria del tasso di respirazione ed assimilazione ( $\mu\text{mol C}\cdot\text{s}^{-1}$ ) del totale delle foglie del germoglio di piante di pistacchio in asciutto (a) ed in irriguo (b) nel corso della stagione vegeto-produttiva 2010.**

In figura 25 è rappresentata la simulazione del tasso di respirazione ed assimilazione, nell'arco delle 48 ore, in diversi momenti del ciclo vegeto-produttivo della pianta, corrispondenti a determinati stadi fenologici della foglia.

Durante la fase di intensa crescita delle foglie (1° e 2° GDPF) la respirazione è stata nettamente superiore all'assimilazione. Il tasso di assimilazione non ha mostrato grandi differenze tra le due tesi ( $<0,2 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$ ) che hanno assimilato, rispettivamente, 5000  $\mu\text{mol}$  di carbonio (tesi 0) e 7500  $\mu\text{mol}$  di carbonio (tesi 500) nell'arco delle 48h (tab.13). Le perdite, dovute alla respirazione, sono state invece 23700  $\mu\text{mol}$  nelle piante in asciutto e 33800  $\mu\text{mol}$  nelle piante in irriguo.

Già a 6-7 GDPF il tasso di assimilazione è risultato superiore a quello di respirazione; considerando però che la respirazione, al contrario dell'assimilazione, è continua nell'arco della giornata, la sommatoria delle  $\mu\text{mol}$  di C respirate nel corso delle 48 ore è risultata uguale alla sommatoria delle  $\mu\text{mol}$  traspirate sia nella tesi in irriguo (circa 33000  $\mu\text{mol C}/24\text{h}$ ) che in quella in asciutto (circa 22000  $\mu\text{mol C}/24\text{h}$ ).

Durante la fase di massima attività fotosintetica (45°- 46° GDPF), le foglie delle piante irrigate hanno assimilato nell'arco delle 48 ore 125267  $\mu\text{mol}$  di carbonio mentre quelle delle piante non irrigate soltanto 81920  $\mu\text{mol}$ . La respirazione è risultata nettamente inferiore in entrambe le tesi. A fine stagione (125° e 126° GDPF), a causa della diminuzione della superficie fogliare fotosinteticamente attiva (fig. 16) ed della riduzione della capacità di assimilazione massima delle foglie (tab. 10), si è verificato un abbattimento del tasso fotosintetico che è risultato molto più marcato nelle piante in asciutto ( $0,1 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$ ) che in quelle in irriguo ( $0,5 \mu\text{mol}\cdot\text{s}^{-1}$ ). Durante queste due giornate le piante in irriguo hanno assimilato un quantitativo di C (38600  $\mu\text{mol}$ ) nettamente maggiore rispetto a quello respirato (9900  $\mu\text{mol}$ ). Nelle piante in asciutto invece l'assimilazione (7900  $\mu\text{mol}$ ) ha superato solo di poco la respirazione (3200  $\mu\text{mol}$ ).



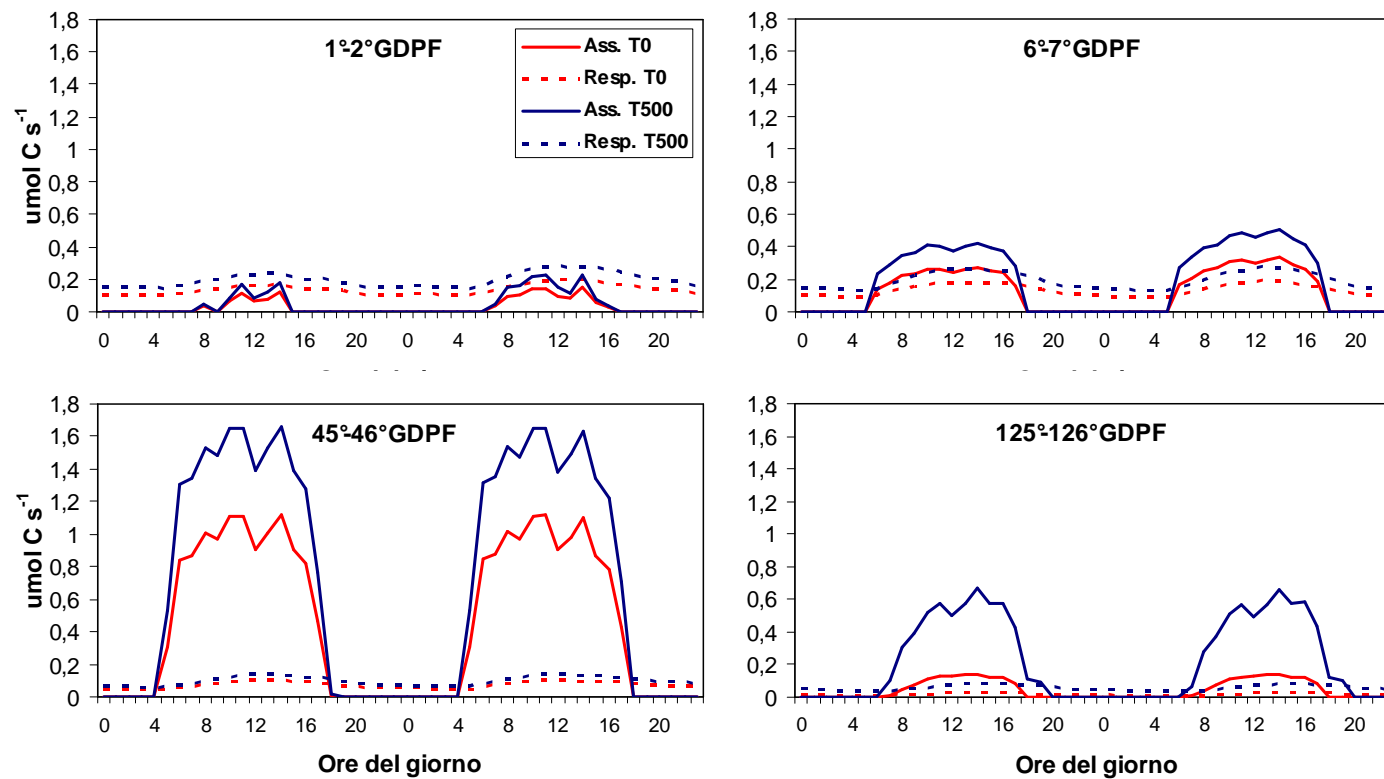


Figura 25 – Simulazione della variazione oraria del tasso di respirazione ed assimilazione ( $\mu\text{mol C s}^{-1}$ ) del totale delle foglie del germoglio di piante di pistacchio in asciutto (T0) ed in irriguo (T500) nel corso del 1° e 2° GDPF , del 6° e 7° GDPF, del 45° e 46° GDPF e del 125° e 126° GDPF.

**Tabella 13 - Sommatoria delle  $\mu\text{mol}$  di C assimilate (A), respirate (R) e differenza tra le  $\mu\text{mol}$  di C assimilate e respirate ( $\Delta$ ) dal totale delle foglie del germoglio di piante di pistacchio in asciutto (T0) ed in irriguo (T500) nel corso del 1° e 2° GDPF, del 6° e 7° GDPF, del 45° e 46° e del 125° e 126° GDPF.**

GDPF	T0			T500		
	A ( $\mu\text{mol}/48\text{h}$ )	R ( $\mu\text{mol}/48\text{h}$ )	$\Delta$ ( $\mu\text{mol}/48\text{h}$ )	A ( $\mu\text{mol}/48\text{h}$ )	R ( $\mu\text{mol}/48\text{h}$ )	$\Delta$ ( $\mu\text{mol}/48\text{h}$ )
<b>1-2</b>	5047	23767	-18720	7539	33827	-26288
<b>6-7</b>	21416	23304	-1888	33334	33561	-227
<b>45-46</b>	81920	12643	69277	125267	17194	108073
<b>125-126</b>	7914	3240	4674	38674	9916	28758

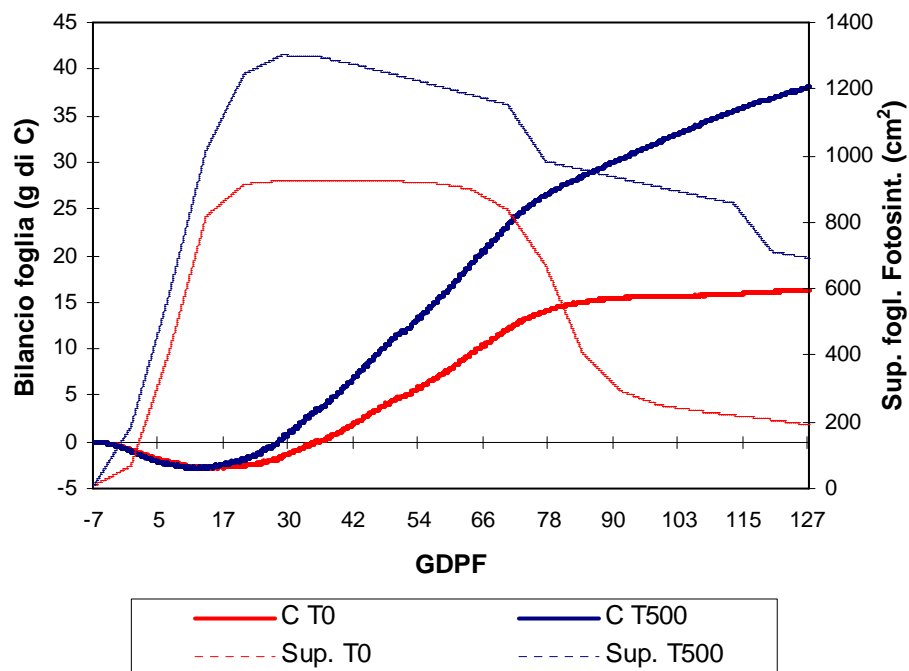
La figura 26 mostra l'evoluzione stagionale del bilancio del carbonio delle foglie (BCf) e dello sviluppo della superficie delle foglie dei rami delle piante in tesi. In particolare l'accumulo di carbonio stagionale delle foglie è stato calcolato dalla differenza tra la quantità di carbonio organicato con la fotosintesi (AN) e la quantità di carbonio utilizzato per la crescita (Cfo) e la respirazione (Rfo) fogliare:

$$\text{BCf} = \text{AN} - (\text{Rfo} + \text{Cfo}).$$

Il bilancio appare decrescente nelle prime fasi del ciclo della pianta sino a raggiungere valori di circa -2,7 g di C a 14 GDPF nella tesi 0 ed ad 11 GDPF nella tesi 500. Durante questa prima fase la foglia è ancora allo stato eterotrofo in quanto la produzione di fotoassimilati non è in grado di supportare la crescita né della foglia né, di conseguenza, degli altri organi; gran parte dei processi di crescita avvengono dunque grazie alla mobilitazione delle sostanze di riserva accumulate l'anno precedente (Dickson, 1989; Ferree e Palmer, 1982). In questa fase del ciclo produttivo la superficie fogliare complessiva del germoglio ha raggiunto il 82 % della sua espansione massima nella tesi in asciutto (ovvero circa 760 cm<sup>2</sup>) ed il 60% in quella irrigata (circa 800 cm<sup>2</sup>). Da questo momento in poi il bilancio del carbonio, in seguito ad una breve stasi in cui la produzione di carbonio da parte della foglia è sufficiente a supportare

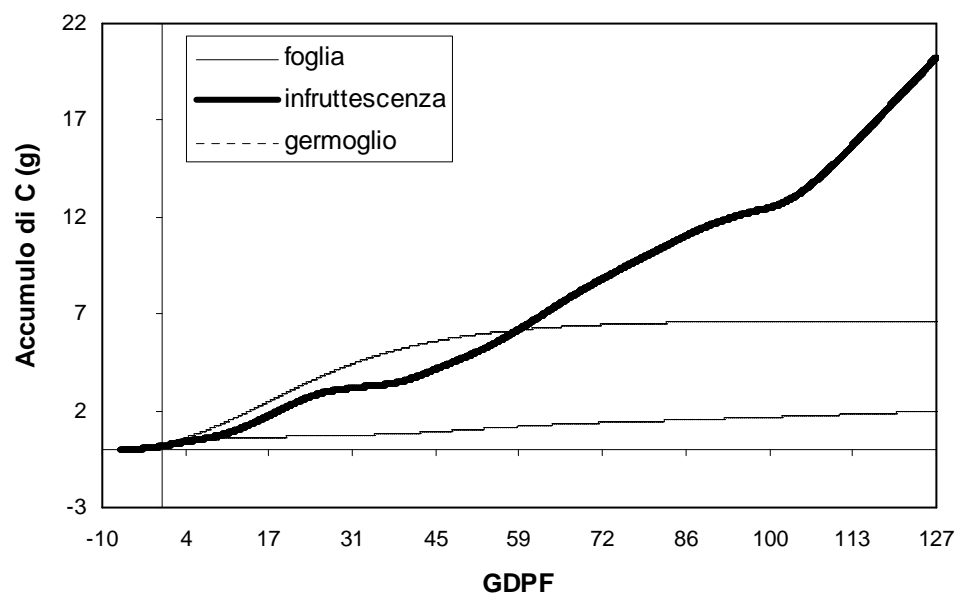
soltanto i suoi fabbisogni, assume un andamento crescente, dimostrando che la foglia è passata dallo stato di eterotrofia a quello di autotrofia ed è in grado di assimilare un quantitativo di C superiore ai suoi fabbisogni. Ciò, peraltro, troverebbe conferma in quanto affermato da Corelli *et al.* (1994) su foglie di melo. Questi autori hanno osservato, appunto, che già dopo due settimane dalla piena fioritura le foglie avevano raggiunto il 75% del loro sviluppo definitivo, condizione ritenuta necessaria per il passaggio di questi organi da sink a source.

A 28 GDPF, quando la lamina fogliare ha raggiunto la completa distensione, il bilancio diventa quindi positivo. E' da questo momento che la foglia produce una quantità di assimilati superiore a quella utilizzata nei primi stadi di crescita. Il tasso di accumulo di carbonio nelle foglie subisce infine un decremento in entrambe le tesi intorno ai 78 GDPF, in coincidenza con la riduzione della superficie fogliare per effetto dell'abscissione e della clorosi fogliare (tab. 8). Il bilancio del carbonio delle foglie a fine stagione è risultato in attivo di 16 g di C nella tesi in asciutto e di 38 g di C nella tesi in irriguo.



**Figura 26 – Simulazione dell'evoluzione stagionale dell'accumulo di carbonio e della superficie fotosinteticamente attiva del totale delle foglie di un ramo di piante di pistacchio in asciutto (T0) ed in irriguo (T500).**

L'accumulo di carbonio nei vari organi del ramo non ha mostrato differenze in funzione del trattamento irriguo (fig.27). Le foglie si sono mostrate sink più forti nelle prime fasi del loro sviluppo. La pianta ha infatti inizialmente la necessità di sviluppare un apparato fogliare in grado di fotosintetizzare. A partire dai 60 GDPF l'accumulo di carbonio nelle foglie appare irrisorio, mentre l'infruttescenza diventa il centro di richiamo più forte (Takeda *et al.*, 1980). Da questo momento tutto il carbonio prodotto viene investito in termini produttivi per supportare la crescita delle infruttescenze. Proprio durante questa fase di energico sviluppo del frutto si colloca il momento di più intensa abscissione delle gemme a fiore che sta alla base del fenomeno dell'alternanza di produzione del pistacchio (Caruso *et al.*, 1987; Crane *et al.*, 1973; Porlingis, 1974). Poco significativa appare l'influenza del germoglio in termini di accumulo di carbonio.



**Figura 27 – Simulazione dell'accumulo di carbonio nei vari organi del ramo (foglie, infruttescenze e germoglio) nel corso della stagione vegeto-produttiva 2010.**

Nelle fig. 28/a e 28/b il bilancio del carbonio del ramo viene messo a confronto con i flussi (g/giorno) di input (fotoassimilati) e output (crescita e respirazione dei vari organi) che ne determinano l'andamento.

La forte richiesta di carbonio per il rapido sviluppo degli organi, insieme ai bassi livelli di assimilazione delle foglie che non hanno ancora raggiunto il pieno sviluppo, determinano un andamento decrescente del bilancio del ramo nelle prime settimane dopo l'antesi. Il bilancio assume un andamento crescente a partire dai 28 GDPF con un deficit di 7,9 g di carbonio nella tesi in asciutto ed a 22 GDPF con un deficit di 7,5 g di carbonio nella tesi in irriguo.

Fino a questo momento il trattamento irriguo non ha determinato differenze significative nel bilancio del ramo (fig. 29) che mostra un andamento simile a quello della foglia (fig. 26).

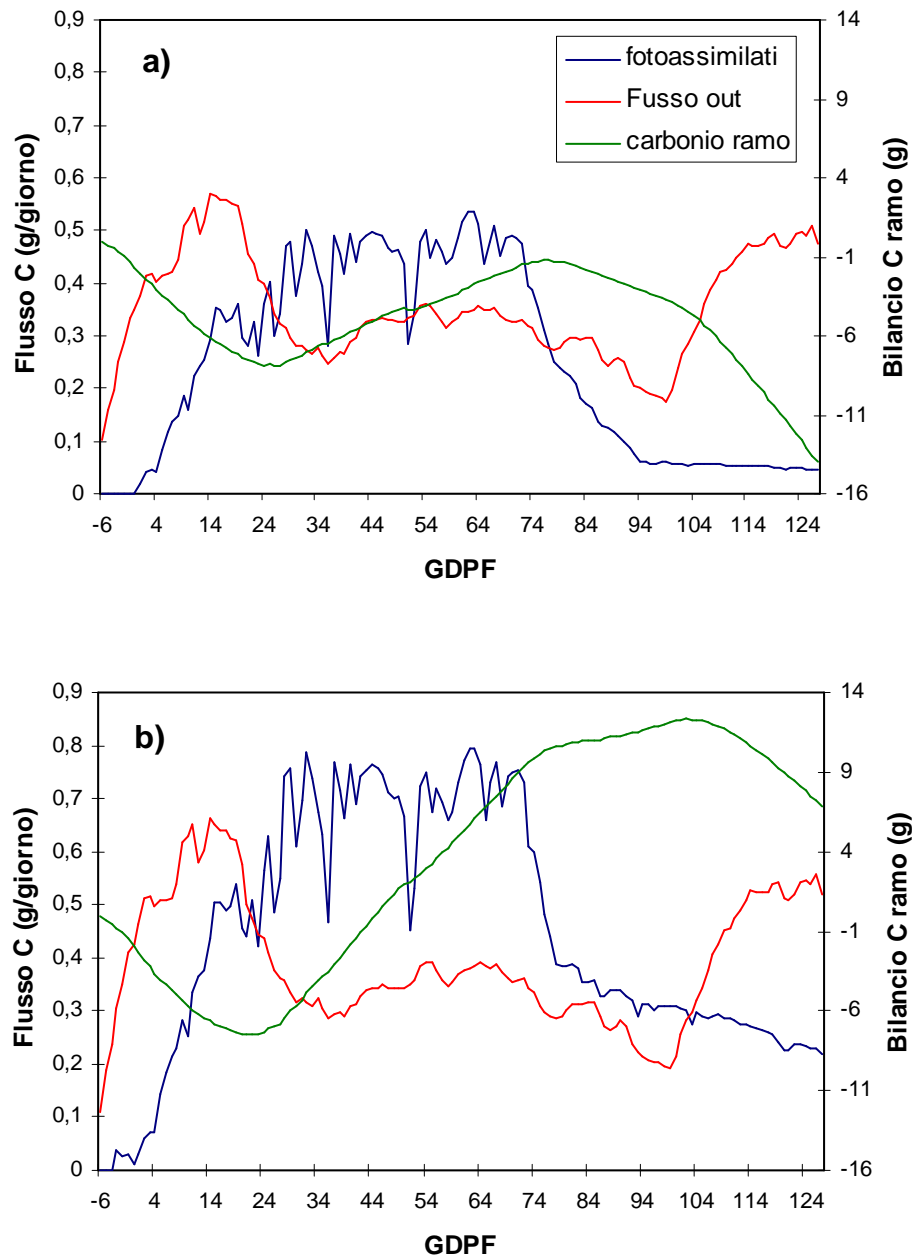
Finita la fase di rapido accrescimento dei vari organi, la richiesta di C del ramo diminuisce e si assesta intorno a valori medi di circa 0,3 g/giorno in entrambe le tesi; allo stesso tempo le foglie, ormai quasi completamente espanse, raggiungono i livelli di assimilazione massimi (fig. 24 e fig. 25). Il ramo produce più di quanto consuma ed il bilancio assume un andamento crescente. Il tasso di incremento del bilancio è molto più marcato nelle piante irrigate rispetto a quelle in asciutto. Infatti, mentre le piante irrigate riescono a fissare tra i 0,7 ed i 0,8 g di C al giorno, per le piante in asciutto questo parametro si aggira intorno ai 0,5 g/giorno. Le piante irrigate dunque accumulano tra i 0,4 ed i 0,5 g di C al giorno e già a 45 GDPF mostrano un bilancio positivo mentre le piante non irrigate, accumulando solamente 0,2 g di C al giorno, alla stessa data mostrano ancora un forte deficit (- 6,5 g di carbonio).

Intorno agli 80 GDPF, in seguito alla caduta e all'ingiallimento delle foglie, si verifica una forte riduzione del tasso di assimilazione che si assesta intorno a valori di 0,3 g per giorno per le piante in irriguo mentre scende al di sotto dei 0,1 g per giorno nelle piante in asciutto.

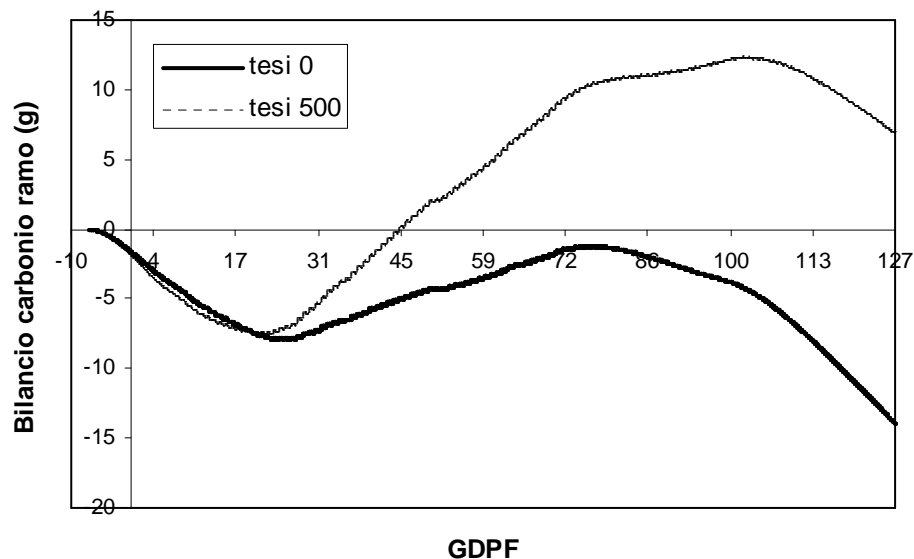
In questa fase, il bilancio del C del ramo delle piante irrigate, già positivo, mantiene un andamento crescente mentre quello delle piante in asciutto, ancora negativo (-1,1 g di carbonio) incomincia a decrescere.

Durante le ultime settimane del ciclo della pianta, in concomitanza con la fase di forte crescita dell'infruttescenza, si osserva un fortissimo incremento nella richiesta di C da parte del ramo.

Si ha dunque un ulteriore decremento del bilancio del carbonio del ramo che nelle piante irrigate passa da 12,3 g a 103 GDPF a 6,8 g a 127 GDPF mentre nelle tesi in asciutto da - 4,4 g a 103 GDPF a - 13,98 g a 127 GDPF.



**Figura 28 (a, b) – Simulazione dell’andamento stagionale del flusso (g/giorno) di fotoassimilati prodotti, del flusso di carbonio utilizzato per la crescita e la respirazione dei vari organi del ramo e del bilancio del carbonio (g) del ramo di piante di pistacchio in asciutto (a) ed in irriguo (b).**



**Figura 29 – Confronto tra il bilancio del carbonio del ramo di una pianta irrigata (T500) e di una in asciutto (T0) nel corso della stagione vegeto-produttiva 2010.**

Scomponendo il bilancio del ramo nelle sue singole parti (tab. 14) si nota come il termine che differisce maggiormente tra i due trattamenti irrigui è il quantitativo di fotoassimilati prodotti (33 g nella tesi in asciutto contro i 59 g della tesi in irriguo). Il carbonio utilizzato per la crescita degli organi è identico nelle due tesi. L'infruttescenza mostra il maggior fabbisogno in termini di carbonio di crescita (43 % del totale del carbonio utilizzato nella tesi in asciutto e 39 % nella tesi in irriguo). La respirazione influisce maggiormente nel bilancio delle piante irrigate. L'organo che presenta tassi di respirazione più elevati è la foglia con valori pari al 21% del totale del carbonio utilizzato nella tesi in asciutto e al 27% nella tesi in irriguo. In totale la tesi 0 ha avuto bisogno di 47 g di carbonio per la crescita e la respirazione degli organi del ramo, la tesi 500 di 52 g.

**Tabella 14 – Riassunto del bilancio del carbonio di una ramo di piante di pistacchio in irriguo (T500 – 3 infruttescenze di 14 frutti ciascuna e 8 foglie) ed in asciutto (T0 – 3 infruttescenze di 13 frutti ciascuna e 7 foglie).**

Tesi	Tesi 0		Tesi 500	
	g di C	% del tot.	g di C	% del tot.
<b>Fotosintesi (An)</b>	33,08		59,12	
<b>Crescita foglie (Cfo)</b>	- 6,63	14,1	- 6,63	12,7
<b>Crescita infruttescenze (Cinf)</b>	-20,26	43,1	- 20,26	38,8
<b>Crescita germoglio (Cg)</b>	- 1,85	3,9	- 1,97	3,8
<b>Respirazione foglie (Rfo)</b>	- 10,14	21,6	- 14,38	27,5
<b>Respirazione infruttescenza (Rinf)</b>	- 5,27	11,2	- 5,27	10,1
<b>Respirazione germoglio (Rg)</b>	- 2,89	6,1	- 3,70	7,1
<b>Tot. C investito</b>	- 47,04		- 52,21	
<b>Bilancio carbonio ramo</b>	-13,98		6,87	

Sono state effettuate delle simulazioni del bilancio del carbonio dell'intero ramo delle piante sottoposte ai due differenti trattamenti irrigui impostando diversi livelli di carica (fig. 30); i budget del carbonio di rami su cui erano inserite rispettivamente 1, 2 e 4 infruttescenze sono stati, infatti, confrontati con quello precedentemente discusso del ramo con 3 infruttescenze.

Dai dati ottenuti è emerso che, come era da attendersi, la presenza dei frutti determina una proporzionale riduzione delle risorse disponibili per i restanti organi del ramo.

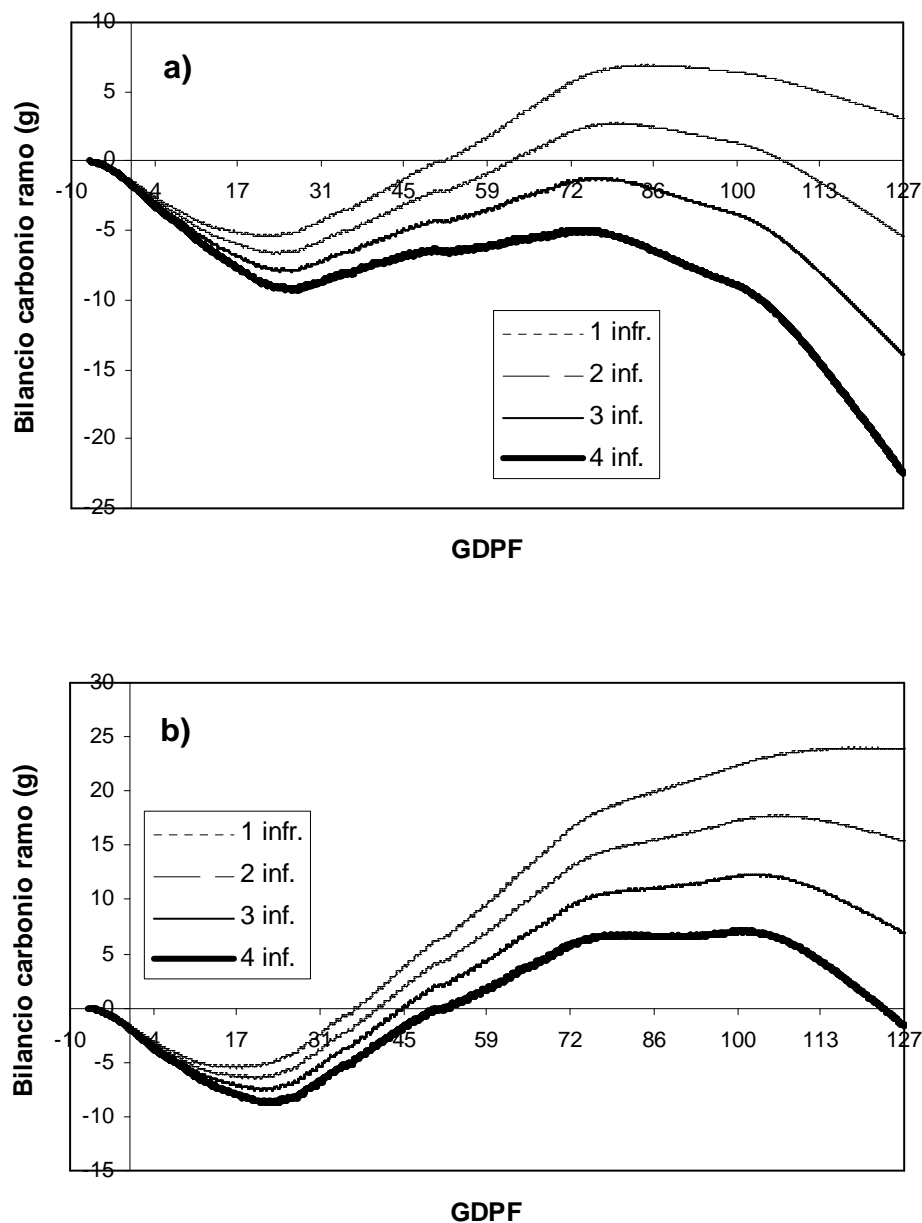
Nelle piante non irrigate la presenza di due sole infruttescenze, non ha impedito al ramo di concludere la stagione vegetativa con un bilancio negativo, ma ha comunque permesso una riduzione del deficit riscontrato a fine anno (- 5,6 g di carbonio rispetto ai -13,98 del ramo con 3 infruttescenze). Il ramo con 4 infruttescenze non è mai stato in grado di riportare il bilancio al di sopra dei - 5 g di carbonio ed ha concluso la stagione con deficit di 22,49 g di carbonio.

Una sola infruttescenza ha permesso invece al ramo di terminare l'annata con un bilancio positivo (3 g). Questo risultato coincide con quanto sostenuto da Crane *et al.* (1973), ovvero che un numero minimo di venti frutti appare



sufficiente perché la quantità di carbonio assimilata dal ramo durante tutta la stagione non riesca ad eguagliare quella ripartita nei diversi organi.

Le piante irrigate hanno invece mostrato un bilancio stagionale a fine anno positivo nei rami con 1, 2 e 3 infruttescenze (24, 15 e 6 g di carbonio, rispettivamente). Soltanto la presenza di 4 infruttescenze non è stata supportata dall'assimilazione di queste piante che hanno mostrato un bilancio di -1,6 g di C a fine stagione.



**Figura 30 (a e b) - Simulazione del bilancio stagionale del carbonio di un ramo di piante in asciutto (a) ed irrigate (b) sottoposte a diversi livelli di carica di frutti: 1, 2, 3 e 4 infruttescenze.**

## 8.9 - Conclusioni

Nel complesso, i risultati ottenuti attraverso la simulazione della crescita vegetativa e riproduttiva del ramo, dimostrano che l'irrigazione è in grado di influenzare il bilancio del carbonio di un ramo carico di piante femminili di pistacchio (*Pistacia vera* L.) cultivar Bianca.

Le piante non irrigate hanno infatti mostrato, a fine stagione, un bilancio del carbonio del ramo negativo (-13,98 g) al contrario di quelle irrigate che hanno terminato la stagione con un bilancio positivo (6,87 g).

In particolare, il parametro che nel bilancio è differito maggiormente tra le due tesi irrigue è stato il quantitativo di fotoassimilati prodotti. Nel corso della stagione, infatti, le piante irrigate sono state in grado di fissare 59 g di carbonio mentre quelle in asciutto soltanto 33 g.

I fattori che hanno determinato questa forte differenza sono state la precoce clorosi fogliare seguita da una marcata filloptosi ed i più bassi tassi fotosintetici delle piante non irrigate. La superficie fogliare complessiva del germoglio delle piante irrigate, quando le lamine avevano raggiunto la massima espansione, ovvero circa 28 GDPF, è risultata maggiore nelle piante in asciutto (circa 1300 cm<sup>2</sup>) rispetto a quelle in irriguo (circa 920 cm<sup>2</sup>). Durante tutto il periodo di massima attività fotosintetica, la maggiore superficie fogliare del germoglio delle piante irrigate ha determinato valori di assimilazione complessiva del ramo di circa 0,7-0,8 g/giorno, che sono risultati superiori a quelli delle piante non irrigate (0,5 g/giorno); inoltre, tra i gli 86 ed i 100 GDPF, la fotosintesi ha subito una forte riduzione, già riscontrata in piante di pistacchio da Vemmos (1994), che è apparsa molto più marcata nelle piante in asciutto (valori di Amax di circa 4,5 μmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>) rispetto a quelle in irriguo (valori di Amax di circa 10 μmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup>).

Come è noto, lo stress idrico induce la pianta ad attuare meccanismi di difesa al fine di ridurre le perdite traspirative, come la chiusura degli stomi ed in certi casi la perdita delle foglie. La riduzione dell'assimilazione è dunque una diretta conseguenza della necessità della pianta di sopravvivere in condizioni di forte richiesta evapotraspirativa e proprio per questo è stata più evidente nelle piante sottoposte a maggiore stress.

La ridotta produzione di carboidrati che ne consegue porterebbe ad ipotizzare un minore investimento in termini produttivi delle piante non irrigate. In effetti, in molte colture, lo sviluppo del frutto è strettamente correlato con l'attività fotosintetica e dunque con lo stato idrico della pianta. La simulazione effettuata nel presente lavoro non ha evidenziato alcuna differenza nel quantitativo di carboidrati investiti per la crescita degli organi produttivi tra le piante in irriguo e quelle in asciutto (circa 20 g di carbonio). Goldhamer *et al.* (1985), in studi effettuati su piante di pistacchio sottoposte a differenti regimi irrigui, hanno riscontrato che, tra i vari parametri produttivi e vegetativi misurati nel corso delle prove, il peso secco del frutto è stato quello che meno ha risentito dello stress idrico.

Nel pistacchio dunque, a differenza di altre specie a frutto secco come per esempio il noce, lo sviluppo del frutto è poco correlato allo stress idrico.

Questo fenomeno starebbe alla base della credenza comune, errata, che il fabbisogno idrico nel pistacchio sia molto più basso che in altre specie decidue.

In realtà il pistacchio è una specie che consuma grandi quantitativi di acqua (Kanber *et al.*, 1993), e l'irrigazione rappresenta per questa coltura uno delle tecniche più importanti per mitigare l'alternanza di produzione (Bilgen, 1979). Le mancate differenze nell'accumulo di carbonio nelle infruttescenze confermano che il frutto rappresenta il sink più forte (Takeda *et al.*, 1980) ed il bilancio altamente deficitario del ramo delle piante non irrigate evidenzia come il suo sviluppo sia avvenuto utilizzando larga parte dei fotoassimilati di nuova sintesi ma anche drenando completamente le riserve disponibili nel ramo (Marra *et al.*, 1998).

In realtà dunque, il completamento del ciclo produttivo, come già evidenziato, viene effettuato a discapito della produzione dell'anno successivo.

La maggiore intensità della cascola delle gemme a fiore, registrata nelle piante non irrigate rispetto a quelle irrigate, conferma che in assenza di stress idrico i fenomeni di competizione per le risorse sono minori.

Infine, nelle piante non irrigate, già a 100 GDPF i fenomeni di clorosi interessavano quasi il 60% della superficie fogliare del germoglio che a 127 GDPF aveva perso il 78 % delle foglie, con forti ripercussioni sul bilancio del ramo durante tutto il mese di agosto.

Nelle piante irrigate il bilancio del ramo, già positivo dai 45 GDPF in poi e la conseguente disponibilità continua di fotoassimilati di nuova sintesi, hanno permesso una riduzione, ma non l'eliminazione, dei fenomeni di cascola delle gemme e di ingiallimento e caduta delle foglie.

Questo comportamento suggerisce l'ipotesi sostenuta anche da Kanber *et al.* (1993) che tutti questi meccanismi, fortemente legati all'alternanza di produzione, siano parzialmente controllati geneticamente. Il pistacchio infatti è una pianta che sopravvive in ambienti aridi e la perdita delle foglie rappresenta un meccanismo di difesa che permette la riduzione dei processi di traspirazione.

Il modello di simulazione ha permesso di spiegare, da un punto di vista di bilancio del carbonio, l'influenza che l'irrigazione ha sull'alternanza produttiva.

Nel complesso, i risultati ottenuti avvalorano la tesi, già sostenuta da diversi autori (Goldhamer *et al.*, 1985, 1995; Bilgen, 1979; Geurts, 1982; Kanber *et al.*, 1993), che l'irrigazione rappresenti una delle principali tecniche utili per ridurre l'alternanza produttiva nel pistacchio.

Nonostante ciò, ancora molti fattori che intervengono nel bilancio del carbonio di un ramo di pistacchio sono poco chiari, facendo ipotizzare la presenza di una forte componente genetica.

Poiché il modello di simulazione sin qui sviluppato contiene diverse semplificazioni, si ritiene utile integrare i dati della presente tesi con ulteriori studi, volti alla verifica della realistica delle simulazioni, come l'analisi dei livelli di carboidrati dei rami. Inoltre, l'estensione del modello a livello all'intera pianta permetterebbe di tenere in conto, all'interno del bilancio, anche della mobilitazione delle riserve dalle parti fisse, per giungere ad uno studio completo ed approfondito dell'alternanza produttiva nel pistacchio.

## **9 - Emissione di germogli epicormici da grosse branche**

### **9.1 - La propagazione del pistacchio**

Il genere *Pistacia* comprende una decina di specie arboree ed arbustive, prevalentemente sub-tropicali, tra le quali *Pistacia vera* L. rappresenta l'unica specie coltivata per scopi alimentari mentre *P. atlantica*, *P. terebinthus* e *P. integerrima* vengono principalmente utilizzate come portinnesti.

Tra le specie da frutta secca, il pistacchio è considerata quella con le maggiori problematiche legate alla propagazione (Joley, 1979), a causa delle grandissime difficoltà di autoradicazione (Al Barazi e Schwaba, 1982) ed alla variabilità dei risultati ottenuti con i diversi tipi di innesto (Joley e Opitz, 1971).

Tradizionalmente la maggior parte degli impianti di pistacchio sono costituiti da piante innestate su portinnesti della stessa specie o di altre specie di pistacchio. Tutti i portinnesti di pistacchio vengono prodotti da semi, ottenuti quasi sempre da libera impollinazione. Per tale motivo essi sono spesso caratterizzati da una scarsa uniformità di comportamento accentuata anche, con molta probabilità, dalla frequenza con cui si ottengono soggetti di natura ibrida (Caruso, Motisi, Barone, 1990). Inoltre, la produzione vivaistica dei semenzali comporta tempi di attesa molto lunghi e forte investimento di capitale.

L'innesto viene tradizionalmente praticato a dimora ma per ridurre i tempi d'attesa le linee di ricerca seguite sono state il perfezionamento delle metodiche di innesto e la messa a punto di tecniche idonee per la produzione in vivaio di piante innestate e/o autoradicate.

La possibilità di moltiplicare i portinnesti, quindi, è molto importante non soltanto allo scopo di ridurre la variabilità genetica delle popolazioni riprodotte sessualmente, ma anche per la selezione e la produzione di genotipi superiori. Inoltre, l'utilizzo di un portinnesto in grado di esaltare il vigore del genitore rappresenta un ulteriore mezzo di cui si dispone oggi per ridurre il periodo improduttivo e migliorare il settore vivaistico di questa specie.

## 9.2 - I portinnesti

Tra i portinnesti del pistacchio, largamente utilizzato nel passato è stato il terebinto (*P. terebinthus*) che, grazie alla sua spiccata rusticità (elevata resistenza alle basse temperature ed efficienza di suzione di elementi nutritivi dal suolo), ha permesso la coltivazione di questa specie in contesti di scarso interesse agronomico ed aree agricole marginali.

L'espansione commerciale della pistacchicoltura, avvenuta negli ultimi anni, ha spinto verso la costituzione di impianti di pistacchio sempre più moderni ed efficienti; in tale contesto internazionale, la bassa vigoria del terebinto che agronomicamente si traduce in tempi d'attesa lunghissimi prima dell'entrata in produzione delle piante, la sua spiccata suscettibilità agli attacchi di verticillum, nonché la minore uniformità degli alberi innestati su questo portinnesto, ne hanno causato l'abbandono in favore di portinnesti alternativi. Più vigoroso e con una maggiore facilità d'innesto rispetto al terebinto, il *P. atlantica* è stato ampiamente e con discreto successo adoperato negli Stati Uniti per parecchi anni.

Nel 1981, in seguito alla scoperta della sua spiccata resistenza al verticillum, il *P. integerrima* ha sostituito lentamente *P. atlantica*, diventando il portinnesto più utilizzato al giorno d'oggi negli Stati Uniti. Caratterizzato da elevatissimo vigore, facilità d'innesto e maggiore uniformità d'impianto, presenta il difetto di essere meno resistente al freddo, con danni che si possono manifestare quando utilizzato in ambienti con inverni particolarmente freddi. Le piante innestate su questo portinnesto presentano tassi di crescita e produzioni anticipate di gran lunga superiori a quelle innestate su atlantica, anche se l'efficienza di assimilazione dei nutrienti quali boro, zinco e rame appare inferiore. Nel 1990 l'interesse dei vivaisti si è spostato repentinamente su due ibridi interspecifici di *P. atlantica* e *P. integerrima*. Il primo di questi, il Pioneer Gold II (PGII) è il risultato dell'impollinazione libera in un contesto isolato di diversi alberi di *P. atlantica* utilizzati come femmine e differenti alberi di *P. integerrima* come impollinatori. Più recentemente, è stato licenziato un nuovo portinnesto ibrido atlantica x integerrima denominato UCB I (University of California, Berkeley), che è il risultato di un'impollinazione controllata tra due genotipi selezionati delle due specie. In entrambi i casi gli

ibridi presentano vigoria più elevata rispetto a *P. atlantica* e vigore simile o poca maggiore rispetto a *P. integerrima*. UCB I presenta le produzioni più elevate seguito da PGI e PGII; per quanto riguarda la resistenza al verticillium l'UCB I è “mediamente tollerante”, mentre PGII tra “susceptibile” a “mediamente susceptibile”. Studi nutrizionali dimostrano che l'assimilazione di micronutrienti dal suolo è più efficiente in PG I rispetto UCB I sia per quel che riguarda lo zinco che il boro e il rame.

### **9.3 - La micropropagazione**

La moltiplicazione in vitro del pistacchio (*Pistacia vera* L.) nasce negli anni ottanta con un primo tentativo di Barghchi (1982) di applicare la coltura di apici meristematici a questa specie.

L'interesse nella coltura in vitro del pistacchio come mezzo alternativo per risolvere i problemi legati alla propagazione asessuale di questa specie si è accresciuto nel corso degli anni, con diversi tentavi più recenti di stabilizzare il comportamento della coltura in vitro e la sua proliferazione.

La rigenerazione in vitro del pistacchio è stata ottenuta principalmente tramite tre differenti tecniche: la coltura di gemme apicali o ascellari, l'embriogenesi somatica e l'organogenesi avventizia.

Risultati positivi sono stati ottenuti tramite l'utilizzo dell'organogenesi (Barghchi, 1982; Bustamante-Garcia, 1984; Al-Ramadhani, 1985; Martinelli *et al.*, 1988; Abousalim, 1990; Gonzales e Frutos, 1990; Yang e Lüdders, 1993; Onay, 1996), e dell'embriogenesi somatica, (Onay *et al.*, 1995, 1996, 1997) non solo su *Pistacia vera* ma anche in altre specie (*P. khinjuk*, *P. atlantica*, *P. mutica* e *P. terebinthus*).

L'embriogenesi somatica è un processo di micropropagazione che avviene attraverso la formazione di strutture bipolari (embrioni o strutture simili).

La rigenerazione completa di piante di *P. vera* a partire da semi immaturi fu dimostrata per primo da Onay *et al.* (1995). Più tardi Onay (1996) and Onay *et al.* (2007a) hanno ottenuto la formazione di piante di pistacchio a partire da calli proliferati da differenti tipologie di espianti di pistacchio.

La stessa tecnica è stata applicata su differenti specie di pistacchio con successo (Onay *et al.*, 2007b).

L'organogenesi è una tecnica che permette la neoformazione di gemme avventizie a partire da differenti tipologie di organi (Barghchi e Alderson, 1989; Onay *et al.*, 2003a; Onay *et al.*, 2004; Onay, 2005; Hormaza e Wünsch, 2007; Tilkat *et al.*, 2009a); essa può essere diretta, se le gemme si formano direttamente sulle foglie o indiretta, quando le gemme si formano a partire da un callo che si crea sulla superficie di taglio.

La coltura di gemme apicali o ascellari rappresenta al giorno d'oggi il metodo più utilizzato e più efficace per la micropropagazione del pistacchio sebbene la maggior parte degli studi siano stati effettuati a partire da espianti ottenuti da piante giovani e spesso anche cresciute in vitro (Barghchi e Alderson, 1985; Barghchi, 1986a; Yang e Lüdders, 1993; Parfitt e Almejdi, 1994; Ozden-Tokatli *et al.*, 2003, 2004, 2005, 2006.). Infatti, le grandi difficoltà legate soprattutto alla contaminazione degli espianti, all'elevato contenuto in resina che provoca imbrunimento del mezzo di coltura e alla scarsa reattività del materiale di partenza, spesso causano la morte degli espianti ottenuti da piante mature. Il primo esperimento di rigenerazione di piante mature di pistacchio tramite formazione di germogli ascellari è riportato da Onay (2000a).

Per incrementare l'efficienza di micropropagazione Tilkat (2006) ha stimolato la proliferazione delle gemme ascellari con 1 mg di 6-benzyladenine (BA) aggiunta al mezzo di crescita.

Diversi tentativi di propagazione in vitro di germogli ascellari o apicali sono stati effettuati anche sulle altre specie come *P. khinjuk*, *P. mutica*, *P. atlantica*, *P. palaestine*, *P. terebinthus* e *P. lentiscus*.

Un'ultima tecnica di particolare importanza, che consiste nell'inserimento in condizioni asettiche di un mini espianto su un portinnesto cresciuto in vitro o in vivo, è il microinnesto. La prima applicazione di questa tecnica al genere *Pistacia* risale al 1986 (Jonard, 1986); nel tempo il suo utilizzo è cresciuto significativamente sia in pistacchio che su altre specie grazie alla sue molteplici funzionalità ovvero: la produzione di piante sterili, il ringiovanimento di materiale maturo, il miglioramento delle tecniche di



clonazione a partire da piante mature e la possibilità di uno studio dettagliato del meccanismo di innesto (Onay *et al.*, 2003b). Recentemente è stato ottenuto il microinnesto del pistacchio in vitro ed in vivo (Onay *et al.*, 2003b, 2004; Onay e Tilkat, 2006). La definizione di un protocollo ufficiale di microinnesto per propagare piante mature di pistacchio fedeli alla pianta madre potrebbe essere un tecnica importante per superare i convenzionali problemi propagativi del pistacchio (Onay *et al.*, 2007c).

#### **9.4 - Cellule competenti**

Le cellule di una pianta possiedono la capacità intrinseca di rispondere a dei segnali esterni che quasi sempre sono rappresentati da ormoni. La risposta della cellula si traduce sempre in un cambiamento nel predeterminato percorso di sviluppo e crescita. Per esempio, una cellula di una foglia può iniziare, in seguito ad uno stimolo ormonale, un processo di trasformazione che la porterà a formare una radice o un germoglio. Nella coltura dei tessuti il rapporto citochinine/auxine assume un ruolo fondamentale nei processi di sviluppo delle piante; quando le citochinine sono in eccesso si formano germogli avventizi, se le auxine sono in eccesso si formano radici avventizie o embrioni somatici mentre quando vi è un moderato o alto quantitativo di entrambe si forma il callo. Questo equilibrio ormonale sta alla base dei processi di risposta e guarigione che si innescano in seguito ad una ferita. Nella propagazione delle piante si sfrutta la capacità di guarigione dei tessuti e la capacità apomittica delle cellule.

Cellule differenti rispondono però in maniera diversa ad uno stimolo ormonale, queste differenze stanno alla base della difficoltà di propagazione di alcuni genotipi che risultano recalcitranti alla rigenerazione, come per esempio le forme adulte di molte piante.

Christianson (1987) e Christianson e Warnick (1983, 1988) sostengono che ci sono delle cellule definite “competenti” in grado di distinguere il segnale ormonale e rispondere ad esso diventando “determinate” ed innescando così un meccanismo a catena di dedifferenziazione che permetterà la formazione del nuovo germoglio o della radichetta o dell’embrione somatico.

Una cellula si definisce dunque competente se ha mantenuto la capacità di dedifferenziazione e rigenerazione, o se l'ha acquisita in risposta ad uno stimolo appropriato.

Non tutte le cellule di un tessuto sono competenti ed ancora non è chiaro cosa renda una cellula competente ed un'altra no.

### **9.5 - La giovanilità**

Una pianta, durante il suo ciclo ontogenetico, passa da una fase giovanile ad una definita adulta. Durante la fase giovanile in genere le piante mostrano delle caratteristiche peculiari di natura morfologica e fisiologica.

Il passaggio dallo stadio giovanile a quello adulto avviene nel momento in cui i meristemi apicali divengono capaci di passare da uno stato vegetativo a quello riproduttivo sotto la pressione di normali condizioni induttive, generalmente rappresentate da uno stimolo di tipo ambientale (Hackett e Murray, 1997). Vi sono sostanziali cambiamenti fenotipici associati con la giovanilità, che variano tra le differenti specie; comunemente le foglie sono singole piuttosto che composte, la cuticola può essere differente, la resistenza a patogeni e malattie può variare e nelle specie legnose spesso è accompagnata dalla formazione di germogli di maggior vigore. Anche la presenza o assenza di spine può essere una caratteristica che varia col cambiamento di fase. Alcune piante caducifoglie mantengono le foglie anche durante l'inverno se si trovano in uno stadio giovanile.

### **9.5 - Giovanilità e propagazione**

Goebel (1900) è stato il primo a parlare di giovanilità in relazione alla propagazione, sottolineando come diverse piante presentano differenti potenziali di radicazione in base all'età. Per più di 30 anni il concetto di giovanilità non è stato menzionato ufficialmente nei testi di propagazione sebbene venisse usato costantemente da molti propagatori che spesso utilizzavano germogli prodotti dalle parti legnose più vecchie delle piante per la propagazione vegetativa di diverse specie recalcitranti. Apparentemente, il primo a chiarire che la giovanilità di una pianta si traduce in una maggiore

facilità all' autoradicazione fu Gardner nel 1929. Egli confrontò la percentuale di radicazione di talee ottenute da 21 specie di alberi con età variabile. In tutte le specie, ad eccezione di *Prunus persica* L. Batsch., la radicazione è stata maggiore nelle piante più giovani. In seguito molti altri autori approfondirono l'argomento (Laurie e Chadwick, 1931; Hottes, 1949; Wright, 1955; Mahlstede e Haber, 1957; Hartmann e Kester, 1959) e la giovanilità divenne definitivamente oggetto di studio per il miglioramento della propagazione di molte specie.

Da un punto di vista propagativo, la più importante caratteristica associata alla giovanilità è la capacità delle piante giovanili di essere propagate più facilmente rispetto alle piante in fase adulta (Preece, 2002). Il successo dell' autoradicazione, infatti, è spesso molto basso nelle talee ottenute da piante in età adulta soprattutto quando si tratta di specie legnose. Le principali difficoltà riscontrate nella radicazione di piante adulte sembrano essere legate a delle alterazioni fisiologiche, nonché al più elevato livello di contaminazione rispetto alla forma giovanile (Preece e Read, 2003). Espianti giovanili si stabilizzano in vitro molto più facilmente, crescono e proliferano più rapidamente e radicano con maggior successo. Questo è vero soprattutto per quelle piante legnose che presentano delle forti difficoltà di propagazione a partire da materiale adulto; gli espanti ottenuti da queste piante imbruniscono più facilmente, rilasciano maggior quantitativi di polifenoli nel mezzo e soffrono di necrosi maggiormente rispetto a quelli ottenuti da piante giovanili (Hanus e Rohr, 1987).

### **9.5 - Cono di giovanilità**

La giovanilità si riscontra in una pianta durante i primi anni della sua vita, eppure, soprattutto nelle specie legnose da frutto, per poter valutare la validità agronomica di una pianta vi è la necessità che essa fruttifichi; questo implica il passaggio dalla fase giovanile a quella adulta e dunque un abbassamento del potenziale di propagazione.

In un albero adulto la parte più bassa e più vecchia, ovvero quella prodotta dalla pianta quando ancora si trovava in fase giovanile, manterrà nel

corso del tempo le sue caratteristiche giovanili mentre nei germogli e nelle branche distali e di nuova formazione apparirà il fenotipo adulto. In un albero questa parte che mantiene i tratti giovanili e che comprende il tronco e la prime branche vicine al tronco viene definita “cono di giovanilità”.

La possibilità di collezionare gli espianti a partire dal cono di giovanilità permetterebbe di risolvere molte problematiche legate alla propagazione di diverse specie. Purtroppo però, gli espianti ottenuti da questa parte della pianta, sono spesso contaminati ed impossibili da sterilizzare e dunque inutilizzabili per la coltura in vitro. Per superare questi inconvenienti si interviene spesso con delle tecniche di ringiovanimento della pianta o prelevando del materiale dormiente per forzarlo ad emettere nuovi germogli in un ambiente controllato.

### **9.6 - Induzione di giovanilità**

Negli alberi da frutto potature drastiche (hedging) o capitozzature annuali ripetute per diversi anni in inverno, possono determinare la produzione di nuova vegetazione caratterizzata da giovanilità. Purtroppo, tagliare un albero al suolo è un passo molto drastico e non sempre è possibile procedere con questa tecnica. Germogli giovanili spesso appaiono a partire da sferoblasti o rigonfiamenti presenti alla base di alberi maturi. Un ringiovanimento parziale può essere ottenuto facendo radicare l'apice di germogli maturi come se fosse una talea (Lee e Rao, 1986), soprattutto se il processo viene ripetuto diverse volte (Dennin e McDaniel, 1985). Germogli innestati su portinnesti giovanili possono riguadagnare uno stato di giovanilità (Debergh e Maene, 1985), ma anche questo processo deve essere ripetuto più volte (Bonga e Von Aderkas, 1992). La pre-eziolatura del materiale vegetale sembra influenzare positivamente l'attecchimento dell'espianto in vitro (Hansen e Lazarte, 1984; Bennett e Davies, 1986), così come l'applicazione di temperature al di sopra della norma sembrano promuovere la formazione di germogli giovanili su piante mature (Fisher, 1954; Hudson e Williams, 1955). Anche l'applicazione di giberelline è risultata in grado di stimolare una reversione verso uno stato semi-giovanile nelle piante (Abo El-Nil, 1982).

### **9.7 - Forzatura**

I germogli in crescita sono la fonte migliore di materiale per l'introduzione in vitro (Yang e Read, 1989). Purtroppo però la stagione per ottenere questa tipologia di materiale è relativamente breve (Yang e Read 1992). Inoltre il materiale ottenuto dal campo spesso ha un livello di contaminazione molto elevato e non sempre sono sufficienti i trattamenti di sterilizzazione con ipoclorito di sodio o altri agenti sterilizzanti per ottenere del materiale sterile da inserire in vitro.

L'utilizzo di espianti ottenuti da piante madre cresciute in serra o in altro ambiente controllato e protetto risulta impossibile per tutte le specie arboree caratterizzate da elevato vigore. Per questo motivo è spesso necessario rimuovere parti di piante, quali branche o segmenti di branche, durante la stagione di riposo e forzare la formazione di nuovi germogli su di esse in ambiente controllato. I germogli così ottenuti dovrebbero risultare meno contaminati, più reattivi alla propagazione e spesso anche meno tendenti a rilasciare polifenoli.

Diversi esperimenti sono stati effettuati nel tentativo di forzare la produzione di nuova vegetazione a partire da tessuti dormienti (Read e Yang 1987; 1988, 1991; Yang e Read 1992, 1993). Onay (2000) operando su sezioni lignificate di branchette di piante adulte di pistacchio, lunghe 3-4 cm, immerse in una soluzione di ormoni e stratificate in serra con un fotoperiodo di 24 ore, ha ottenuto buoni risultati nella produzione di nuova vegetazione da inserire in vitro.

### **9.8 - Forzatura di grosse branche**

Al di sotto della corteccia degli alberi vi sono delle gemme latenti che normalmente non danno vita a germogli a meno che il ramo non venga esportato, come nel caso di una rottura casuale o di una potatura drastica. Queste gemme, che vengono definite epicormiche, si formano nei nodi dei rami o dei tronchi quando essi sono in attiva crescita (origine ascellare) o in un momento successivo (origine avventizia).

Grandi segmenti di branche, collezionati possibilmente dalla parte più giovanile delle piante, possono essere posizionati in ambiente controllato al fine di forzare la formazione e la crescita di nuovi germogli epicormici a partire da gemme latenti, ascellari o avventizie (George e Preece, 2004; Henry e Preece, 1997a,b; Ledbetter e Preece, 2003; Preece e Read, 2003; Preece *et al.*, 2002; Van Sambeek *et al.*, 1997a,b; Van Sambeek e Preece, 1999; Vieitez *et al.*, 1994).

Questa tecnica differisce da quelle prima descritte non soltanto per le maggiori dimensioni del materiale di partenza, che può dunque essere prelevato facilmente a partire dal cono di giovanilità, ma anche perché non viene utilizzata nessuna soluzione a base di ormoni per stimolare lo sviluppo dei germogli. Il maggior quantitativo di sostanze di riserva presente in queste branche contribuisce inoltre alla crescita continua di germogli più vigorosi per diversi mesi. Infine, bisogna tenere presente che molte specie, come per esempio *Juglans nigra*, non possono essere forzate a partire da rami apicali e giovani, per cui risulta indispensabile applicare tecniche alternative.

Le gemme latenti, infatti, sottostanno a meccanismi di dormienza differenti rispetto alle gemme di neoformazione, per cui anche i periodi in cui possono essere forzate sono differenti e di maggiore durata.

Il periodo migliore per prelevare le branche da forzare è molto ampio e va da fine inverno (gennaio) ad estate inoltrata (luglio).

Poiché le gemme sono preformate sulla branca, nella scelta dei segmenti da forzare il diametro risulta poco influente, purché sia superiore ai 2,5 cm (Henry e Preece, 1997b). Al di sotto di questo diametro vengono prodotti pochi germogli, di ridotte dimensioni che spesso muoiono prima che siano abbastanza grandi da essere utilizzati per la propagazione. Per diametri compresi tra i 2,5 ed i 20 cm verranno prodotti germogli di uguale qualità. Henry e Preece (1997b) hanno dimostrato, in esperimenti condotti su piante di acero, che la lunghezza del segmento di branca non deve essere inferiore ai 30 cm e che all'aumentare di questo parametro, grazie alle maggiori riserve delle branche, il numero di germogli prodotti risulta maggiore.

## 9.9 – Scopo del lavoro

A causa delle difficoltà di autoradicazione (Al Barazi e Schwaba, 1982) che lo caratterizzano, il pistacchio viene tradizionalmente propagato tramite innesto su semenzali; gli elevati costi e le lunghe tempistiche necessarie per la produzione di piante di pistacchio con questa metodologia rappresentano uno dei principali limiti ad un'ulteriore espansione di questa coltura.

Già da tempo si è tentato di applicare le tecniche di coltura in vitro a questa specie per propagarla vegetativamente. La maggior parte degli studi sono stati effettuati a partire da espianti ottenuti da piante giovani e spesso anche cresciute in vitro (Barghchi e Alderson, 1985; Barghchi, 1986a; Yang e Lüdders, 1993; Parfitt e Almehdi, 1994; Ozden-Tokatli *et al.*, 2003, 2004, 2005, 2006,) mentre, a causa delle grandi difficoltà legate alla contaminazione del materiale di partenza, all'elevato contenuto in resina che provoca imbrunimento del mezzo di coltura ed alla scarsa reattività degli espianti, ancora non esiste un protocollo definitivo di rigenerazione di piante di pistacchio a partire da materiale adulto.

La maggior parte degli studi condotti sulla propagazione in vitro concentrano le loro attenzioni sulla manipolazione del mezzo di coltura, variando l'agente solidificante, la concentrazione e la tipologia di sali ed ormoni o la fonte di carbonio utilizzata. In realtà, il successo della crescita in vitro è spesso influenzata, in misura maggiore, dalla tipologia di espianto utilizzato.

Esistono delle tecniche, ancora non pienamente conosciute e sviluppate, che, supportando la micropropagazione ed intervenendo sulla natura degli espianti, possono avere un fortissimo impatto commerciale sulla propagazione vivaistica di molte specie. Tra queste, particolare importanza assumono tutte quelle tecniche che tramite la forzatura di materiale dormiente in ambiente controllato, permettono il ringiovanimento della pianta o la produzione di germogli in crescita.

Espianti giovanili si stabilizzano in vitro molto più facilmente, crescono e proliferano più rapidamente e radicano con maggior successo (Preece, 2002).

La forzatura in ambiente controllato permette inoltre di ottenere germogli in attiva crescita in un periodo dell'anno in cui non sarebbe possibile il prelievo

in campo; tali espianti dovrebbero infine risultare meno contaminati, più reattivi alla propagazione e spesso anche meno tendenti a rilasciare polifenoli. Tra le varie tecniche, la forzatura in serra di grosse branche assume particolare importanza soprattutto per quelle specie legnose che, come il pistacchio, presentano delle forti difficoltà di propagazione a partire da materiale adulto. Il posizionamento di grosse branche in serra al fine di forzare l'emissione di nuovi germogli a partire da gemme latenti o avventizie è stata studiata su differenti specie legnose (*Acer palmatum*, *Acer saccharum*, *Acer saccharinum*, *Quercus bicolor*, *Quercus alba*, *Quercus rubra*, *Fraxinus americana*, *Juglans nigra*, *Carya tomentosa*, *Carya illinoensis*, *Castanea dentata*, *Syringa vulgaris*), con risultati differenti in base alla specie (Ikemori 1987; Bailey *et al.*, 1998; Aftab *et al.*, 2005; Van Sambeek *et al.*, 2002; 1998a).

Per quanto riguarda il genere *Pistacia*, non è stato pubblicato alcun lavoro che descriva l'emissione di germogli epicormici su grosse branche sottoposte a forzatura.

Alla luce della crescente richiesta di pistacchio nel mondo e della necessità di migliorare le tecniche di propagazione di questa coltura, si è voluto applicare la suddetta tecnica di forzatura a diverse specie del genere *Pistacia* per la produzione di materiale più reattivo, idoneo alla propagazione in vitro ed in vivo.

### **9.10 - Materiale e metodo**

Il materiale di partenza è stato prelevato durante il mese di marzo dell'anno 2011, presso i campi sperimentali "Wolfskill", appartenenti all'USDA-ARS National Clonal Germoplasm Repository di Davis, California.

In particolare, il 3 marzo (esperimento 1) sono stati selezionati 6 alberi, 3 di genere maschile e 3 di genere femminile, appartenenti alle specie *P. vera*, *P. atlantica* e *P. terebinthus*, dai quali sono state prelevate 2 grosse branche basali. Le branche sono state tagliate in tre porzioni di circa 30 cm ciascuna, etichettate in base alla specie, al sesso ed alla posizione rispetto al tronco principale (prossimale, mediana e distale) e posizionate orizzontalmente, secondo uno schema a random, all'interno di una serra in cassoni contenenti



terriccio costituito da perlite e vermiculite nel rapporto 1/1 (fig. 31). L'acqua è stata aggiunta regolarmente e manualmente al terriccio in modo tale da non bagnare i segmenti di ramo per evitare contaminazioni e mantenere il substrato costantemente umido.

Tutti i germogli di lunghezza superiore ai 2 cm sono stati prelevati e portati in laboratorio per l'inserimento in vitro; gli espianti sono stati risciacquati per 10 minuti in acqua bidistillata sterile con l'aggiunta di 2-3 gocce di Tween 20 e sterilizzati in una soluzione di acqua sterile e candeggina alla concentrazione del 20% per 20 minuti. Sono stati effettuati altri tre risciacqui, sempre in acqua bidistillata, della durata di 10 minuti ciascuno per eliminare i residui del trattamento chimico prima dell'inserimento in vitro; al substrato di coltura (MS – Murashige e Skoog, 1962) sono stati aggiunti di 200 mg di caseina idrolizzata ed 1 mg di BAP (6-benzilamminopurina) (Onay, 2000a).

a)



b)



**Figura 31 (a , b) – Esperimento 1: etichettatura (a) e posizionamento random delle branche in serra all'interno di cassoni contenenti terriccio costituito da perlite e vermiculite nel rapporto 1/1 (b).**

L'11 marzo è stato effettuato un secondo prelievo di branche (esperimento 2) da alberi appartenenti alle suddette specie. Per ciascuna specie sono stati considerati i due generi (maschile e femminile) e per ciascun genere sono state scelte due diverse piante, caratterizzate da differente vigore ovvero una poco vigorosa e con scarsa ramificazione laterale ed un'altra, invece, che in campo mostrava una spiccata tendenza a ramificare e quindi un maggior vigore

vegetativo. I segmenti di branche, lunghi circa 30 cm ciascuno, sono stati posti orizzontalmente in cassoni contenenti un substrato costituito interamente da perlite e posizionati in serra mist (fig. 32). I germogli di lunghezza superiore ai 4 cm sono stati recisi, la base è stata immersa per 30 secondi in una soluzione di IBA (10000 ppm), e sono stati posti a radicare in serra mist all'interno di un cassone contenente perlite e vermiculite nel rapporto 1/1.

a)



b)



**Figura 32 (a, b) – Esperimento 2: posizionamento delle branche in serra mist all'interno di cassoni contenenti terriccio costituito interamente da perlite.**

Con cadenza settimanale sono stati effettuati dei rilievi al fine di determinare la percentuale di gemme schiuse ed in seguito il numero e la lunghezza dei germogli ottenuti dalle suddette gemme (fig. 33).

a)



b)



c)



**Figura 33 (a, b, c) – Schiusura della gemma epicormica (a), inizio della crescita del germoglio (b) e germogli nel momento di massima lunghezza (c).**

Per l'analisi statistica è stato necessario effettuare una normalizzazione della distribuzione dei dati tramite la seguente formula:

$$Y_1 = \sqrt{Y + 0,5}$$

Dove:

$Y_1$  = dato normalizzato;

$Y$  = dato di origine.

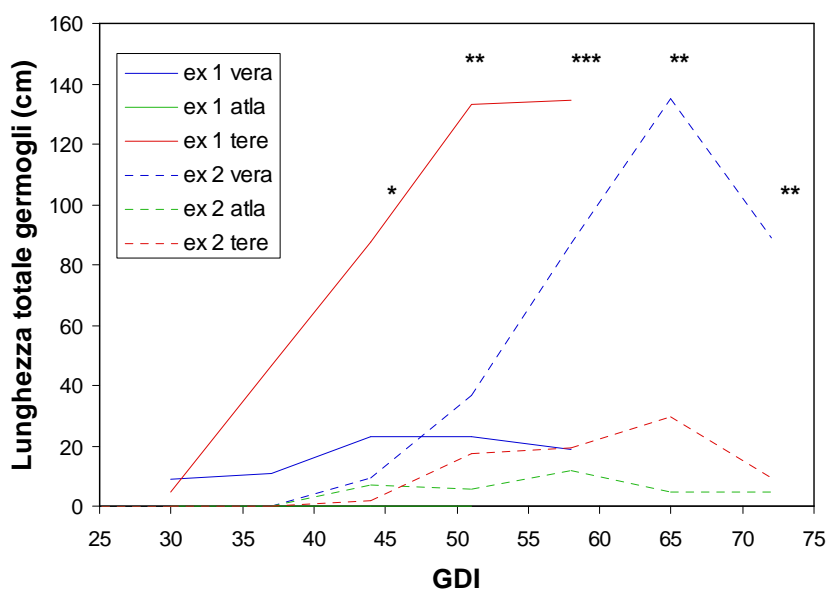
L'analisi della varianza (ANOVA) è stata effettuata, dunque, sui dati normalizzati, usando la procedura GLM (General Linear Model) del pacchetto Systat (SPSS© Inc.).

### **9.11 - Risultati**

Dai risultati ottenuti si evince che le tre specie hanno risposto in maniera differente al trattamento.

La lunghezza totale dei germogli prodotti (fig. 34) è stata maggiore nella specie *P. terebinthus* per quanto riguarda l'esperimento 1 mentre

nell'esperimento 2 il *P. vera* ha raggiunto i valori più alti di questo parametro. Il *P. atlantica* ha mostrato una scarsa tendenza ad emettere nuova vegetazione facendo registrare tassi di crescita prossimi allo zero nell'esperimento 2 e addirittura nulli nell'esperimento 1. Inoltre, mentre nell'esperimento 1 la risposta è stata molto immediata, le branche già 30 giorni dopo l'inserimento (GDI) mostravano germogli in fase di crescita, ma poco duratura nel tempo (a 50 GDI si stabilizza ed i germogli cominciano a disseccarsi), nell'esperimento 2 la crescita è iniziata soltanto 40 GDI ma si è protratta più a lungo nel tempo (lunghezza totale dei germogli prodotti crescente sino 65 GDI, limitata da fenomeni di marcescenza).



**Figura 34 - Lunghezza totale dei germogli prodotti nei due diversi esperimenti per le specie *P. vera*, *P. atlantica* e *P. terebinthus* in relazione al tempo trascorso dall'inserimento (GDI = giorni dopo l'inserimento).**

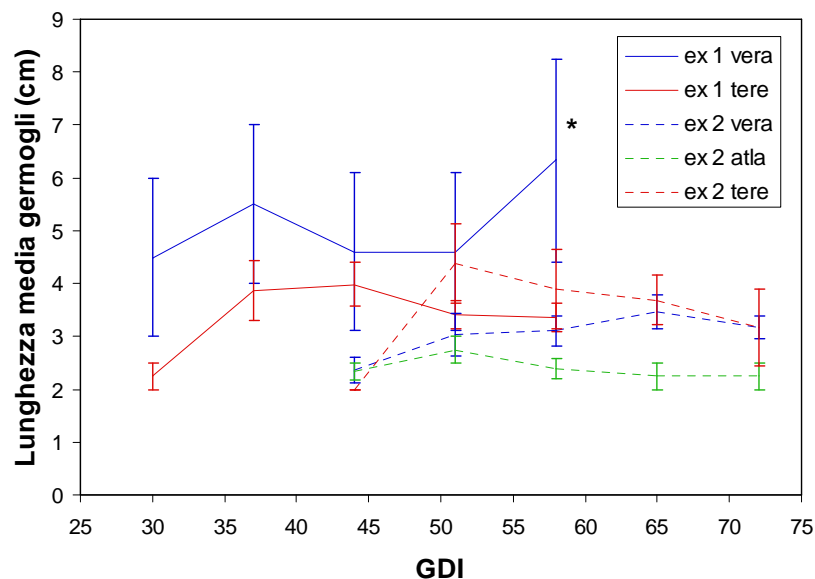
La tabella 15 mostra il numero di gemme schiuse, il numero di germogli emessi dalle suddette gemme e la percentuale di gemme che hanno dato origine a nuova vegetazione rispetto al numero totale. Il numero di gemme e germogli prodotti è stato maggiore nella specie *P. terebinthus* per quanto riguarda l'esperimento 1 e nella specie *P. vera* relativamente all'esperimento 2. Entrambe hanno prodotto infatti più di 100 germogli di una lunghezza media di circa 2 cm (fig. 35). Si nota, inoltre, come nel primo caso vi sia stata una percentuale di germogliamento elevatissima (il 95% delle gemme schiuse

hanno dato origine a germogli) mentre nel secondo caso solo il 34% dell'elevatissimo numero di gemme schiuse (319) si è accresciuto. Inoltre, il *P. vera*, nell'esperimento 1, non soltanto ha prodotto pochi germogli ma ha anche mostrato un basso numero di gemme schiuse mentre *P. terebinthus*, nell'esperimento 2, mostra un elevatissimo potenziale produttivo (111 gemme schiuse) nonostante la bassa produzione di germogli (solo 11 ovvero il 18%).

Il *P. atlantica* non è stato in grado di supportare la crescita di nessuna delle poche gemme schiuse nell'esperimento 1 mentre nel secondo esperimento solo l'11% delle gemme schiuse si sono accresciute. Particolarmente interessante appare comunque l'elevatissimo numero di gemme schiuse registrate nelle branche di questa specie posizionate in serra mist. Complessivamente il numero di gemme schiuse nell'esperimento 2 è risultato nettamente superiore rispetto all'esperimento 1. Il *P. vera* nell'esperimento 1 ha mostrato i germogli mediamente più lunghi (circa 4 cm) rispetto alle altre combinazioni esperimento-specie (circa 2 cm).

**Tabella 15 - Numero di gemme schiuse, numero di germogli emessi e percentuale di gemme che danno origine a nuova vegetazione nei due diversi esperimenti in funzione della specie.**

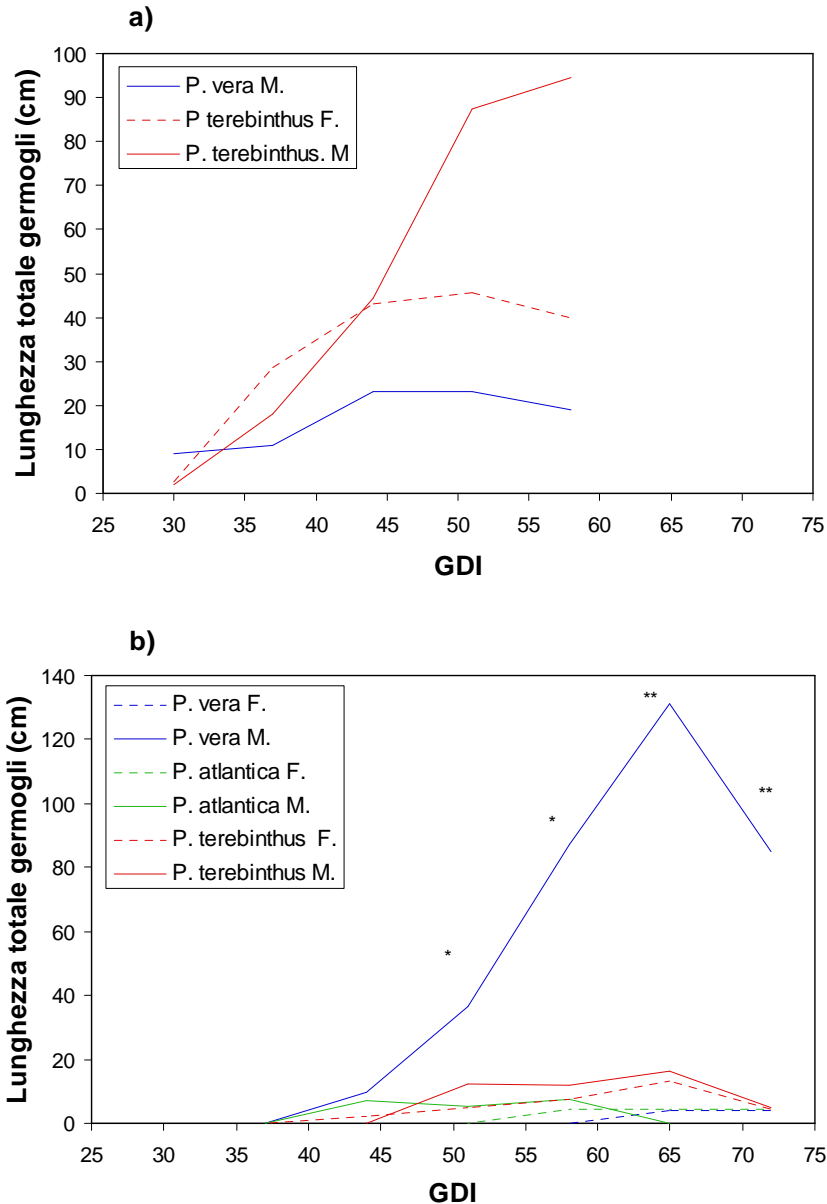
<b>Specie</b>	<b>Esperimento</b>	<b>N°gemme</b>	<b>N°germogli</b>	<b>% germ.</b>
<b>P. vera</b>	1	48	17	35,41
<b>P. atlantica</b>	1	15	0	0
<b>P. terebinthus</b>	1	122	116	95,08
<b>P. vera</b>	2	319	111	34,79
<b>P. atlantica</b>	2	121	14	11,57
<b>P. terebinthus</b>	2	111	21	18,91



**Figura 35 - Lunghezza media dei germogli prodotti nei due diversi esperimenti per le specie *P. vera*, *P. atlantica* e *P. terebinthus* in relazione al tempo trascorso dall’inserimento (GDI = giorni dopo l’inserimento).**

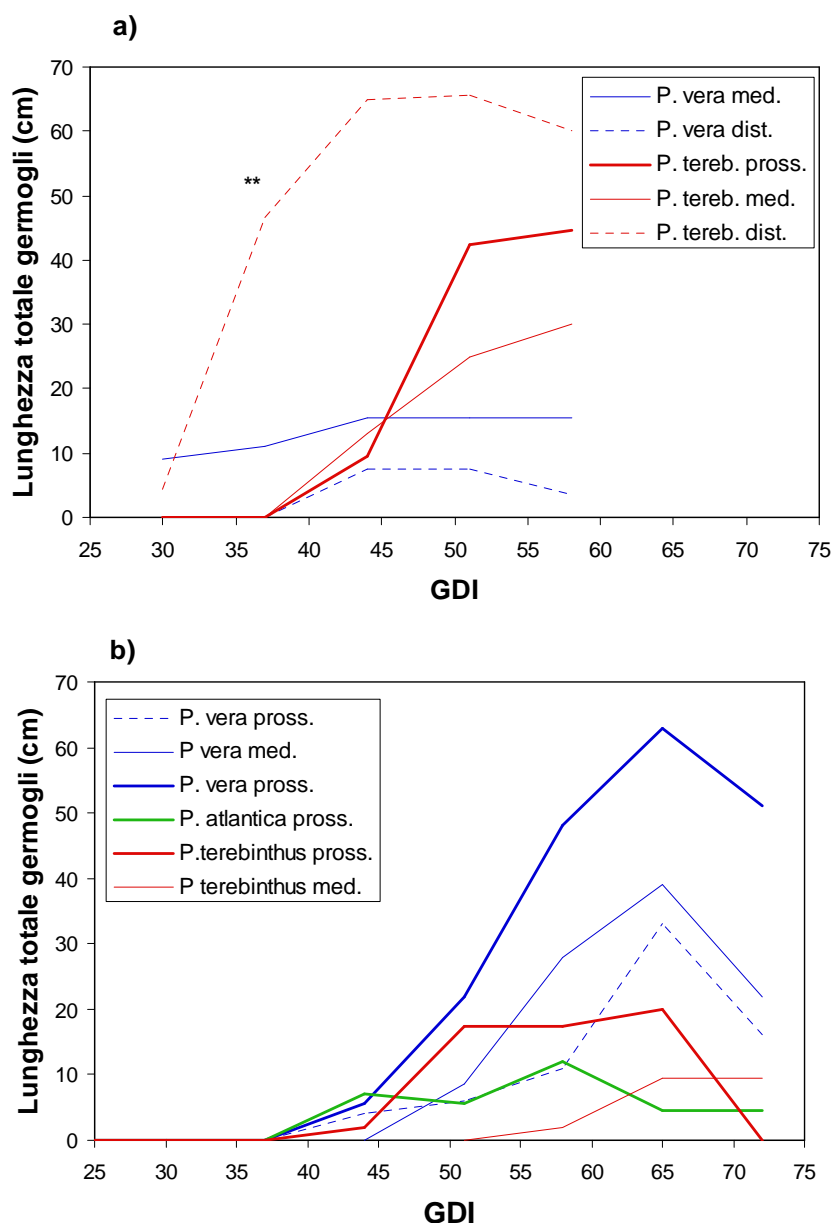
L’influenza del sesso (fig. 36a e 36b) è stata netta in entrambi gli esperimenti. Nell’esperimento 1 il *P. vera* ha prodotto germogli soltanto sulle branche prelevate da piante di genere maschile mentre in *P. terebinthus*, sebbene sia stata osservata una produzione di germogli per entrambi i sessi, quello maschile è stato più produttivo. L’influenza del sesso sulla lunghezza dei germogli in *P. vera* è altamente significativa, anche nell’esperimento 2, con una lunghezza totale dei germogli prodotti negli espianti prelevati dalle piante di genere maschile nettamente maggiore. Per quanto riguarda le altre specie il sesso non sembra aver influito in maniera significativa la produzione di germogli.





**Fig. 36 - Lunghezza totale dei germogli prodotti nell'esperimento 1 (a) e nell'esperimento 2 (b) per le specie *P. vera*, *P. atlantica* e *P. terebinthus* al variare del sesso (M = maschile; F = femminile) in relazione al tempo trascorso dall'inserimento (GDI = giorni dopo l'inserimento).**

Nell'esperimento 2 (fig. 37), le porzioni di branca che si trovavano più vicine al fusto principale dell'albero hanno prodotto il quantitativo maggiore di nuovi germogli in tutte le specie in prova. Nell'esperimento 1 l'influenza della posizione della porzione di branca rispetto al tronco principale è stata differente; Il *P. terebinthus* ha prodotto maggiormente nella porzione distale di branca e il *P. vera* su quella mediana seguita da quella distale.

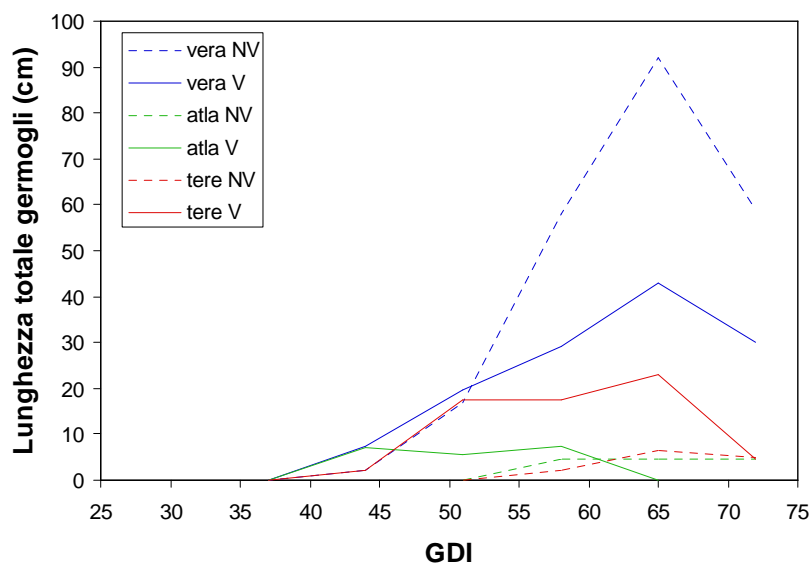


**Figura 37 (a, b) - Lunghezza totale dei germogli prodotti nell'esperimento 1 (a) e nell'esperimento 2 (b) per le specie *P. vera*, *P. atlantica* e *P. terebinthus* al variare della prossimità del segmento di branca rispetto al fusto principale dell'albero (prossimale, mediana e distale) in relazione al tempo trascorso dall'inserimento (GDI = giorni dopo l'inserimento).**

L'influenza del vigore della pianta sull'emissione dei germogli è stata studiata soltanto nell'esperimento 2 (fig. 38). La risposta è stata variabile in funzione della specie infatti mentre in *P. terebinthus* le frazioni di branca prelevate dalle piante più vigorose hanno prodotto un maggior numero di

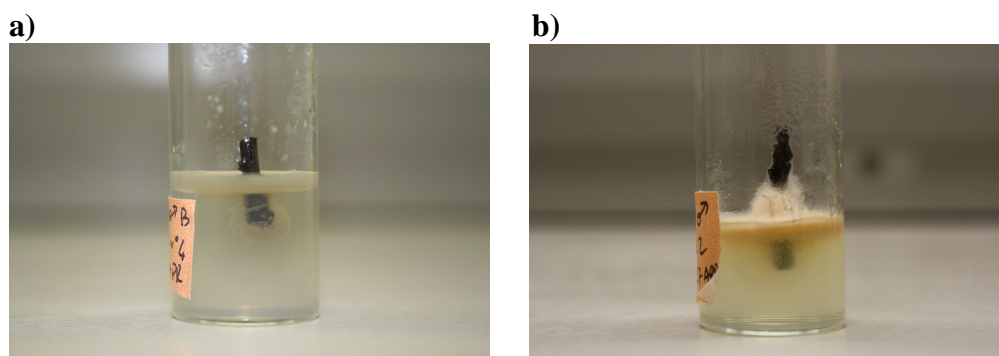


germogli in *P. vera* sono state le piante meno vigorose a rispondere meglio al trattamento.



**Figura 38 - Lunghezza totale dei germogli prodotti nell'esperimento 2 per le specie *P. vera*, *P. atlantica* e *P. terebinthus* al variare della vigoria della pianta da cui sono state prelevate le branche (V= vigorosa; NV= non vigorosa) in relazione al tempo trascorso dall'inserimento (GDI = giorni dopo l'inserimento).**

L'inserimento in vitro degli espianti prodotti nell'esperimento 1 non ha avuto successo in quanto la sterilizzazione non è stata sufficiente per l'eliminazione delle contaminazioni batteriche e fungine causate, molto probabilmente, da imprecisioni nell'irrigazione manuale (fig. 40).



**Figura 40 – Contaminazione batterica (a) e fungina (b) negli espianti ottenuti dall'esperimento 1 dopo l'inserimento in vitro.**

La radicazione dei germogli ottenuti dalla forzatura in serra mist non è stata possibile a causa di fenomeni di necrosi dell'apice e successiva marcescenza che hanno interessato il totale dei germogli in fase di radicazione o mentre erano ancora sulle branche (fig 39).

a)



b)



c)



**Figura 39 (a, b, c) - Posizionamento degli espianti ottenuti dall'esperimento 2 a radicare su un substrato di perlite e vermiculite (fig. a - 5 maggio 2011) e marcescenza e necrosi degli espianti 15 giorni dopo l'inserimento (fig.b). Fenomeni di imbrunimento e marcescenza degli espianti il 20 maggio sulle branche (fig. c).**

## 9.7 – Conclusioni

La forzatura è avvenuta con successo in entrambi gli esperimenti sebbene le specie abbiano risposto in maniera differente.

Le gemme sia latenti che avventizie si sono ingrossate visibilmente già in 2-3 settimane dall'inserimento ed in 5-6 settimane i germogli hanno raggiunto le dimensioni idonee per l'inserimento in vitro o per la radicazione; la risposta è stata più precoce nell'esperimento 1 e più duratura nell'esperimento 2.

Il *P. vera* ha fatto registrare una maggiore risposta in termini di germogli emessi in serra mist mentre, la minore umidità della serra irrigata manualmente ha permesso alla specie *P. terebinthus* di ottenere le migliori performance; infatti, questa specie in serra mist ha prodotto un elevato numero di gemme che però non si sono accresciute a causa probabilmente dell'eccessiva umidità. Il *P. vera*, invece, nell'esperimento 1, oltre a produrre pochi germogli, ha mostrato anche una bassa schiusura delle gemme.

Il *P. atlantica* ha risposto complessivamente in maniera negativa ad entrambi gli esperimenti. Tuttavia, in serra mist, l'elevata percentuale di gemme che si sono schiuse e che non hanno dato origine a germogli, suggeriscono che la mancata sopravvivenza dei germogli sia stata dovuta, più che ad una risposta negativa della specie ai trattamenti, ad una non corretta gestione dei parametri ambientali utilizzati.

Fra i parametri presi in considerazione nella selezione del materiale di partenza il sesso ha influenzato l'emissione di germogli, con produzioni superiori nelle branche prelevate dalle piante maschili. Tale comportamento sembra essere determinato dal maggior vigore di queste piante rispetto a quelle femminili, teoria che viene solo parzialmente confermata dall'influenza che il vigore dell'albero selezionato ha avuto sulla forzatura nella specie *P. terebinthus*.

L'influenza della posizione della branca rispetto al fusto principale sull'emissione di germogli è stata variabile facendo registrare il maggior numero di germogli nelle frazioni di branche prossimali per l'esperimento 2 ed in quelle mediane e/o distali per l'esperimento 1.

Purtroppo la risposta alla propagazione del materiale ottenuto nella presente ricerca è stata molto bassa a causa dei fenomeni di necrosi ed

imbrunimento dell'apice vegetativo. Questo problema è stato riscontrato nella forzatura in serra mist di diverse specie (acero, vite, liquidambar) che appaiono particolarmente suscettibili (Preece et al., 2002). Spesso, il fenomeno si manifesta in maniera più evidente quando si tenta la radicazione. In letteratura (Preece et al., 2002) il problema è stato parzialmente mitigato tramite l'applicazione settimanale di un fungicida (Banrot 40% Wettable Powder), anche se ancora non sono del tutto chiari le cause che provocano tale fisiopatia.

Anche il tentativo di inserimento in vitro degli espianti prodotti nell'esperimento 1 non ha avuto successo. La sterilizzazione, infatti, non è stata sufficiente ad evitare problemi di contaminazioni batteriche e fungine causate molto probabilmente da imprecisioni nell'irrigazione manuale.

Nel complesso la forzatura in serra dei germogli epicormici di branche legnose ha presentato molteplici vantaggi rispetto ai tradizionali metodi di propagazione.

Questa metodologia appare molto importante soprattutto per tutte quelle specie che, a causa della bassa percentuale di radicazione degli espianti dormienti, si propagano tramite radicazione di germogli in piena crescita.

Grazie a questa tecnica è possibile ottenere germogli idonei alla propagazione in un periodo molto ampio durante il quale le piante in pieno campo sono ancora dormienti e quindi non in grado di fornire materiale idoneo alla moltiplicazione.

In questo modo è possibile separare temporalmente la fase di propagazione da quella produttiva dando maggiore flessibilità nella gestione del prelievo del materiale per la riproduzione che non coinciderà con la fase primaverile ed estiva di gestione delle piante e di maggior lavoro in campo.

La produzione di materiale in crescita in tardo inverno, quando le piante sono ancora in dormienza, permette, inoltre, di anticipare i tempi di produzione delle piante autoradicate che raggiungeranno dimensioni maggiori prima dell'entrata in riposo autunnale, accorciando così il ciclo di produzione vivaistica.

Anche la ricerca viene avvantaggiata dalla possibilità di non dovere limitare le analisi alla breve fase di crescita delle piante ma di poterle replicare durante larga parte dell'anno.

Infine questa tecnica di forzatura può essere applicata su branche ottenute dalla regolare potatura invernale; gli alberi in questo modo non verranno deformati da potature drastiche per ottenere materiale idoneo alla propagazione.

Nel complesso risulta dunque che i parametri che possono influenzare l'emissione dei germogli in pistacchio sono differenti ed i meccanismi con cui intervengono non sono chiari e spesso variano con l'ambiente di forzatura e con la specie. Considerati i grandi vantaggi che questa tecnica offre e le poche conoscenze relative alla risposta del pistacchio alla forzatura sperimentata nel presente lavoro, appare utile ampliare tale studio ad altre specie del genere *Pistacia*. Si intende valutare l'influenza di altri parametri sull'emissione dei germogli, tra i quali il periodo di prelievo delle branche, l'esposizione dei segmenti, prima dell'inserimento in serra, a temperature al di sotto degli 0°C e la variazione dell'intensità luminosa durante la stasi in serra. Infine altrettanto importante appare l'approfondimento della risposta del materiale ottenuto con la forzatura alla propagazione in vitro ed in vivo.

## Bibliografia

- Abo El-Nil M., (1982). Method for asexual reproduction of coniferous trees. U.S. Patent No. 4353184.
- Abousalim A., (1990). Micropropagation and micrografting of pistachio (*P. vera* L. and *Pistacia atlantica* Desf.). PhD Thesis, Department of Horticulture. Wye College, University of London, UK.
- Addicott F.T. e Lyons J.L., (1969). Physiology of abscisic acid and related substances. *Ann. Rev. Plant Physiol.* 20(3): 139-164.
- Adu-Bredu, S., T. Yokota and A. Hagihara. (1997). Temperature effect on maintenance and growth respiration coefficients of young, field-grown hinoki cypress (*Chamaecyparis obtusa*). *Ecol. Res.* 12:357–362.
- Aftab, F., Mansouri, K. & Preece, J.E. (2005) The influence of environment, media, and Zeritol on forcing and in vitro establishment of softwood shoots from large stem segments of *Acer saccharinum* L. and *Fraxinus pennsylvanica* Marsh. *Propag. of Ornam. Plants* 5, 113-118.
- Agrawal A., Ram S. e Garg G.K., (1980). Endogenous cytokinins of mango (*Mangifera indica* L.) shoot tips and significance in flowering. *Indian J. Exp. Biol.* 18(5): 504-509.
- Agren, G.I., R.E. Mcmurtrie, W.J. Parton, J. Pastor and H.H. Shugart, (1991). State-of-the-art of models of production decomposition linkages in conifer and grassland ecosystems. *Ecol. Appl.* 1:118–138.
- Ak B.E., Agackesen N. (2006). Some pomological fruit traits and yield of *Pistacia vera* grown under irrigated and unirrigated conditions. *Acta Hort.* 726: 165-168.
- Al Barazi Z., Schwabe W. W., 1982. Rooting softwood cutting of adult *Pistacia vera* L. *Scientia Horticulturae* 57(2): 247-252.
- Al Ramadhani R.M.A., 1985. The effect of some growth regulator on the initiation and growth of *Pistacia vera* L. Mosul (Iraq) Coll. of Science. Mosul Univ. Iraq.
- Amthor, J.S. 1984. The role of maintenance respiration in plant growth. *Plant Cell Environ.* 7:561–569.
- Amthor, J.S. 1989. *Respiration and crop productivity*. Springer, New York.

- Arnold, J.G., Williams, J.R., Nicks A.D. and Sammons N.B. 1989. SWRRB, A Basin Scale Simulation Model for Soil and Water Resources Management. Texas A&M University Press, Collega Station, USA, 142 pp.
- Balandier P., Lacoïnte A., Le Roux X., Sinoquet H., Cruziat P., Le Dizès S., SIMWAL: a structure-function model simulating single walnut tree growth according to climate and pruning, *Ann. For. Sci.* 57 (2000) 571–585.
- Banks, J. and Carson, J.S. 1984. Discrete-eventy system simulation. Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey. 514 pp.
- Barghchi M., 1982. In vitro propagation of Pistacia species. PhD Thesis, Nottingham University, UK
- Barghchi M., (1986a). In vitro propagation of Pistacia rootstocks. *Proc Int Plant Pro Soc*; 35:336–7.
- Barghchi M, Alderson PG., 1985. In vitro propagation of P. vera L. and commercial varieties of Ohadi and Kalleghochi. *J Hort Sci*;60:423–40.
- Barghchi M, Alderson PG., 1989. Pistachio (Pistacia vera L.). In: Bajaj YPS, editor. *Biotechnology in Agriculture and Forestry, Vol.5, Trees II*. Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag; p. 68–98
- Barone E., Caruso T., Di Marco L., 1985. Il pistacchio in Sicilia: superfici coltivate ed aspetti agronomici. *Inf. Agr.* 40 35-42.
- Barone E., Caruso T., Marra F.P. e Motisi A. 1994. Vegetative growth and inflorescence bud abscission in bearing and non-bearing pistachio trees. *Acta Hort.* 419: 29-35.
- Barone E., Caruso T., Padulosi S., 1996. Le risorse genetiche del genere Pistacia nei paesi del mediterraneo. *Rivista di Frutticoltura*–n° 2: 23-29.
- Barone E., Marra F.P., 2004. The Pistachio industry in Italy: current situation and prospects. *Nucis*, 12 16-19.
- Bassow, S.L., E.D. Ford and A.R. Kiestler. 1990. A critique of carbon-based tree growth models. In *Forest Growth: Process Modeling of Forest Growth Responses to Environmental Stress*. Eds. R.K. Dixon, R.S. Meldahl, G.A. Ruark and W.G. Warren. Timber Press, Portland, Oregon, pp 50–56.

- Bailey, A.B., Preece, J.E., & Van Sambeek, J.W. (1998) Axillary shoot proliferation of adult eastern blackwalnut, *HortScience* 33, 478.
- Beattie B.B. e Folley R.R.W. 1978. Production variability in apple crops. II. The long term behavior of the English crop. *Scientia Hort.* 8(4): 325-332.
- Behboudian, M.H., R.R. Walker and E. Törökfalvy. 1986. Effects of water stress and salinity on photosynthesis of pistachio. *Sci. Hort.* 29:251–261.
- Bennett L.K. & Davies F.T. 1986 *In vitro* propagation of *Quercus shumardii* seedlings. *HortScience* 21, 1045-1047.
- Bepete, M. and A.N. Lakso. 1997. Apple fruit respiration in the field: relationships to fruit growth rate, temperature, and light exposure. *Acta Hort.* (ISHS) 451:319–326.
- Berninger F., Ninkinmaa E., Implications of varying pipe model relationships on Scots pine growth in different climates, *Funct. Ecol.* 11 (1997) 146–156.
- Berry, J. and Farquhar, G.D. 1978. The CO<sub>2</sub> Concentrating Function of C<sub>4</sub> Photosynthesis. A Biochemical Model. *In* Proceedings of the 4th International Congress on Photosynthesis D. Hall, J. Coombs and T. Goodwin (eds.), Reading, England, 1977. The Biochemical Soc., London, 119-121.
- Bilgen AM (1979) Pistachio growing and its associated problems in Mediterranean Region. (Turkish) Scientific Congress of the Scientific and Technical Research Council of Turkey, Adana, Turkey, pp 548-576.
- Blackman, F.F. (1905) Optima and limiting factors. *Annals of Botany*, 19, 281–295.
- Bonga J.M. & Von Aderkas P. 1992 *In vitro* culture of trees. Kluwer, Dordrecht. 236 pp.
- Bosc A., EMILION, a tree functional-structural model: presentation and first application to the analysis of branch carbon balance, *Ann. For. Sci.* 57 (2000) 555–569.
- Bossel H., TREEDYN3 forest simulation model, *Ecol. Modelling* 90 (1996) 187–227.
- Boyer J.S. (1968). Relationship of water potential to growth of leaves. *Plant Physiology* 43, 1056-62.



- Boyer, J.S. 1985. Water Transport. *Ann. Rev. of Plant Phys.* 36: 473-516.
- Bruchou C. e Genard M. 1999. A space-time model of carbon translocation along a shoot bearing fruits. *Annals of Botany.* 84: 565-576.
- Bustamante-Garcia M.A., 1984. Micropropagation and rejuvenation of Pistacia species and the mechanism by which light influences root initiation. PhD Thesis, University of California, Davis, US.
- Campbell, G.S. 1977. *An Introduction to Environmental Biophysics.* Springer-Verlag, New York, USA. 159 pp.
- Cannell, M.G.R. 1989. Physiological basis of wood production: a review. *Scand. J. For. Res.* 4:459--490.
- Cannell M.G.R., Dewar R.C., Carbon allocation in trees: a review of concepts for modelling, in: Begon M., Fitter A.H. (Eds.), *Advances in Ecological Research*, Academic Press, London, 1994, pp. 59–104.
- Cannell, M.G.R. and J.H.M. Thornley. 2000. Modelling the components of plant respiration: some guiding principles. *Ann. Bot.* 85:45–54.
- Caruso T., Motisi A., Raimondo A., 1987. Osservazioni preliminari sul ciclo biologico annuale del pistacchio. *Convegno Nazionale sul Pistacchio.* Agrigento.
- Caruso T., Motisi A., Barone E., 1990 Comportamento in vivaio di portinnesti di pistacchio propagati per via vegetativa. *L'informatore Agrario* 41: 57-60.
- Caruso T., Di Marco L. and Raimondo A., 1992. Effects of debudding and defruiting on alternate bearing in pistachio (*Pistachia vera* L.). In: *Fruit Var. J.*, 46, p. 170-174.
- Caruso T., Di Marco L., Marra F.P. e Motisi A. 1993. Effects of crop load and adjustment time on alternate bearing of pistachio (*Pistacia vera* L.) cv. "Bianca". *Proceedings IX GREMPA Meeting Pistachio, Bronte (CT) - Sciacca.*
- Caruso T., Fabbri A. e Giovannini D. 1995. Inflorescence Bud Growth, Development and Abscission in Shoots of Bearing and Disbudded Bianca Pistachio Trees. *Journal of Horticultural Science.* 70(6): 857-866.

- Caruso T., Sottile F. (1999). Il pistacchio. *Pistacia vera* L.: diffusione e interesse economico della coltura, tecnica colturale, cultivar e portainnesti. Inf. Agrario 48, 59-65.
- Caruso T., Barone E., Marra F.P., 2008. Il pistacchio in Italia: interventi agronomici e tecnici per il miglioramento della coltura. Italus Hortus 15 (3), 23-31.
- Chacko E.K. 1986. Physiology of vegetative and reproductive growth in mango (*Mangifera indica* L.) tree. Proceedings of 1st Australian Mango Research Workshop, Melbourne. p. 54-70.
- Chacko E.K., Singh N. e Kachru R.B. 1972. Study on the physiology of flowering and fruit growth in *Mangiferae indica* L. IV. Hormonal control of fruit development and its possible significance to biennial bearing. Acta Hort. 24: 155-163
- Chan B.G. e Chan J.C. 1967. The effect of seed formation on subsequent flowering in apple. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 91: 63-68.
- Chandler W.H. 1950. Evergreen orchards. Henry Kimpton, London.
- Charles-Edwards, D.A., Doley, D. and Rimmington, G.M. 1986. Modelling Plant Growth and Development. Academic Press, New York, USA.
- Chen S.G., Ceulemans R., Impens I., A fractal-based *Populus* canopy structure model for the calculation of light interception, For. Ecol. Manage. 69 (1994) 97–110.
- Christianson M.L. 1987 Causal effects in morphogenesis. pp. 45-55 in Green C.E., Somers, D.A., Hackett, W.P.& Biesboer D.D. (eds.) Plant Cell and Tissue Culture. Alan R. Liss, Inc. New York.
- Christianson M.L. & Warnick D.A. 1983 Competence and determination in the process of in vitro shoot organogenesis. Dev. Biol. 95, 288-293.
- Christianson M.L. & Warnick D.A. 1988 Organogenesis in vitro as a developmental process. HortScience 23, 515-519.
- Colella, A.M., O' Sullivan, M.J. and Carlino, D.J. 1974. Systems simulation, methods and applications. Lexington Books, Lexington, Massachusetts, USA. 292 pp.
- Coops, N.C., R.H. Waring and J.J. Landsberg. 1998. Assessing forest productivity in Australia and New Zealand using a physiologically-based

- model driven with averaged monthly weather data and satellite-derived estimates of canopy photosynthetic capacity. *For. Ecol. Manag.* 104:113–127.
- Corelli L.C., Lakso A.N. e Flore J.A. 1994. Early season patterns of carbohydrate partitioning in exposed and shaded apple branches. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 119(3): 596-603.
- Cosgrove, D. 1986. Biophysical Control of Plant Cell Growth. *Annual Review of Plant Physiology* 37: 377-405.
- Couranjon J. 1989. A second cultivar factor of biennial bearing In *Prunus domestica* L.: The sensitivity of flower bud formation to fruit load. *Scientia Hort.* 40(3): 189-201.
- Crane J.C. 1984. Pistachio Production Problems. *Fruit Varieties Journal.* 38(3): 74-85.
- Crane J.C. e Al-Shalan I.M. 1974. Physical and Chemical Changes Associated with Growth of the Pistachio Nut. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 99(1): 87-89.
- Crane J.C. e Al-Shalan I.M. 1977. Carbohydrate and nitrogen levels in pistachio branches as related to shoot extension and yield. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 102(4): 396-399
- Crane J.C., Al-Shalan I.M. e Carlson R.M. 1973. Abscission of pistachio inflorescence buds as affected by leaf area and number of nuts. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 98(6): 591-592.
- Crane J.C., Catlin P.B. e Al-Shalan I.M. 1976. Carbohydrate levels in the pistachio as related to alternate bearing. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 101(4): 371-374.
- Crane J.C. e Iwakiri B.T. 1981. Morphology and reproduction of pistachio cultivars, California. *Hortic. Rev.* 3: 376-393.
- Crane J.C. e Iwakiri B.T. 1987. Reconsideration of the Cause of Inflorescence Bud Abscission in Pistachio. *Hortscience.* 22(6): 1315-1316.
- Crane J.C. e Nelson M.M. 1971. The unusual mechanism of alternate bearing in pistachio. *HortScience.* 6(5): 489-490.
- Crane J.C. e Nelson M.M. 1972. Effect of crop load, girdling and auxin application on alternate bearing of the pistachio. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 97(3): 337-339.

- Crane J.C. e Takeda F. 1979. The unique response of the pistachio tree to inadequate winter chilling. HortScience. 14.
- Crescimanno F.G., Di Marco L., Caruso T., Bazan E. e Palazzolo E. 1987. Ricerche sulla nutrizione minerale del pistacchio: variazione stagionale del contenuto in azoto, fosforo, potassio, calcio, magnesio e sodio in foglie e frutti. Agricoltura Ricerca - ISMEA Roma.
- Daie J., 1985. Carbohydrate partitioning and metabolism in crops. Hort. Rev. 7:69-108.
- Dale, J.E., Bauermeister, A. and Williams, E.J. 1981. The Use of Compartmental Analysis to Examine Effects of Plant Growth Regulating Substances on Transport of Assimilate in Wheat Leaves. *In: Mathematics and Plant Physiology*, D.A. Rose and D.A. Charles-Edwards (eds.), Academic Press, New York, 79-90.
- DeJong T.M. e Goudrian. 1989. Modeling peach fruit growth and carbohydrate requirements: reevaluation of the double sigmoid growth pattern. J. Amer. Soc. Hort. Sci. 114: 800-804.
- De Palma L., Novello V. (1998). Effect of drip irrigation on leaf gas exchanges and stem water potential in pistachio cv. Larnaka. Acta Hort. 470: 317-323
- de Wit, C.T. 1965. Photosynthesis of leaf mantis vegetalis. Res. Rep. 663, PUDOC, Wageningen. 57 pp.
- Debergh P. & Maene L. 1985 Some aspects of stock-plant preparation for tissue culture propagation. Acta Hort. 166, 21-23.
- Deleuze C., Houllier F., Prediction of stem profile of *Picea abies* using a process-based tree growth model, Tree Physiol. 15 (1995) 113–120
- Deleuze C., Houllier F., A transport model for tree ring width, Silva Fennica 31 (1997) 239–250.
- Dennin K.A. & McDaniel C.N. 1985 Floral determination in axillary buds of *Nicotiana glauca*. Dev. Biol. 112, 377-382
- Di Marco L., Caruso T. 1988. Il pistacchio. Frutticoltura. 10.
- Dickson R.E. 1989. Carbon and nitrogen allocation in trees. Ann. Sci. For. 46: 631- 647.

- Dixon K.R., Luxmoore R.J., Begovich, C.L., CERES –A model for forest stand biomass dynamics for predicting tracecontaminants, nutrient and water effects. I-Model description Ecol. Modelling 5 (1978) 17–38.
- Donatelli, M. 1995. Sistemi nella gestione integrata delle colture - Appunti dalle lezioni. Pubblicazione speciale dell'Istituto Sperimentale Agronomico, ISA-Sezione di Modena, Modena, 133 pag.
- Duke, J.A., 1929. Handbook of nuts.
- Edwards, N.T. and S.B. McLaughlin. 1978. Temperature independent diel variations of respiration rates in *Quercus alba* and *Liriodendron tulipifera*. *Oikos* 31:200–206.
- Engler A. 1883. Burseraceae et Anacardiaceae,. In : A. De Candolle e C. De Candolle (eds.). *Monographiae Phanerogamarum*, Paris 284-293
- FAOSTAT, 2005. Statistical Databases. FAO Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome. [http:// faostat.fao.org](http://faostat.fao.org)
- Farquhar, G.D., van Caemmerer, S. and Berry, J.A. 1980. A Biochemical Model of Photosynthetic CO<sub>2</sub> Assimilation in Leaves of C-3 Species. *Planta* 149: 78-90.
- Farrar, J.F. 1980. Allocation of carbon to growth, storage and respiration in the vegetative barley plant. *Plant Cell Environ.* 3:97–105.
- Faust M. 1989. *Physiology of temperate zone fruit trees*. Wiley, New York.
- Ferree D.C. e Palmer J.W. 1982. Effect of spur defoliation and ringing during bloom on fruiting, fruit mineral level and photosynthesis of "Golden Delicious" apple. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 107: 1182-1185.
- Fisher F.J.F. 1954 Effect of temperature on leaf-shape in *Ranunculus*. *Nature* 173, 406-407.
- Ford E.D., Avery A., Ford R., Simulation of branch growth in the *Pinaceae*: Interactions of morphology, phenology, foliage productivity, and the requirement for structural support, on the export of carbon, *J. Theor. Biol.* 146 (1990) 15–36.
- Forrester, J.W. 1961. *Industrial Dynamics*. Published jointly by the M.I.T. Press Massachusetts Institute of Technology , and John Wiley & Sons, New York, Sudan. 646 pp.

- Freeman M. e Ferguson L., 1995. Factors affecting splitting and Blanking. In: L. Ferguson (ed.). Pistachio production. Val Print/Zip-Print. 106-109
- Friend A.D., PGEN, an integrated model of leaf photosynthesis, transpiration and conductance, *Ecol. Modelling* 77 (1995) 233–255.
- Garcia-Luis A., Fornes F., Sanz A. e Guardiola J.T. 1988. The regulation of flowering and fruit set in citrus: relationship with carbohydrate levels. *Israel J. Bot.* 37: 189-201.
- Gardner, F.E., 1929. The relationship between tree age and the rooting of cuttings. *Proc. Soc. Hort. Sci.* 26:101-104.
- George L.J. & Preece J.E. 2004 The influence of location of main stem segment origin on forcing and rooting of softwood shoots of *Betula nigra* L. *HortScience* 39, 890.
- Geurts F (1982) The Pistachio nut (*Pistacia vera* L.), aspects related to germplasm conservation. Royal Tropical Ints, Amsterdam, pp 32.
- Gifford, R.M. and L.T. Evans. 1981. Photosynthesis, carbon partitioning an yield. *Annu. Rev. Plant Physiol.* 32:485-509.
- Gijon M. C., Guerrero J., Couceiro J. F., Moriana A. (2009). Deficit irrigation without reducing yield or nut splitting in pistachio (*Pistacia vera* cv Kerman on *Pistacia terebinthus* L.). *Agricultural Water Management* 96(1): 12-22.
- Goebel, K., 1900. Organograpy of plants. Part 1. Clarendon Press, Oxford.
- Goldhamer, D.A. 1995. Irrigation management. *In* Pistachio Production. Ed. L. Ferguson. Center for fruit and nut research and information, Davis, CA, pp 71–81.
- Goldhamer D.A., 2005. Tree water requirements and regulated deficit irrigation. In: Ferguson L. (Ed.), *Pistachio Production Manual*. Fourth Edition: 103–116.
- Goldhamer DA, Kjelgren RK, William R, Beede R., 1985. Water use requirements of pistachio trees and response to water stress. *Adv Evapotranspir ASAE Pub.* 14-85, pp 216-223
- Goldhamer, D.A., B.C. Phene, R. Beede, L. Sherlin, S. Mahan and D. Rose. 1987. Effects of sustained deficit irrigation on pistachio tree performance.

- In Annual Report, Crop Year 1986–1987. California Pistachio Industry, Fresno, CA, pp 61–66*
- Goldschmidt E.E. e Monselise S.P. 1977. Physiological assumptions towards the development of a citrus fruiting model. Proceedings of the International Society of Citriculture. p. 668-672.
- Gonzales A., Frutos D., 1990. In vitro culture of *Pistacia vera* L. embryos and aged tree explants. NATO ASI series A. 186: 335–338.
- Goudriaan, J. 1977. Crop Micrometeorology: A Simulation Study. Pudoc, Wageningen, The Netherlands. 249 pp.
- Grossman Y.L., DeJong T.M., PEACH: A simulation model of reproductive and vegetative growth in peach trees, *Tree Physiol.* 14 (1994) 329–345.
- Hackett W.P. and Murray J.R. 1997 Approaches to understanding maturation or phase change. pp. 73-86. *in* Geneve, R.L, Preece J.E. and Merkle S.A. (eds.) *Biotechnology of Ornamental Plants*. CAB International, Wallingord, UK.
- Hall, A.E. and Bjorkman, O. 1975. Model of Leaf Photosynthesis and Respiration. *In Ecological Studies*, D.M. Gates and R.B. Schmerl (eds.), Springer, New York, USA.
- Hansen K.C. & Lazarte J.E. 1984 *In vitro* propagation of pecan seedlings. *HortScience* 19, 237-239.
- Hanus D. & Rohr R. 1987 *In vitro* plantlet regeneration from juvenile and mature sycamore maple. *Acta Hort.* 212, 77-82.
- Hartmann H. T., Kester D.E., 1959. plant propagation principles and practices. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.
- Hendricks L., Ferguson L., 1995. The pistachio tree. *In*: L. Ferguson (ed.). *Pistachio production*. University of California at Davis (USA), 7-10.
- Henry P.H. & Preece, J.E. 1997a Production and rooting of shoots generated from dormant stem sections of maple species. *HortScience* 32, 1274-1275.
- Henry P.H. & Preece, J.E. 1997b Production of shoots from dormant *Acer* as influenced by length and caliper of stem sections. *J. Environ. Hort.* 15, 153-156.

- Ho L. 1988. Metabolism and compartmentation of imported sugars in sink organs in relation to sink strength. *Ann. Rev. Plant Mol. Biol.* 39: 355-378.
- Hoogenboom, G., Peterson, C. M., and Huck, M. G., (1987). Shoot growth rate of soybean as affected by drought stress. *Agronomy Journal* 79, 598-607.
- Hormaza JI, Wunsch, 2007. Pistachio A. Genome mapping and molecular breeding in plants. In: Kole C, editor. *Fruits and Nuts*, Vol. 4. Berlin, Heidelberg: Springer;. p. 243–51. Chapter 12.
- Hottes, A.C., 1949. *How to increase plants*. A.T. De La Mare Co., New York.
- Hsiao, T.C., 1973. Plant responses to water stress. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 24, 519–570.
- Hudson J.P. & Williams I.H. 1955 Juvenility phenomena associated with crown gall. *Nature* 175, 814.
- Ikemori, Y.K. (1987) Epicormic shoots from the branches of *Eucalyptus grandis* as an explant source for in vitro culture. *Commonw. For. Rev.* 66, 351-356.
- Isebrands J.G., Rauscher H.M., Crow T.R., Dickmann D., Whole-tree growth process models based on structural-functional relationships, in: Dixon R.K., Meldahl R.S., Ruark G.A., Warren W.G. (Eds.), *Process modelling of forest growth responses to environmental stress*, Timber Press, Portland, OR, 1990, pp. 96–112.
- Johnson R.S., Lakso A.N., Carbon balance model of a growing apple shoot: I. Development of the model, *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 111 (1986) 160–164.
- Johnson I.R., Plant respiration in relation to growth, maintenance, ion uptake and nitrogen assimilation, *Plant Cell. Env.* 13 (1990) 319–328.
- Johnson, I.R., Parson A.J., Ludlow M.M., 1989. Modelling Photosynthesis in monocultures and mixtures. *Aust. J. Plant. Physiol.* 16 : 501 - 516.
- Joley, L.E. 1979. Pistachios, p. 163-174. In: R.A. Jaynes (ed.), *Nut Tree Culture in North America*. Northern Nut Growers Assn., Hamden, CT.
- Joley L. E., Opitz K. W. (1971) Further experiences with propagation of pistacia. *Proc. Int. Plant Propagators. Annual Meeting*.



- Jonard R. Micrografting and its applications to tree improvement. In Bajaj, Y.P.S. (ed). *Biotechnology in agriculture and forestry. Trees I*. Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, 1986. p. 31–48.
- Jones, M. M., Turner N.C. and Osmond, C.B. (1981). Mechanisms of drought resistance. In “*The Physiology and Biochemistry of Drought Resistance in Plants*”. (Eds L. G. Paleg and D. Aspinall.) pp. 15-35. (Academic Press: New York)
- Joyce, L.A. and R.N. Kickert. 1987. Applied Plant Growth Models for Grazinglands, Forests, and Crops. *In Plant Growth Modeling for Resource Management, Vol. I*, K. Wisiol and J.D. Hesketh (eds.), CRC Press, Boca Raton, Florida, USA. 17-55.
- Kanber R., Yazar A., Önder S., Köksal H. (1993). Irrigation response of Pistachio (*Pistacia vera* L.). *Irrigation Science*. 14 (1): 7-14.
- Khanna-Chopra, R., G. S. Chaturverdi, P. K. Aggarwal, and S. K. Sinha. 1980. Effect of potassium on growth and nitrated reductase during water stress and recovery in maize. *Physiologia Plantarum* 49: 495–500.
- Khalife T., 1959. Recherchessur la culture du pistachier en Syrie. Istitut Agronomique de l’Etat.
- Kimura, M. 1970. Analysis of production processes of an undergrowth of subalpine *Abies* forest, *Pteridophyllum racemosum* population: respiration, gross production and economy of dry matter. *Bot. Gaz.* 83:304–311.
- Knisel, W.G., (ed.) 1980. *CREAMS : A Field Scale Model for Chemicals, Runoff and Erosion from Agricultural Management Systems*. Conservation Research Report No. 26, U.S. Department of Agriculture, SEA.
- Kozlowski, T.T. 1992. Carbohydrate sources and sinks in woody plants. *Bot. Rev.* 58:107–222.
- Kozlowski, T.T. and T. Keller. 1966. Food relations of woody plants. *Bot. Rev.* 32:293–382.
- Kramer. P.J. 1983. “*Water relations of plants*”. (Academic Press: London.)
- Kramer, P.J. and T.T. Kozlowski. 1979. *Physiology of woody plants*. Academic Press, New York, 811 p.

- Lacointe A., Carbon allocation among tree organs: a review of basic processes and representation in functional-structural tree models, *Ann. For. Sci.* 57 (2000) 521–534.
- Lakso, A.N., M.D. White and D.S. Tustin. 2001. Simulation modeling of the effect of short and long-term climatic variations on carbon balance of apple trees. *Acta Hortic. (ISHS)* 557:473–480.
- Lambers, H., F. Posthumus, I. Stulen, L. Lanting, S.J. Van de Dijk and R. Hofstra. 1981. Energy metabolism of *Plantago major* as dependent on the nutrient supply. *Physiol. Plant.* 51:85–92.
- Landsberg J.J., *Physiological ecology of forest production*, Academic Press, London, 1986, 198 p.
- Landsberg J.J., Kaufmann M.R., Binkley D., Isebrands J., Jarvis P.G. Evaluating progress toward closed forest models based on fluxes of carbon, water and nutrients, *Tree Physiol.* 9 (1991) 1–15.
- Landsberg J.J., Waring R.H. A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning, *For. Ecol. Manage.* 95 (1997) 209–228.
- Laurie, A. and Chadwick L.C., 1931. *The modern nursery. A guide to plant propagation, culture and handling.* Macmillan, New York.
- Le Roux X., Lacointe A., Escobar-Gutiérrez A. and Le Dizès S. (2001) Carbon-based models of individual tree growth: A critical appraisal. *Ann. For. Sci.* 58 (2001) 469–506
- Ledbetter D.I. & Preece, J.E. 2003 Forcing softwood shoots, rooting, and micropropagating *Hydrangea quercifolia* Bartr. *Prop. Orn. Plants* 3, 3-10.
- Lee S.K. & Rao A.N. 1986 *In vitro* regeneration of plantlets in *Fagraea fragrans* Roxb. - a tropical tree. *Plant Cell Tissue Organ Cult.* 7, 43-51.
- Leffelaar, P.A. and Ferrari, T.J. 1989. Some elements of dynamic simulation. In: *Simulation and systems management in crop protection.* In: R. Rabbinge, S.A. Ward, and H.H. van Laar (eds.). *Simulation Monograph* 32, Pudoc, Wageningen, The Netherlands.
- Lommen, P.W., Schwintzer, C.R., Yocum, C.S. and Gates, D.M. 1971. A Model Describing Photosynthesis in Terms of Gas Diffusion and Enzyme Kinetics. *Planta* 98: 195-220.

- Long, S.P. and J.E. Hallgren. 1985. Measurements of CO<sub>2</sub> assimilation by plants in the field and the laboratory. In *Techniques in Bioproductivity and Photosynthesis*. Eds. J. Coombs, D.O. Hall, S.P. Long and M.O. Scurlock. Pergamon Press, Oxford, pp 62–94.
- Maggs D.H., 1973. Genetic sources in Pistachio. *Plant. Gen. Res. Newsletter* 29 7-15.
- Maggs D.H.,1982 . An introduction to pistachio growing in Australia. CSIRO Australia 665-669.
- Mahlstede, J.P, and E.S. Haber, 1957. *Plant propagation*. John Wiley and Sons, New York.
- Mäkelä A., Partitioning coefficients in plants models with turn-over, *Ann. Bot.* 57 (1986) 291–297.
- Mäkelä A., Modelling structural functional relationships in whole-tree growth resource allocation, in: Dixon R., Meldahl R., Ruark G., Warren W. (Eds.), *Process modelling of forest growth responses to environmental stress*, Timber press, Portland, Oregon, 1990, pp. 81–95.
- Marcelis L.F.M., Simulation of biomass allocation in greenhouse crops – a review, *Acta Hort.* 328 (1993) 49–68.
- Marchi, S., D. Guidotti, L. Sebastiani and R. Tognetti. 2007. Changes in assimilation capacity during leaf development in broadleaved *Prunus persica* and sclerophyllous *Olea europaea*. *J. Hortic. Sci. Biotechnol.* 82:69–78.
- Marra F.P., Barone E., Caruso T., Motisi A. e Sidari M. 1998. Dry matter accumulation and carbohydrate content within branches of fruiting and deblossomed pistachio (*Pistacia vera* L.) trees. *Acta Hort.* 470.
- Marra F.P., Barone E., La Mantia M., Caruso T., 2009. Toward the definition of a carbon budget model: seasonal variation and temperature effect on respiration rate of vegetative and reproductive organs of pistachio trees (*Pistacia vera*). *Tree Physiology* 29, 1095–1103.
- Martin, T.A., R.O. Teskey and P.M. Dougherty. 1994. Movement of respiratory CO<sub>2</sub> in stems of loblolly-pine (*Pinus taeda* L.) seedlings. *Tree Physiol.* 14:481–495.

- Martinelli A., Loretto F., 1988. Use of in vitro techniques for selection and cloning of different *Pistacia* species. *Acta Hort.* 227: 436–437.
- Massimino, D., M. Andre, C. Richaud, A. Daguemet, J. Masimino and J. Vivoli. 1980. Evolution horaire au cours d'une journee normale de la respiration foliaire et racinaire et de la nutrition N.P.K. chez *Zea mays*. *Physiol. Plant.* 48: 512–518.
- McCree K.J., Measuring the whole-plant daily carbon balance, *Photosynthetica* 20 (1986) 82–93.
- McCree, K.J. and S. Kresovich. 1978. Growth and maintenance requirements of white clover as a function of daylength. *Crop Sci.* 18:22–25.
- McMurtrie R., Wolf L., Above and below ground growth of forest stands: a carbon budget model, *Ann. Bot.* 52 (1983) 437–448.
- Milella A. e Agabbio M. 1978. The position on the problem of almond growing in Sardinia. The Third Conference of Mediterranean Research and Study Group on the Almond, Italy. p. 302-310.
- Minà Palumbo F., 1882. Monografia sulla coltivazione dei pistacchi in Sicilia. Lordsnaider Giovanni Tipografo, Palermo.
- Minchin P.E.H., Thorpe M.R., Farrar J.F., A simple mechanistic model of phloem transport which explains sink priority, *J. Exp. Bot.* 44 (1993) 947–955.
- Mohren G.M.J., Burkhart H.E., Contrasts between biologically- based process models and management-oriented growth and yield models, *For. Ecol. Manage* 69 (1994) 1–5.
- Molz, F.J. and Ferrier, J.M. 1982. Mathematical Treatment of Water Movement in Plant Cells and Tissue : A Review. *Plant, Cell and Environment* 5 : 191-206.
- Monastra F., Avanzato D., Lodoli E., 1987. Il pistacchio nel mondo. Confronto fra la pistacchicoltura delle aree tradizionali e quella emergente degli Stati Uniti. *Agricoltura Ricerca* II (75-80) 1-8.
- Monselise S.P. e Goldschmidt E.E. 1982. Alternate bearing in fruit trees. *Hortic. Rev.* 4: 128-173.

- Monselise S.P., Goldschmidt E.E. e Colomb A. 1981. Alternate bearing on citrus and ways of control. Proceeding of the International Society of Citriculture. p. 239- 242.
- Monteith J.L., Solar radiation and productivity in tropical ecosystems, *J. Appl. Ecol.* 2 (1972) 747–766.
- Monteith, J.L. 1975. *Vegetation and the Atmosphere, Vol. 1: Principles.* Academic Press, New York.
- Murashige T and Skoog F (1962) A revised medium for rapid growth and bioassays with tobacco tissue cultures. *Physiol Plant* 15(3): 473-497.
- Negi J.D.S., Manhas R.K. e Chauhan P.S. 2003. Carbon allocation in different components of some tree species of India: A new approach for carbon estimation. *Current Science.* 85(11): 1528-1531.
- Negisi, K. 1981. Diurnal and seasonal fluctuations in the stem bark respiration of a standing *Quercus myrsinaefolia* tree. *J. Jpn. For. Soc.* 63:235–241.
- Nobel, P.S. 1983. *Biophysical Plant Physiology and Ecology.* W.H. Freeman and Co., San Francisco, USA.
- Nzima, M.D.S., G.C. Martin and C. Nishijima. 1997*a*. Seasonal changes in total nonstructural carbohydrates within branches and roots of naturally “off” and “on” ‘Kerman’ pistachio trees. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 122:856–862.
- Oliveira, C.M. and C.A. Priestly. 1988. Carbohydrate reserves in deciduous fruit trees. *Hortic. Rev.* 10:403–430.
- Onay A., 1996. In vitro organogenesis and embryogenesis of pistachio, *Pistacia vera* L. PhD Thesis, University of Edinburgh, UK.
- Onay A., 2000a. Micropropagation of pistachio from mature trees. *Plant Cell, Tissue Organ Cult*;60:159–62.
- Onay A., 2005. Pistachio, *Pistacia vera* L. In: *Protocols for Somatic Embryogenesis.* In: Mohan Jain S, Gupta P (eds.) *Woody Plants.* Forestry Sciences, Volume 77. Kluwer Academic Publishers, The Netherlands,. p. 289–300.
- Onay A., Jeffree C.E., Yeoman M.M., 1995. Somatic embryogenesis in cultured immature kernels of Pistachio, *Pistacia vera* L. *Plant Cell Reports* 15: 192–195.

- Onay A., Jeffree C.E., Yeoman M.M., 1996. Plant regeneration from encapsulated embryoids and embryogenic mass of Pistachio. *Plant Cell Reports* 15: 723–726 .
- Onay A., Firat M.Z., Namli O., 1997. An improved method for embling production in pistachio, *Pistacia vera* L. using liquid medium matured somatic embryos. *Turkish Journal of Biology*, 21(2): 159–174.
- Onay A, Jeffree CE, Theobald C, Yeoman MM, 2000. An analysis of the effects of maturation treatments on the probabilities of somatic embryo germination and embling development in pistachio, *Pistacia vera* L. using a logistic regression method. *Plant Cell Tiss Org Cult*;60(2):121–9.
- Onay A, Işıkalan C, Adıyaman F., Piriñ V., Tilkat E., Başaran D., 2003a. “In vitro Micrografting of Pistachio (*Pistacia vera* L.)”, Agriculture, Forestry and Food Technologies Research Grant Committee (TOVAG), Project Final Report, #TOVAG-2815. The Scientific and Technical Research Council of Turkey (TUBITAK)..
- Onay A, Piriñ V, Işıkalan C, Adıyaman F. Tilkat E ve Başaran D., 2003b. In vivo and in vitro micrografting of pistachio, *Pistacia vera* L. cv.”Siirt”. *Tur J Biol*;27:95-100.
- Onay A, Piriñ V, YıldırımH, Başaran D, 2004. In vitro micrografting of pistachio (*Pistacia vera* L. var. Siirt. *Plant Cell, Tissue Organ Cult*;77:215–9.
- Onay A. Tilkat E., 2006. In vitro micrografting of pistachio (*Pistacia vera* L. cv. Siirt). *Turkish Scientific and Technical Research Society (TUBITAK) Participating Conference of Science, Technology and Novel Projects (23 June)*;. p. 15–6.
- Onay A, Tilkat E, Yildirim H, Suzerer V., 2007a. Indirect somatic embryogenesis from mature embryo cultures of pistachio. *Pistacia vera* L. *Propagation of Ornamental Plants*, 7(2).. p. 68–74.
- Onay A, Tilkat E, Yildirim H., 2007b. Effect of genotype on somatic embryogenesis in pistachio (*Pistacia vera* L.). *Propagation of Ornamental Plants*, 7 (4).. p. 204–9.
- Onay A, Tilkat E, Işıkalan Ç, Namlı S., 2007c. Micrografting of pistachio (*Pistacia vera* L. cv. Siirt). In: Mohan Jain S, Häggman H, editors.

- Protocols for Micropropagation of Woody Trees and Fruits. Netherlands: Springer;. p. 289–98.
- Ozden-Tokatli Y, Ozudogru EA, Akcin A., 2003. Enhancement of regeneration in pistachio (*Pistacia vera* L.) with silver nitrate. In: Fifth International Symposium in the Series “Recent Advances in Plant Biotechnology”, September 7–13, High Tatras, Slovak Republic. p. 21.
- Ozden-Tokatli Y, Ozudogru EA, Akcin A., 2004. In vitro regeneration of pistachio (*Pistacia vera* L.) through organogenesis: effect of silver nitrate, polyvinylpyrrolidone and citric acid. *In Vitro Cell Dev Biol*;40:46-A.
- Ozden-Tokatli Y, Ozudogru EA, Akcin A., 2005. In vitro response of pistachio nodal explants to silver nitrate. *Sci Hortic*;106:415–26.
- Ozden-Tokatli Y, Ozudogru EA, Akcin A., 2006. Optimization of an efficient micropropagation protocol and assessment of plant genetic fidelity by RAPD markers in pistachio (*Pistacia vera* L.). *Adv Hortic Sci*;20(2):162–9.
- Paludosi S. 1998. IPGRI’s initiatives for the promotion of better conservation and use of pistacia spp. Genetic resources. *Acta Hort.* 470.
- Parfitt DE, Almehdi A., 1994. Use of high CO<sub>2</sub> atmospheric and medium modifications for the successful micropropagation of pistachio. *Sci Hortic*;56:321–9.
- Pate, J.S., D.B. Layzell and C.A. Atkins. 1979. Economy of carbon and nitrogen in a nodulated and nonnodulated (NO<sub>3</sub>- grown) legume. *Plant Physiol.* 64:1083–1088.
- Penning de Vries, F., H. Van Laar and M. Chardon. 1983. Bioenergetics of growth of seeds, fruits and storage organs. In *Proceedings of the Symposium on Potential Productivity of Field Crops in Different Environments*. International Rice Research Institute, Manila, Philippines 1980, pp 37–59.
- Peterson, R.B. and I. Zelitch. 1982. Relationship between net CO<sub>2</sub> assimilation and dry weight accumulation in field-grown tobacco. *Plant Physiol.* 70:677–685.
- Polito V.S., Pinney K. (1999). Endocarp Dehiscence in Pistachio (*Pistacia vera* L.) *International Journal of Plant Sciences.* 160 (5): 827–835.

- Pontikis C.A. 1986. Pontikis Pistachio. *Hortscience*. 21(4): 1074-1074.
- Porlingis I.C. 1974. Flower bud abscission in Pistachio (*Pistacia vera* L.) as related to fruit development and other factors. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 99(2): 121-125.
- Post J.J. e Stam J.C. 1983. Research on biennial bearing at the experimental garden at Werkhoven. (2) The effect of flower thinning on bud formation. *Hort. Abst. #4828*. 53(7): 469.
- Preece, J.E. 2002. Stock plant physiological factors affecting growth and morphogenesis. In: G.-J. de Klerk and A. Cassells (eds.), *Plant Propagation by Tissue Culture*.
- Preece J.E. and Read P.E. 2003 Novel methods in micropropagation. *Acta Hortic.* 616, 71-76.
- Preece J.E., Van Sambeek J.W., Henry P.H. & Zaczek J. 2002 Forcing the tissue. *Am. Nurseryman* 196(7), 26-30, 32, 34.
- Promnitz L.C., A photosynthate allocation model for tree growth, *Photosynthetica* 9 (1975) 1–15.
- Rauscher H.M., Isebrands J.G., Host G.E., Dickson R.E., Dickmann D.I., Crow T.R., Michael D.A., ECOPHYS: An ecophysiological growth process model for juvenile poplar, *Tree Physiol.* 7 (1990) 255–281.
- Read P.E. & Yang Q. 1987 Novel plant growth regulator delivery systems for *in vitro* culture of horticultural plants. *Acta Hortic.* 212, 55-59.
- Read P.E. & Yang G. 1988 Response *in vitro* of explants chemically treated *via* forcing solutions. *Comb. Proc. Intl. Plant Prop. Soc.* 38, 406-408..
- Read P.E. & Yang G. 1991 Plant growth regulator effects on rooting of forced softwood cuttings. *Acta Hortic.* 300, 197-200.
- Reffye (de) P., Houllier F., Blaise F., Fourcaud T., Essai sur les relations entre l'architecture d'un arbre et la grosseur de ses axes végétatifs, in: Bouchon J., Reffye (de) P., Barthélémy D. (Eds.), *Modélisation et simulation de l'architecture des végétaux*, INRA Éditions, Paris, 1997, pp. 255–423.
- Rieger, M. 1995. Offsetting effects of reduced root hydraulic conductivity and osmotic adjustment following drought. *Tree Physiol.* 15: 379–385.
- Rose, D.A. and Charles-Edwards, D.A. 1981. *Mathematics and Plant Physiology*. Academic Press, New York, USA.



- Rosecrance, R.C., S.A. Weinbaum and P.H. Brown. 1998. Alternate bearing affects nitrogen, phosphorus, potassium and starch storage pools in mature pistachio trees. *Ann. Bot.* 82:463–470.
- Ruget F., Respiration de croissance et d'entretien: méthodes de mesure, comparaison des résultats, *Agronomie* 7 (1981) 601–610
- Ryan, M., E. Hunt, R. McMurtrie, G. Agren, J. Aber, A. Friend, E. Rastetter, W. Pulliam, R. Raison and S. Linder. 1996. Comparing models of ecosystem function for temperate description and validation. In *Global Change: Effects on Coniferous Forests and Grasslands*. Eds. A. Breymeyer, D. Hall, J. Melillo and G.I. Agren. John Wiley and Sons, SCOPE, Chichester, pp 313–362.
- Sepaskhah, A. R., and Sh. Karimi-Goghary. 2003. Growth and chemical composition of pistachio affected by salinities and depths of water table. *Communications in soil science and plant analysis*. 34: 343–355.
- Sepaskhah, A. R., and Sh. Karimi-Goghary. 2005. Shallow groundwater contribution to pistachio water use. *Agricultural Water Management* 72: 69–80.
- Sepaskhah, A. R., and M. Maftoun. 1981. Growth and chemical composition of pistachio cultivars as influenced by irrigation regimes and salinity levels of irrigation water. I. Growth, *J Hort Sci* 56:271 -284
- Sinoquet H., Le Roux X., Adam B., Améglio T., Daudet F.A., RATP: a model for simulating the spatial distribution of radiation absorption, transpiration and photosynthesis within vegetation canopies: application to an isolated tree crown, *Plant Cell Env.* 24 (2001) 395–406.
- Spain, J.D. 1982. *BASIC microcomputer models in biology*. Addison-Wesley Publishing Co., Reading, Massachusetts. 354 pp.
- Spann T.M., Beede, R.H. and Dejong T.M., 2008. Seasonal carbohydrate storage and mobilization in bearing and non-bearing pistachio (*Pistacia vera*) trees. In: *Tree Phys.*, 28, p. 207-213.
- Sparks D. e Davis J.T. 1974. Alternate bearing relates to carbohydrates. *Pecan Quarterly*. 8(4): 20-22, 24-28.
- Spiegel-Roy P, Nazigh D, Evenari M (1977) Response of pistachio to low soil moisture conditions. *J Am Soc Hort Sci* 102: 470-473 Steel RGD,

Torrie JH (1960) Principles and procedures of statistics. McGraw Hill, New York, pp 481

Spina P. (1982). Il pistacchio. Ed. Agricole, Bologna.

Spitters et al. 1986 . Daily diffuse transmission as a function of total transmission . Agric. Forest. Meteorol. 38 : 217 - 229 pp.

Spitters, C.J.T. 1986 . Separating the diffuse and direct component of global radiation and its implications for modeling canopy photosynthesis. Part II. Calculation of canopy photosynthesis. Agric. For. Meteorol. 38 : 231 - 242 pp.

Spitters, C.J.T. , van Keulen, H. , and van Kraalingen, D.W.G. 1989. A simple and universal crop growth simulator : SUCROS87. *In: Simulation and Systems Management on Crop Protection*, R. Rabbinge, S.A. Ward and H.H. van Laar (eds.), Simulation Monographs 32, PUDOC, Wageningen, The Netherlands. 147-181.

Steiner, J.L. 1987. Modeling agroclimatic systems : guidelines and perspectives. *In Workshop on Soil , Water and Crop / Livestock Management Systems for Rainfed Agriculture in the Sudano-Sahalian Zone* (Nieamey, Niger, 1987), In preparation.

Stockle, C.O. 1989. Simulation models in agriculture: From cellular level to field scale. Proceedings of the 1989 Summer Computer Simulation Conference, Austin, Texas, 24-27 July.

Stutte G.W. e Martin G.C. 1986. Effect of light intensity and carbohydrate reserves on flowering in olive. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 111(1): 27-31.

Tajabadi Pour, A., A. R. Sepaskhah, and M. Maftoun. 2005. Plantwater relations and seedling growth of three pistachio cultivars as influenced by irrigation frequency and applied potassium. *Journal of Plant Nutrition* 28: 1413–1425.

Takeda F. e Crane J.C. 1980. Absciscic-Acid in Pistachio as Related to Inflorescence Bud Abscission. *Journal of the American Society for Horticultural Science.* 105(4): 573-576.

Takeda F., Ryugo K. e Crane J.C. 1980. Translocation and Distribution of Photosynthates-C-14 in Bearing and Non-Bearing Pistachio Branches.

- Journal of the American Society for Horticultural Science. 105(5): 642-644.
- Thierron, V. and H. Laudelout. 1996. Contribution of root respiration to total CO<sub>2</sub> efflux from the soil of a deciduous forest. *Can. J. For. Res.* 26:1142–1148.
- Thornley J.M.H, Respiration, growth and maintenance in plants, *Nature* 227 (1970) 304–305.
- Thornley J.H.M., A model to describe the partitioning of photosynthates during vegetative plant growth, *Ann. Bot.* 36 (1972) 419–430.
- Thornley J.H.M., A transport-resistance model of forest growth and partitioning, *Ann. Bot.* 68 (1991) 211–226.
- Thornley, J.H.M. and M.G.R. Cannell. 2000. Modelling the components of plant respiration: representation and realism (vol. 85, pg. 55, 2000). *Ann. Bot.* 85:937–937.
- Thornley, J.H.M. and Johnson, I.R. 1990. Plant and crop modelling, a mathematical approach to plant and crop physiology. Clarendon Press, Oxford, Great Britain. 669 pp.
- Tilkat E. Micropropagation of male *Pistacia vera* L. via apical shoot tip culture. Ph.D. Thesis 2006. Institute of Science, University of Dicle, Turkey, 142 p. (in Turkish).
- Tilkat E, Onay A, Yıldırım H., Ayaz E., 2009a. Direct plant regeneration from mature leaf explants of pistachio, *Pistacia vera* L. *Sci Hortic*;121(3):361–5.
- Tous J. e Ferguson L., 1996 Mediterranean fruits. In: J. Janick (ed.), *Progress in new crops*. ASHS Press, Arlington, VA. 416-430.
- Valentine H.T., Tree growth models: Derivations employing the pipe model theory, *J. Theor. Biol.* 117 (1985) 579–585.
- van Iersel, M.W. 2003. Carbon exchange rates of four bedding plant species as affected by short-term temperature changes. *J. Am. Soc. Hort. Sci.* 128:100–106.
- Van Sambeek J.W., Lambus L.J., Khan S.B. & Preece J.E. 1997a *In vitro* establishment of tissues from adult black walnut. pp.78-92 *in* Van

- Sambeek, J.W. (ed.) *Knowledge for the Future of Black Walnut*. USDA Forest Service General Technical Report NC-191.
- Van Sambeek. J.W., Larnbus, L.J. and Preece, J.E. 1997b. Production of epicormic sprouts on branch segments of adult black walnut for in vitro culture. 88th Annual Report Northern Nut Growers Association, p.93-104.
- Van Sambeek, J. W., L. J. Lambus, and J. E. Preece. 1998a. Production of epicormic sprouts on branch segments of adult black walnut for in vitro culture. Ann. Rpt. Northern Nut Growers 88:93-104.
- Van Sambeek. J. W. and Preece, J.E. 1999. Forcing environment affects epicormic sprout production from branch segments for vegetative propagation of adult hardwoods. Comb. Proc. Intem. Plant Prop. Soc. 49:156-158.
- Van Sambeek J. W., Preece J. E., Goggeshall M. V., 2002. Forcing epicormic sprouts on branch segments of adult hardwoods for softwood cuttings. Combined Proceedings of International Plant Propagators Society, 52: 417-424.
- Vieitez A.M., Sanchez M.C., Amo-marco J.B. & Ballester A., 1994. Forced flushing of branch segments as a method for obtaining reactive explants of mature *Quercus robur* trees for micropropagation. Plant Cell Tissue Organ Cult. 37, 287-295.
- Vemmos S.N. 1994. Net Phytosynthesis, Stomatal Conductance, Chlorophyll Content and Specific Leaf Weight of Pistachio Trees (Cv Aegenes) as Influenced by Fruiting. Journal of Horticultural Science. 69(5): 775-782.
- Venkateswarlu B. e Visperas R.M. 1987. Source-sink relationship in crop plant. Irri Research Paper Series Manila, Philippines. 125.
- Vivin P., Castelan M. e Gaudillere J.P. 2002. A source/sink model to simulate seasonal allocation of carbon in grapevine. Acta Hort. 584: 43-56.
- Wang Y.P., Jarvis P.G., Description and validation of an array model—MAESTRO, Agric. For. Meteorol. 51 (1990) 257–280.
- Wardlaw I.F. 1990. The control of carbon partitioning in plant. Tansley Review N.27- New Phytol. 116: 341-381.

- Waring, R.H., J.J. Landsberg and M. Williams. 1998. Net primary production of forests: a constant fraction of gross primary production? *Tree Physiol.* 18:129–134.
- Watson, M.A., 1984. Development constraints: Effect of population growth and patterns of resource allocation in a clonal plant. *Amer. Natur.* 123:411-426.
- Whitehouse W.E. 1957. The pistachio nut - a new crop for Western United States. *Economic Botany.* 11: 281-321.
- Webb W.L., Atmospheric CO<sub>2</sub>, climate change, and tree growth: a process model. I. Model structure, *Ecol. Modelling* 56 (1991) 81–107.
- Weinbaum, S.A., G.A. Picchioni, T.T. Muraoka, L. Ferguson and P.H. Brown. 1994. Fertilizer nitrogen and boron uptake, storage and allocation vary during the alternate-bearing cycle in pistachio trees. *J. Am. Soc. Hortic. Sci.* 119:24–31.
- Weinbaum S.A., Brown P.H. e Rosecrance R.C. 1994a. Assessment of Nitrogen Uptake Capacity During the Alternate Bearing Cycle. *California Pistachio Industry:* 53-55.
- Weinstein D.A., Yanai R.D., Beloin R., Zollweg C.G., The response of plants to interacting stresses: TREGRO Version 1.74 – description and parameter requirements, Electric Power Res. Institute, Palo Alto, CA, 1992, 73 p.
- Wermelinger B., Baumbärtner J., Gutiérrez A.P., A demographic model of assimilation and allocation of carbon and nitrogen in grapevines, *Ecol. Modelling* 53 (1991) 1–26.
- Wetzstein H.Y. e Sparks D. 1986. Flowering in pecans. *Hortic. Rev.* 8: 217-255.
- Williams M.W. 1989. Chemical thinning of apples. *Hortic. Rev.* 1: 270-300.
- Williams M., A three-dimensional model of forest development and competition, *Ecol. Modelling* 89 (1996) 73–98.
- Williams, J.R., Jones, C.A. and Dyke, P.T.. 1984. The EPIC Model and Its Application. *In Proceedings of ICRISAT-IBSNAT-SMSS Symposium on Minimum Data Sets for Agrotechnology Transfer ( Hyderabad , India , March 21-26, 1983) , 111-121.*

- Wilson J.B., A review of evidence on the control of shoot: root ratio, in relation to models, *Ann. Bot.* 61 (1988) 433–449.
- Wisnol, K. and Hesketh, J.D. 1987. *Plant Growth Modeling for Resource Management, Vol. II : Quantifying Plant Processes.* CRC Press, Boca Raton, Florida, USA.
- Witowski J. 1997. Gas exchange of the lowest branches of young Scots pine: a costbenefit analysis of seasonal branch carbon budget. *Tree Physiology.* 17: 757- 765.
- Wolpert J.A. e Ferguson L. 1990. Inflorescence Bud Retention in Kerman Pistachio - Effects of Defruiting Date and Branch Size. *Hortscience.* 25(8): 919-921.
- Woodroof J.G. 1967. Pistachio Nuts. In: J.G. Woodroof (ed.). *Tree nuts: productionprocessing products.* AVI publishing Company, Westport - Connecticut.
- Wright, R.C.M., 1955. *Plant propagation: A practical guide to the various methods of propagating trees and shrubs, herbaceous plants, fruits, and vegetables.* Ward, Lock & Co. Ltd., London.
- Yang, G. and P.E. Read.1989. Pre-forcing soaks influence bud break and shoot elongation in forced woody plant species. *Abstracts of 86th Ann. Meeting Amer. Soc. Hort. Sci.* p139. (abst. no. 599).
- Yang G. & Read P.E. 1992 Pre-forcing treatments influence bud break and shoot elongation in forced woody species. *J. Environ. Hort.* 10, 101-103.
- Yang G. & Read P.E. 1993 *In vitro* culture of Vanhoutte's spirea explants from 'secondary cultures' and dormant stems forced in solutions containing plant growth regulators. *Plant Cell Tissue Organ Cult.* 33, 25-30.
- Yang Z. And Ludders P. (1993) *In vitro* propagation of Pistachio (*Pistacia vera* L.). *Gartenbauwissenschaft* 59 (1): 30-34.
- Zhang Y., Reed D.D., Cattelino P.J., Gale M., Jones E.A., Liechty H.O., Mroz G.D., A process-based growth model for young red pine, *For. Ecol. Manage.* 69 (1994) 21–40.
- Zohary M., 1952. A monographical study of the genus *Pistacia*. *Pal. Jou. Of Bot.*, 5:187-228.

