

Alma Mater Studiorum – Università di Bologna

DOTTORATO DI RICERCA

**COLTURE ARBOREE AGROSISTEMI FORESTALI,
ORNAMENTALI E PAESAGGISTICI**

Ciclo XX

**Settori scientifico disciplinari di afferenza:
AGR03/ AGR05**

**FLUSSI DI CARBONIO IN DUE SISTEMI
ARBOREI DELLA PIANURA PADANA**

Presentata dal Dott. PIETRO PANZACCHI

Coordinatore Dottorato

Prof. Silviero Sansavini

Tutore

Prof. Massimo Tagliavini

Cotutore

Dr. Giustino Tonon

Esame finale anno 2008

INDICE

ALMA MATER STUDIORUM – UNIVERSITÀ DI BOLOGNA	1
DOTTORATO DI RICERCA	1
PARTE GENERALE	4
1. INTRODUZIONE	4
1.1 Cambiamenti climatici e CO ₂ atmosferica	4
1.2 Il ruolo degli ecosistemi terrestri	6
2 METODOLOGIE DI STUDIO DEI FLUSSI DI CARBONIO	10
2.1 Misura dei flussi di carbonio negli ecosistemi	10
2.1.1 Misure micrometeorologiche (<i>Whole-system balance</i>)	11
2.1.2 Misure ecofisiologiche (<i>small chamber enclosures</i>)	13
2.1.3 Approccio del bilancio di massa o dell'allocazione totale ipogea (TBCA)	16
2.2. La respirazione del suolo e le sue componenti.	19
2.2.1 La variabilità spaziale e temporale della respirazione del suolo.	19
2.2.2 La respirazione del suolo e la temperatura	22
2.2.3 La ripartizione della respirazione del suolo	24
PARTE SPERIMENTALE	29
3 SCOPO DELLO STUDIO	29
4 MATERIALI E METODI	33
4.1 Studio relativo ad un ecosistema boschivo (rimboschimento)	33
4.1.1. Descrizione area di studio	33
4.1.2. Ripartizione della respirazione del suolo (R _{soil})	36
4.1.3 Misura dello scambio netto dell'ecosistema (NEE) e dei parametri ambientali.	39
4.1.4. Misura della produttività primaria netta (NPP)	42
4.1.6. Misura della rizodeposizione netta con il metodo isotopico.	46
4.2 Studio relativo ad un ecosistema produttivo arboreo (frutteto)	49
4.2.1. Descrizione area di studio	49
4.2.2. Ripartizione della R _{soil} nelle sue componenti autotrofa ed eterotrofa	51
4.2.3 Misura della NAE e dei parametri ambientali.	53
4.2.4. Misura della produttività primaria netta (NPP)	58
4.2.5. Misura della rizodeposizione netta con il metodo isotopico.	61
5 RISULTATI	62
5.1. Il rimboschimento – Nonantola	62
5.1.1. Caratteristiche climatiche durante il periodo di studio.	62
5.1.2. La respirazione del suolo e le sue componenti	64
5.1.3 Misura dello scambio netto dell'ecosistema (NEE).	69
5.1.4 Misura e ripartizione della produzione primaria netta (NPP).	70
5.2. Il frutteto – Cadriano	72
5.2.1. Caratteristiche climatiche durante il periodo di studio.	72
5.2.2. La respirazione del suolo e le sue componenti	73
5.2.3 Misura dello scambio netto della parte epigea (NAE).	78
5.2.4 Misura e ripartizione della produzione primaria netta (NPP).	79
	2

5.1.5 Stima e ripartizione della NPP tramite l'approccio della TBCA	81
5.1.5 Stima e ripartizione della NPP tramite l'approccio della TBCA	82
6 DISCUSSIONI	84
6.1 Flussi di carbonio nel rimboschimento	84
6.2 Flussi di carbonio nel frutteto.	93
6.3 Confronto dei flussi nei due sistemi	99
7 CONCLUSIONI	102
 BIBLIOGRAFIA	 104

PARTE GENERALE

1. INTRODUZIONE

1.1 Cambiamenti climatici e CO₂ atmosferica

Nelle ultime decadi il ciclo del carbonio (C) ha assunto estrema rilevanza a scala globale a causa dei cambiamenti climatici in atto e del loro sempre più evidente legame con l'emissione di gas serra di origine antropica nell'atmosfera (IPCC 2001). Tra il 1750 (inizio dell'era industriale) e il 2007 la concentrazione dell'anidride carbonica (CO₂) atmosferica è passata da 280 a 385 parti per milione (ppm), ed il tasso

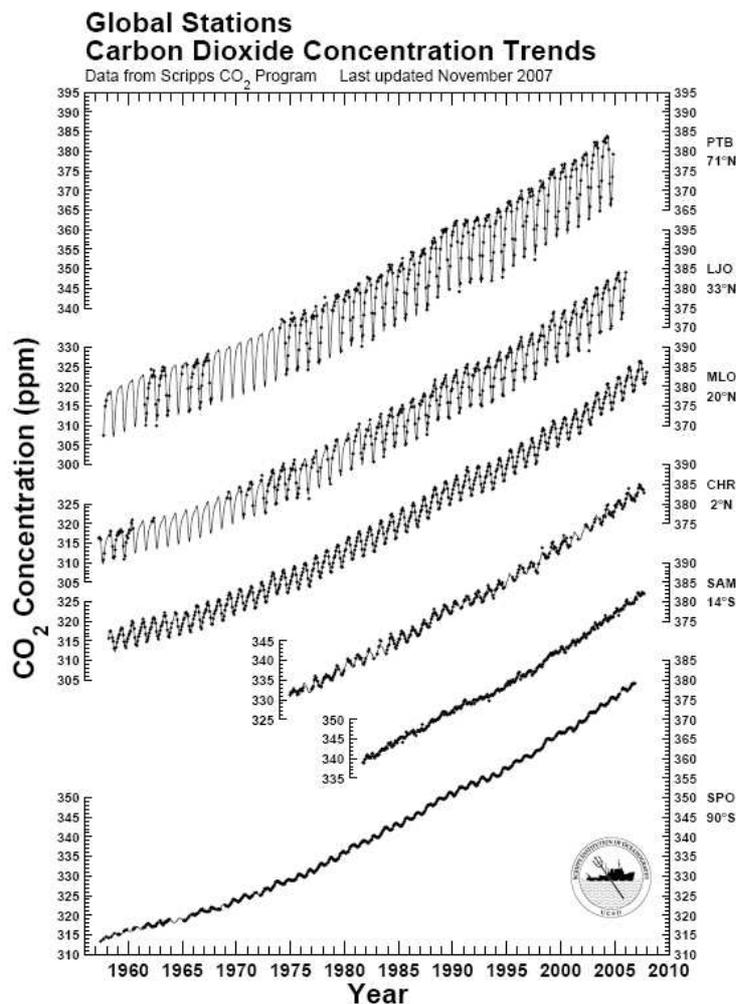


Figura 1 Trend della concentrazione di CO₂ dalla fine degli anni 50 ad oggi in sei stazioni nei due emisferi . PTB = Point Barrow, AK; LJO = La Jolla, CA; MLO = Mauna Loa, HI; CHR = Christmas Island, SAM = Samoa, and SPO = South Pole. Dati dal Scripps CO₂ Program.

attuale di incremento è di 3,2 petagrammi (Pg) di C all'anno (1 Pg = 1 miliardo di tonnellate) (Prentice et al. 2001). Nella figura 1 sono riportati i trend della concentrazione di CO₂ misurati in sei stazioni nei due emisferi dal 1956 (dallo

Scripps CO₂ Program) e aggiornati al

novembre 2007. Si stima che tra il 1850 ed il 1990, l'uomo abbia

prodotto emissioni per 270 ± 30 Pg di C mediante l'utilizzo di combustibili fossili e la produzione di cemento, e che nello stesso periodo, i cambiamenti di uso del suolo abbiano prodotto un flusso di 136 ± 55 Pg di C (Houghton 1999). Contemporaneamente, il mutato *forcing* radiativo provocato dal simultaneo incremento delle concentrazioni di altri gas serra, tra i quali il metano e l'ossido di azoto, ha causato un aumento della temperatura media superficiale terrestre di $0,6$ °C dalla fine del 19° secolo, con un incremento di $0,17$ °C a decade (IPCC 2001) (fig. 2).

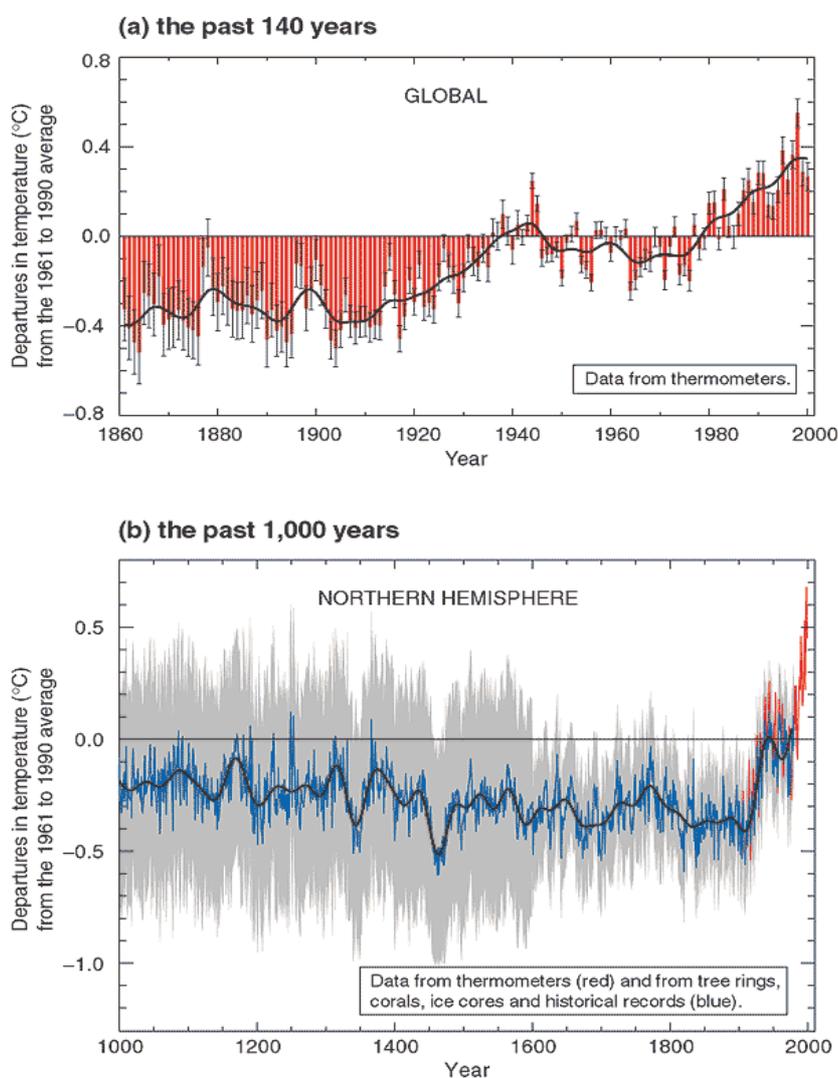


Figura 2 Variazione della temperatura della superficie terrestre negli ultimi 10 anni (a) e nell'ultimo millennio (b). In (a) i dati sono stati registrati dai termometri e si riferiscono alla media per l'intero globo. In (b) sono ottenuti indirettamente da fonti come ampiezza degli anelli legnosi o carote di ghiaccio (linea blu) e da misure con termometri (linea rossa) e si riferiscono al solo emisfero nord. (IPCC 2001).

1.2 Il ruolo degli ecosistemi terrestri

I mutamenti climatici in atto a scala globale finiscono per influenzare i fenomeni di sequestro e di emissione del C negli ecosistemi terrestri. Nel bilancio globale del C infatti questi contano come un *sink* annuo di C pari a 2-2,6 Pg contro i circa 6,6 di emissioni dovute direttamente o indirettamente all'attività dell'uomo (Schimel et al. 2001; Grace 2004; Robinson 2007). Gli ecosistemi vegetali terrestri trasferiscono al suolo 60 dei 120 Pg di C fissati con la fotosintesi, e la maggior parte di questo flusso grezzo avviene nei sistemi arborei (Giardina et al. 2004).

Lo stock di C nel suolo a scala globale, nel primo metro di profondità, è pari a 2500 Pg di cui 1500 di origine organica, una quantità tre volte superiore a quella presente nell'atmosfera (Amundson 2001; Lal 2004a), mentre la respirazione del suolo, stimata a scala globale come un flusso di 75 Pg all'anno (Schlesinger and Andrews 2000), rappresenta il maggiore flusso verso l'atmosfera degli ecosistemi terrestri.

L'aumento della concentrazione dei gas serra nell'atmosfera ha un effetto diretto ed indiretto sulle piante. Crescenti concentrazioni di CO₂ possono stimolare la produttività degli ecosistemi e il flusso di C al suolo (Norby et al. 2002; Giardina et al. 2004). Il riscaldamento della biosfera dovuto all'effetto serra sembra avere una forte influenza sulle piante e i microorganismi del suolo (Pendall et al. 2004). Il contemporaneo e spesso contrastante effetto di diversi fattori sui processi che avvengono nel sistema suolo-pianta rendono difficile prevedere il comportamento degli ecosistemi terrestri.

Ancora incerto risulta essere il ruolo, presente e futuro, del suolo alla luce dei cambiamenti in atto e segnatamente del riscaldamento globale. Alcuni studi suggeriscono che a fronte dell'incremento di produzione primaria netta (**PPN**), legato all'aumento di CO₂ atmosferica e alle maggiori temperature, possa verificarsi un aumento più che

proporzionale del tasso di decomposizione della sostanza organica del suolo (**SOM**), regolato primariamente dalla temperatura oltre che dalla disponibilità idrica (Knorr et al. 2005). Date le ingenti quantità di C in gioco, a lungo termine si potrebbe innescare quindi un *feedback* positivo. La trasformazione degli ecosistemi terrestri, fattispecie di quelli forestali dell'emisfero settentrionale, da depositi (*sink*) (Schimel et al. 2001) a sorgenti (*source*) è un'eventualità che dipende in gran parte dalla risposta della SOM alla risultante dei cambiamenti climatici (Grace and Rayment 2000).

La risposta del processo di mineralizzazione del C organico del suolo (**SOC**) non è sempre direttamente legata all'aumento della temperatura, essendo molteplici i fattori che lo influenzano (Giardina e Ryan 2000). La ricchezza del pool più facilmente degradabile tra quelli della SOC, sembra infatti determinare la sensitività della R_s alla temperatura (Davidson et al. 2000; Melillo et al. 2002).

L'estrema complessità di una previsione a scala globale del comportamento degli ecosistemi terrestri è confermata da due recenti lavori che hanno avuto una discreta risonanza. Bellamy et al. (2005) hanno registrato tra il 1978 e il 2003 una perdita annua media di C nei suoli inglesi e gallesi dello 0,6 %. D'altra parte Zhou et al. (2006) hanno misurato, nell'arco di 25 anni, un tasso di accumulo di C nei primi 20 cm di suolo pari 0,61 tonnellate ettaro l'anno ($t\ ha^{-1}\ a^{-1}$) in foreste mature nel sud della Cina, ecosistemi considerati in equilibrio per quanto riguarda il ciclo del C.

Queste problematiche sono assai sentite a livello mondiale (IPCC, 2001) ed europeo (Smith, 2004; Freibauer et al. 2004) ed i modelli previsionali indicano che, sebbene il potenziale di sottrazione di carbonio da parte del suolo e della vegetazione non sia da solo in grado di compensare gli aumenti delle emissioni, la capacità di accumulo di C nella biosfera nei prossimi 20-30 anni è vista come una misura essenziale per poter mitigare gli aumenti di temperatura e poter stabilizzare le emissioni (Smith, 2004).

Stime recenti (Janssens et al. 2003b) indicano che nell'attuale gestione, le terre emerse del continente europeo sono in grado di assorbire dal 7% al 12 % delle emissioni antropogene di CO₂. Tuttavia, se in Europa le foreste e gli ecosistemi di tipo sodivo (prati) sono in grado di fissare circa 0,48 Pg di C per anno, le colture agrarie annullano in parte questo beneficio e si stima emettano 0,3 Pg C anno⁻¹ (Janssens et al. 2003b). A livello mondiale si ritiene che circa un 20% dell'incremento di gas serra sia infatti dovuto all'agricoltura nel suo insieme (Reicosky et al. 2000).

Nel protocollo di Kyoto è stato sancito l'impegno a ridurre le emissioni di CO₂ o ad aumentare la sua sottrazione da parte di ecosistemi vegetali, nonché a monitorare i flussi di gas serra. Sebbene gli ecosistemi arborei abbiano una durata inferiore a quelli forestali e non coprano il suolo permanentemente, essi possiedono un potenziale di fissazione del carbonio, sia nella componente vegetale che in quella suolo, in gran parte inesplorato (Robertson et al. 2000) benché probabilmente superiore a quello dei sistemi agrari erbacei annuali.

Nel caso degli impianti arborei, la possibilità di non lavorare il suolo e la presenza di specie erbacee che costituiscono l'inerbimento dell'interfila (che accumulano nel terreno gran parte del carbonio fissato con la fotosintesi), insieme al carattere di poliennalità della coltura, costituiscono potenziali vantaggi in termini di fissazione netta del C nel sistema.

Studi a livello di ecosistema (Robertson et al., 2000) indicano che sebbene siano soprattutto sistemi vegetali giovani, tra cui quelli agrari, permanentemente mantenuti negli stadi iniziali delle successioni ecologiche, quelli in cui il divario tra fissazione di carbonio e respirazione autotrofa è maggiore, il bilancio netto del C è positivo solo quando il suolo viene lasciato indisturbato (non lavorato). Nei frutteti, l'adozione dell'inerbimento di una porzione di suolo aumenta la produttività primaria netta del sistema e determina accumuli di carbonio organico nel suolo (Coupland e Van Dyne 1976). Quindi, l'arboreto così

condotto può essere considerato un sistema misto "coltura arborea-prato" e può beneficiare delle caratteristiche di forte accumulatore di sostanza organica tipica dei sistemi agrari di tipo sodivo.

Le colture arboree permanenti, se hanno un'importanza relativa nel centro-nord Europa, sono sistemi agrari di grande importanza economica per l'Italia ed in generale per l'area mediterranea (Olesen e Bindi 2002), dove rappresentano il 16% dei terreni destinati all'agricoltura (dati FAO, 1998).

Determinare le capacità di un ecosistema di accumulare C in forme a lento turnover , e studiarne le dinamiche regolate dai fattori climatici quali la temperatura e l'umidità diventano quindi passaggi chiave nella previsione della risposta degli ecosistemi terrestri ai cambiamenti climatici.

2 METODOLOGIE DI STUDIO DEI FLUSSI DI CARBONIO

2.1 Misura dei flussi di carbonio negli ecosistemi

Lo studio dei flussi di C in ecosistemi produttivi, ovvero gli scambi di CO₂ tra l'atmosfera e la biosfera, dovuti sostanzialmente ai processi di fotosintesi della componente vegetale e di respirazione autotrofa ed eterotrofa, può essere ricondotto a due approcci metodologici fondamentali (Aber e Melillo 2001). Entrambi hanno come obiettivo la stima del bilancio del C tra ecosistema ed atmosfera, il quale per definizione è la produttività netta dell'ecosistema (NEP, *Net Ecosystem Productivity*) e che può essere positivo, caratterizzando l'ecosistema come deposito di C (*sink*), oppure essere negativo, classificandolo come fonte di C (*source*). In ecosistemi produttivi bisogna considerare anche le perdite di carbonio attraverso l'asportazione del raccolto e dell'eventuale legno di potatura se allontanato nel caso del frutteto, oppure la provvigione legnosa tagliata e la il CO₂ persa a causa del fuoco nel caso dei boschi. In questo caso si parla di produttività netta del bioma (NBP, *Net Primary Biome Productivity*). I due diversi approcci di misura citati da Aber e Melillo (2001) sono quello delle misure micrometeorologiche (*Whole-system balance*) e quello delle misure ecofisiologiche (*Small chamber enclosures*).

Usando il primo approccio si è in grado di stabilire la NEP dell'ecosistema, senza però poter differenziare i singoli apporti da parte delle diverse componenti che lo formano. Con il secondo si analizzano separatamente le singole componenti che contribuiscono al bilancio. La sommatoria dei singoli flussi (tutte le perdite di carbonio), sottratta al valore della fotosintesi lorda (PPL) consente di ottenere il bilancio del carbonio del frutteto.

2.1.1 Misure micrometeorologiche (*Whole-system balance*)

Questo tipo di metodo utilizza un modello concettualmente abbastanza semplice, dato che non prevede che sia necessario conoscere le singole fonti che producono CO₂ attraverso processi respiratori, ma è sufficiente stabilire gli scambi totali di CO₂ tra ecosistema ed atmosfera, nella zona che delimita i due sistemi (fig 3).

a) *Il cilindro gigante*

Una porzione dell'ecosistema oggetto di studio viene delimitata da un cilindro trasparente, aperto verso l'alto. Con l'aiuto di aspiratori, incorporati nella porzione basale della parete del cilindro e muniti di sensori per la CO₂, l'aria contenuta al suo interno, viene continuamente scambiata tra ecosistema e atmosfera ed analizzata per il suo contenuto in CO₂. Al centro del cilindro vi sono, a diverse altezze, dei sensori che misurano la concentrazione di CO₂ in entrata, la temperatura e l'umidità. Questo metodo è stato usato come primo approccio per misurare il bilancio del carbonio di un intero ecosistema nella foresta tropicale di "El Verde" di Porto Rico. Il limite di questo metodo, oltre alla costosità, risiede nell'alterazione del sistema, dato che la presenza del cilindro di plastica in cui si trova l'intero o parte dell'ecosistema, modifica la temperatura, la velocità del vento, l'umidità e inoltre possono essere modificate direttamente le concentrazioni di CO₂ e di O₂.

b) *Aerodynamic analysis of the boundary layer*

Usando questo metodo di approccio, le condizioni ambientali dell'ecosistema oggetto di studio non vengono minimamente modificate e quindi possono essere evitati problemi di alterazioni. Il metodo consiste nel misurare contemporaneamente la concentrazione di CO₂ dell'aria a diverse altezze dal suolo (fino a ca. 6-7 m) in modo continuo e con una certa frequenza. Accanto alle misure di concentrazione

devono essere rilevati i parametri di temperatura, umidità, nonché direzione e velocità del vento. Combinando questi dati si ottiene una stima del flusso di CO₂. Questo metodo è stato usato per studiare il bilancio di carbonio in una prateria in Sasdatchewan. (Aber e Melillo 2001)

c) Metodo dell'Eddy Covariance

Questo metodo è di più recente introduzione ed applicazione e ha rivoluzionato la misura del bilancio del carbonio a livello dell'intero ecosistema. Il metodo prevede l'uso della tecnica detta della "correlazione turbolenta", che serve a misurare direttamente lo scambio netto di CO₂ (NEE, Net), ma anche di vapore acqueo e di calore, che avviene tra la superficie terrestre e l'atmosfera.

Il metodo si basa sulla misura ad elevata frequenza (6 volte al secondo) della concentrazione di CO₂ dell'aria a diverse altezze dal suolo e della velocità verticale del vento (W) (fig. 4). La correlazione fra W e la concentrazione istantanea è di per sé una misura del trasporto turbolento che è alla base dello scambio gassoso che avviene fra copertura vegetale e atmosfera. Il principio è che se la vegetazione, e quindi l'ecosistema, assorbe CO₂, l'aria che sale verso l'alto (W positivo) deve essere più povera in CO₂ di quella che scende (W negativo). L'opposto avviene quando l'ecosistema "respira" emettendo più CO₂ di quanto non ne assorba.

La strumentazione necessaria per questo tipo di misure è costituita da una torre che sovrasta la chioma delle piante, sulla quale viene collocato un anemometro sonico in grado di misurare simultaneamente velocità e direzione del vento. Alla stessa altezza viene posizionato un tubo di plastica che cattura campioni di aria e li convoglia ad un analizzatore di gas, che misura la sua concentrazione in CO₂ con una frequenza di 6 volte al secondo.

Tutti i modelli sopra descritti permettono di stimare la fotosintesi lorda dell'ecosistema (GPP, *gross primary production*), attraverso la separazione delle misure effettuate durante il giorno e la notte. La respirazione, ovvero la produzione di CO₂, avviene ad opera delle piante, degli animali e da parte del suolo. Queste diverse fonti di CO₂ non possono essere separate e distintamente quantificate con il metodo di rilievo micrometeorologico. Dato che i processi di fotosintesi sono svolti solamente dalla componente vegetale e durante le ore di luce, è possibile definire un modello che separi i due processi (fotosintesi e respirazione). Si può stimare la fotosintesi lorda (GPP) delle piante usando l'equazione:

$$GPP = NEE + RE \quad (1)$$

dove ER (*Ecosystem Respiration*) è la somma della respirazione delle piante, animali e suolo.

2.1.2 Misure ecofisiologiche (*small chamber enclosures*)

Anche questo approccio ha l'obiettivo di stimare lo scambio netto di CO₂ (NEE) tra l'ecosistema e l'atmosfera. Si tratta però di un modello più complesso e meno preciso, dato che la stima della NEE viene ottenuta attraverso la misura dei singoli flussi, in entrata ed in uscita, dei comparti costituenti il sistema (fig. 5).

La fotosintesi lorda delle piante viene stimata attraverso l'equazione:

$$GPP = (-NEE) + R_{\text{leaf}} + R_{\text{wood}} + R_{\text{soil}} \quad (2)$$

Dove R_{leaf}, R_{wood} e R_{soil} sono rispettivamente la respirazione delle foglie, delle parti legnose e del suolo.

Il modello separa le componenti del sistema che contribuiscono con maggior peso al flusso totale di carbonio. Per un ecosistema terrestre questo significa misurare i flussi prodotti dalle foglie (fotosintesi e respirazione), dalle restanti parti epigee non fogliari delle piante ed i flussi prodotti dal suolo.

Questo tipo di approccio è più complesso dell'approccio micrometeorologico, ma rispetto ad esso, permette di valutare l'importanza dei singoli processi respiratori (R_{leaf} , R_{wood} , R_{soil}) e in che misura essi contribuiscono al flusso totale di carbonio. Inoltre, questo metodo funge da controllo per valutare l'accuratezza dei metodi micrometeorologici rispetto a quelli ecofisiologici.

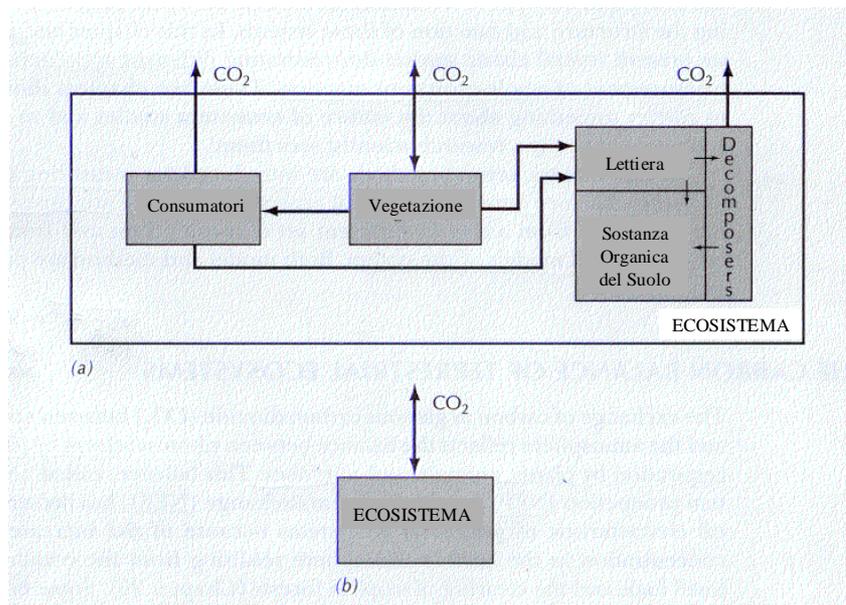


Figura 3 Nel modello (a) sono riportate le componenti di un ecosistema terrestre, gli scambi di CO₂ con l'atmosfera e le interazioni che avvengono tra i vari comparti all'interno dell'ecosistema. Il modello (b) è una esemplificazione del modello concettuale adottato negli studi sul bilancio del carbonio condotti usando le misure micrometeorologiche (*Whole-system balance*) (modificato da Aber e Melillo, 2001).

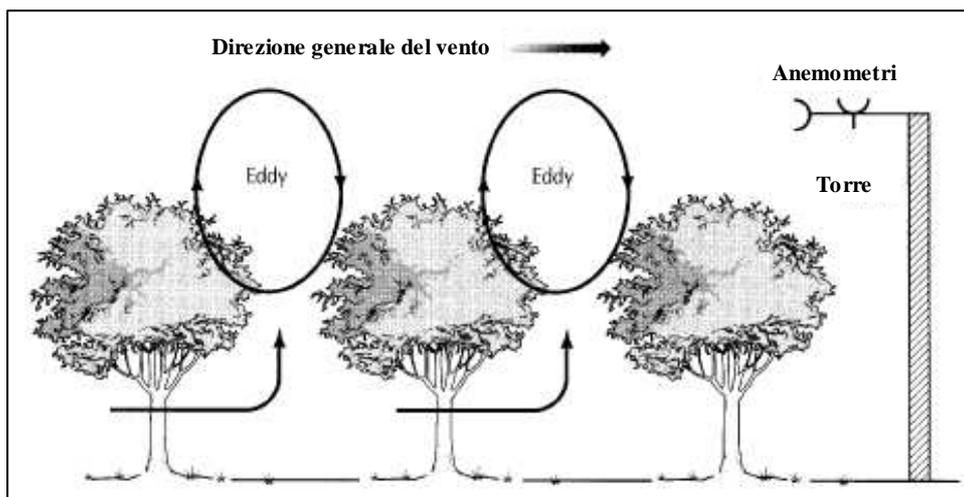


Figura 4 Schema dell'approccio alle misure di "Eddy covariance" (modificato da Aber e Melillo, 2001)

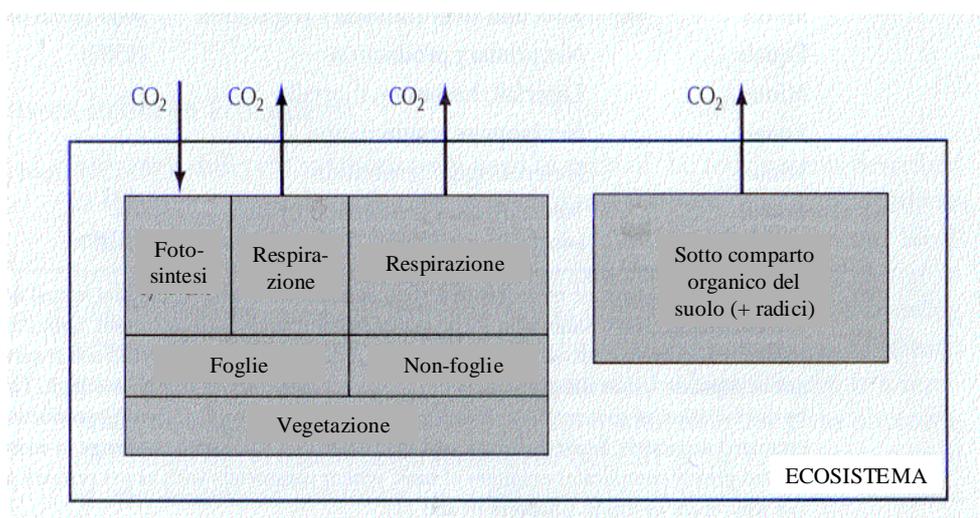


Figura 5 Modello delle misure ecofisiologiche per lo studio del bilancio di carbonio in ecosistemi terrestri. Modificato da Aber e Melillo (2001).

2.1.3 Approccio del bilancio di massa o dell'allocazione totale ipogea (TBCA)

L'allocazione totale ipogea di carbonio (TBCA, *Total Belowground Carbon Allocation*) è definita come il carbonio allocato al sottosuolo dalle piante per produrre radici grosse e fini, respirazione radicale, essudati radicali e micorrize (Giardina et al. 2004). Questa può rappresentare una grossa parte della produzione primaria lorda (GPP) o fino a superare la produzione primaria netta (NPP) (Giardina et al. 2004).

Raich e Nadelhoffer (1989) hanno proposto approccio di bilancio di massa per stimare TBCA a scala annuale. Le piante allocano C fissato con la fotosintesi alle radici. Questo C può essere respirato dalle radici e dai microrganismi, quindi misurato come flusso totale di CO₂ dal suolo (R_{soil}), o immagazzinato nel suolo in varie forme: come SOM, come strato di lettiera indecomposta, come radici vive e morte. Se la quantità di C immagazzinato nel suolo non cambia nell'arco dell'anno oggetto di studio, e le perdite per lisciviazione o erosione sono trascurabili, allora vige la conservazione della massa (vale a dire che ogni incremento di SOC viene bilanciato dalla decomposizione della SOM più vecchia) e TBCA deve essere uguale a R_{soil} meno gli input di C dalla lettiera epigea ($Litter_{leaf}$):

$$TBCA = R_{soil} - Litter_{leaf} \quad (3)$$

Pur basandosi sull'assunzione dello stato di equilibrio, il quale va certamente verificato, la semplicità di questo metodo, che richiede la misura di soli due flussi misurabili con poche incertezze, lo rende uno strumento non invasivo e non perturbativo importantissimo per stimare il flusso totale alle radici.

Giardina e Ryan (2002) hanno proposto un'estensione di questo approccio, per altro già suggerita da Nadelhoffer et al. (1998) dieci anni

dopo la prima formulazione, per superare le limitazioni imposte dall'assunzione dello stato di equilibrio degli stocks di C su cui si basa l'eq. (3), hanno proposto un approccio simile che tenesse conto degli incrementi di C nel sottosuolo e sul terreno:

$$TBCA = R_{soil} - Litter_{leaf} + \Delta soilC + \Delta C_{root} + \Delta litter C \quad (4)$$

in cui compaiono nel bilancio anche l'incremento di C organico nel suolo minerale ($\Delta soilC$), l'incremento di carbonio nelle radici, sia grosse che fini, (ΔC_{root}) e ($\Delta litter C$) l'incremento di C nello strato di lettiera.(fig. 7) Anche questo approccio richiede che le perdite per lisciviazione o erosione siano trascurabili.

Di per se però questo approccio non permette di stimare la produzione primaria netta ipogea (BNPP) e quindi di chiudere l'inventario della NPP. Tuttavia, trasformando la eq. (4) con il bilancio delle radici:

$$R_r + Litter_{root} + \Delta C_{root} = TBCA = R_{soil} - Litter_{leaf} + \Delta litterC + \Delta soilC + \Delta c_{root} \quad (5)$$

in cui $Litter_{root}$ è la lettiera radicale e R_r la respirazione radicale, stimata con il metodo del *trenching* .

Risolvendo per $Litter_{root}$ si ottiene la (6)

$$Litter_{root} = R_{soil} - R_r - Litter_{leaf} + \Delta litterC + \Delta soilC \quad (6)$$

ΔC_{root} essendo da entrambe le parti nell'equazione, si semplifica.

Per cui noti gli incrementi di C nel suolo e nella lettiera epigea, nota la lettiera aerea e stimate le componenti della respirazione del suolo, posso misurarmi l'input di lettiera radicale.

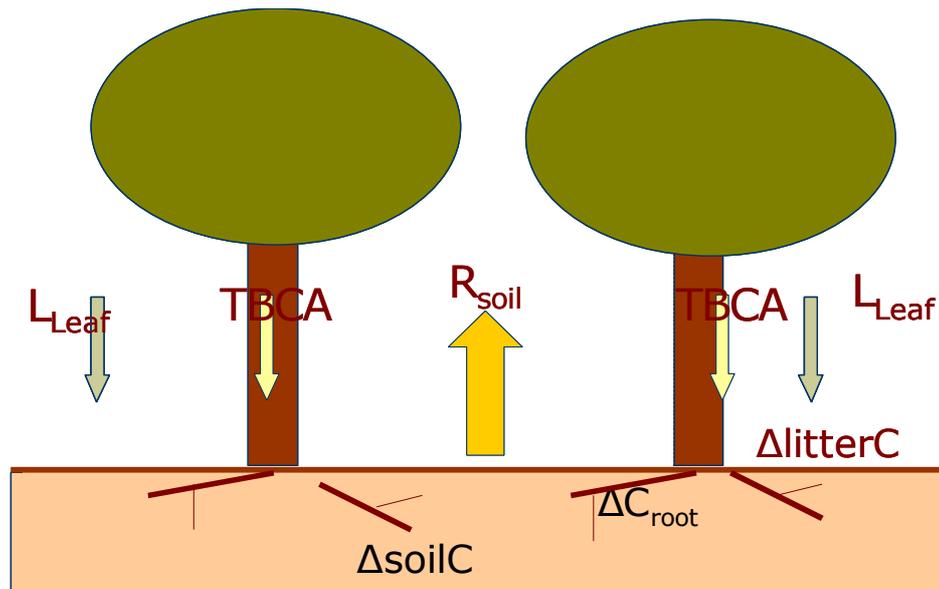


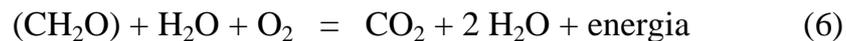
Figura 6 Schema concettuale dell'approccio TBCA per ecosistemi lontani dall'equilibrio per quanto riguarda gli *stocks* di carbonio. L_{leaf} = lettiera aerea; $\Delta soilC$ = incremento di C nel suolo ΔC_{root} = incremento di C nelle radici; $\Delta litter C$ = accumulo di lettiera al suolo; R_{soil} = respirazione del suolo.

2.2. La respirazione del suolo e le sue componenti.

2.2.1 La variabilità spaziale e temporale della respirazione del suolo.

La respirazione aerobica in generale è un processo esoergonico, nel quale l'energia presente nei legami chimici dei composti organici (CH_2O), immagazzinata tramite i processi di fotosintesi, viene resa disponibile per lo svolgimento dei processi fisiologici di piante, animali e microrganismi.

Per mezzo della respirazione aerobica il carbonio presente nel substrato organico viene ossidato a CO_2 , mentre l'ossigeno viene ridotto ad H_2O , liberando così l'energia contenuta nei legami chimici.



Il flusso di CO_2 dal suolo, è una delle maggiori componenti che caratterizzano il ciclo del carbonio in ecosistemi terrestri e a livello globale è stimato pari a circa 50 - 75 Gt C anno⁻¹, contribuendo quindi per il 20 - 40% al flusso totale di CO_2 , che dagli ecosistemi terrestri passa all'atmosfera (Raich e Schlesinger 1992; Schimel 1995). La quantità di CO_2 rilasciata all'atmosfera attraverso la respirazione dell'ecosistema è simile ai valori di produzione primaria netta (PPN) degli ecosistemi stessi (Schlesinger e Andrews 2000), risultando quindi di elevata importanza nel calcolo del bilancio del carbonio di un ecosistema

Il flusso di CO_2 prodotto dal suolo ha origine da fonti diverse, tra cui le due principali sono (1) la respirazione eterotrofa, a carico dei microrganismi che decompongono la sostanza organica del suolo (SOM), che a sua volta può essere scomposta in lettiera fresca e sostanza organica nativa del suolo e (2) la respirazione autotrofa, a carico delle radici (fig. 7). A queste si possono aggiungere anche le fonti

di CO₂ relative ai processi chimici di ossidazione e di dissoluzione dei carbonati (Burton e Beauchamp, 1994).

Il flusso di CO₂ dal suolo è molto eterogeneo, sia a scala spaziale che temporale. Ciò è in larga parte dovuto alla stessa eterogeneità della struttura del suolo, della temperatura, dell'umidità, della densità di colonie batteriche e funghi e della densità radicale, nonché della presenza di sostanza organica nel suolo. Bisogna considerare inoltre la variabilità della diffusione della CO₂ nel suolo, che è influenzata sia da gradienti di concentrazione, come anche dal variare della pressione atmosferica.

La misura del flusso di CO₂ dal suolo effettuata ad intervalli orari o giornalieri mostra una buona correlazione con la temperatura del suolo e/o con il suo contenuto in umidità (Janssens et al. 2000), quando questa non è limitata da situazioni di umidità troppo bassa o troppo elevata. Infatti, nel caso di disponibilità limitata di acqua, vengono ad essere meno disponibili le forme disciolte di carbonio (DOC, *dissolved organic carbon*), che altrimenti rappresentano un substrato importantissimo per la respirazione eterotrofa del suolo (Billings et al. 1998). Mentre in condizioni di saturazione idrica, il fattore limitante è la scarsa aerazione che viene a crearsi nel suolo (Freijer e Leffelaar, 1996).

I processi di respirazione da parte della componente eterotrofa del suolo, sono principalmente legati alla temperatura e all'umidità, ma vengono anche influenzati dalla qualità del substrato presente, espressa come concentrazione di lignina ed azoto (Ågren e Bosatta 1996; Ryan et al. 1997).

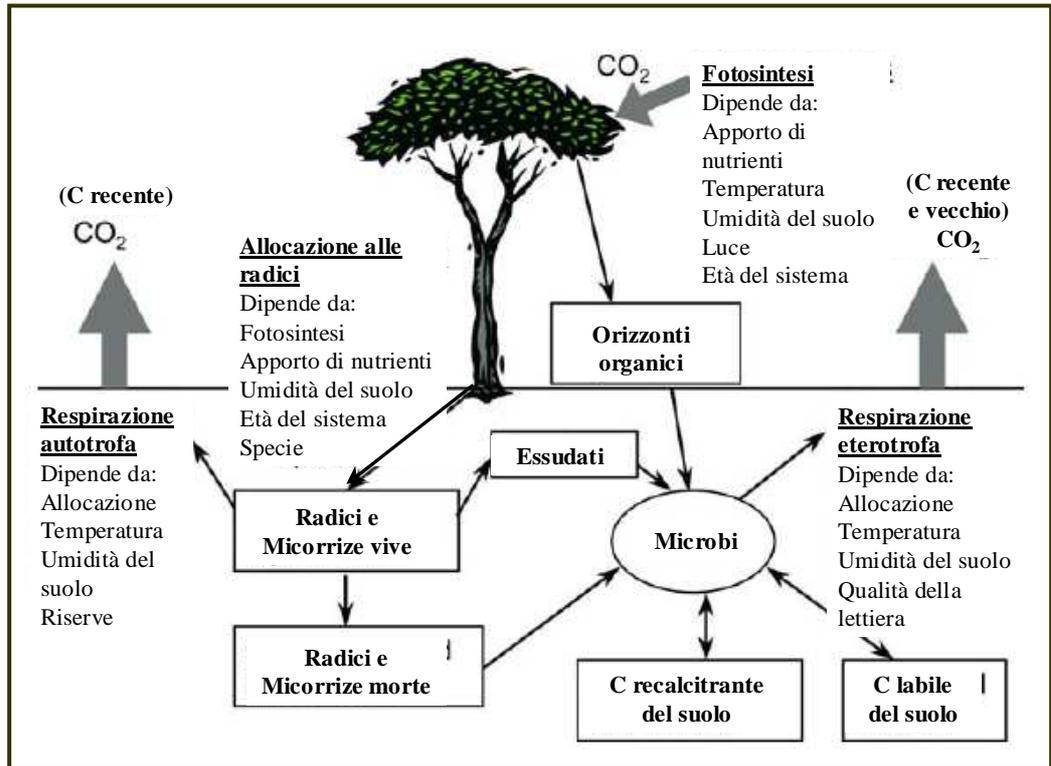


Figura 7 Modello concettuale che propone le componenti i flussi di CO₂ dal suolo e i fattori che le influenzano. La respirazione autotrofa e quella eterotrofa sono fortemente influenzate dalla disponibilità di substrati (trasporto floematico di carboidrati verso le radici e disponibilità di sostanza organica da degradare per i microrganismi) (modificato da Ryan et al., 2005)

2.2.2 La respirazione del suolo e la temperatura

La relazione esistente tra flusso di CO₂ e temperatura può essere descritta da differenti tipi di modelli: lineari, esponenziali, sigmoidi. Tra gli studiosi non vi è un consenso unanime sul tipo di relazione da utilizzare (Lloyd e Taylor, 1994), tuttavia i modelli di tipo esponenziale (ad esempio il modello Q₁₀ o quello esponenziale semplice) sono utilizzati di frequente, sia per la semplicità di formulazione e applicazione sia perché generalmente riescono a spiegare un'elevata percentuale della variabilità osservata (Buchmann 2000; Rey et al. 2002). Da un confronto sull'effetto dell'utilizzo di funzioni diverse nella stima del flusso annuale è emerso che le differenze sono minime (Janssens et al., 2003).

La sensitività della respirazione al variare della temperatura viene generalmente espressa attraverso il parametro Q₁₀, dato dal rapporto tra la respirazione del suolo a una temperatura di riferimento (T) e la respirazione a una temperatura inferiore di 10° C (T-10). Generalmente per le reazioni chimiche che avvengono a temperatura prossima a quella ambiente tale parametro è uguale a 2 (legge di van't Hoff, 1898), ovvero la velocità specifica di reazione raddoppia all'aumentare di 10° C della temperatura (Salisbury e Ross, 1999). A questo proposito, tra i numerosi modelli utilizzati per la perequazione dei dati di flusso e temperatura possiamo distinguere quelli a Q₁₀ costante, ovvero modelli a curvatura costante in tutto l'intervallo di temperatura, e modelli a Q₁₀ variabile al variare dell'intervallo di temperatura a cui viene calcolato (Fang e Moncrieff, 2001). Dal confronto tra il Q₁₀ della respirazione ricavato per differenti ecosistemi è stato osservato che questo tende a diminuire all'aumentare della temperatura (Janssens et al. 2003). Pertanto gli ecosistemi delle regioni più fredde del globo (che presentano Q₁₀ più elevati) potrebbero essere maggiormente soggetti a perdite di carbonio in seguito ad un riscaldamento del pianeta (Kirschbaum, 1995).

La respirazione è un processo metabolico relativamente conservativo con un Q_{10} ben preciso che di solito varia tra 1.8 e 2.4, tuttavia in letteratura vengono riportati anche valori superiori a 10 (Raich e Schlesinger, 1992). Quando il Q_{10} è calcolato da una serie di misure eseguite in un arco temporale in cui la temperatura varia (ad esempio nell'arco di un anno), il calore ricavato può derivare da una risposta combinata (moltiplicativa) dei microrganismi e delle radici fini alla temperatura. Ad esempio durante il periodo primaverile, al crescere della temperatura aumentano sia il tasso di respirazione che la biomassa dei microrganismi; pertanto se entrambi i fenomeni hanno un Q_{10} di 2, il Q_{10} risultante ricavato sarà 4, (Rey et al., 2002). L'utilizzo di modelli a Q_{10} costante per il calcolo del flusso annuale è stato recentemente criticato in quanto tenderebbero a sottostimare i flussi alle basse temperature e a sovrastimare quelli alle alte temperature. Più appropriate sarebbero invece le funzioni a Q_{10} variabile in cui l'energia di attivazione diminuisce all'aumentare della temperatura (Lloyd e Taylor, 1994).

2.2.3 La ripartizione della respirazione del suolo

Kuzyakov (2006) suggerisce cinque principali sorgenti del flusso di CO₂ dal suolo:

1. la decomposizione microbica della SOM in suolo privo di radici o di lettiera fresca di alcun tipo, la cosiddetta “respirazione basale”
2. la decomposizione microbica della SOM in suolo contenente radici o residui vegetali, riferendosi al cosiddetto “*priming effect*”¹
3. la decomposizione microbica della lettiera vegetale
4. la respirazione microbica dei rizodeposti radicali (respirazione rizomicrobica)
5. la respirazione radicale vera e propria.

Egli, come numerosi altri autori considera marginale il contributo dell'acidificazione dei carbonati, presenti nella matrice inorganica del suolo, in studi che hanno una scala che va dai giorni alle decine di anni. In realtà molto comunemente le componenti 2-5) vengono stimate insieme come respirazione rizosferica a causa dei non chiari limiti tra le componenti e la chiara dipendenza delle 2,3 e 4 dall'attività delle radici. La divisione delle singole componenti è comunque molto difficile da ottenere se non a seguito di forti perturbazioni del sistema quando non ancora raggiungibile (come nel caso della separazione della 4 dalla 5) e la maggior parte dei metodi di separazione finisce per accoppiare due o più componenti. Hogberg et al. (2006) considerano più importante da 1 punto di vista dello studio degli ecosistemi, arrivare ad una divisione della 1 e della 3, che hanno tempi di turnover del C di alcuni mesi o anni, dalla 4 e dalla 5 con tempi di turnover di pochi giorni.

Subke et al. (2006) riassumono a 4 i metodi principali di ripartizione del flusso in uscita dal suolo: (1) esclusione radicale, (2)

¹ L'effetto di *Priming* consiste nello stimolo alla degradazione della SOM da parte dei microorganismi dovuto all'apporto di substrati freschi altamente energetici.

separazione fisica delle componenti, (3) tecniche isotopiche e (4) metodi indiretti.

Esclusione radicale

Questa categoria comprende i metodi che stimano la respirazione “radicale” (R_r) misurando la respirazione del suolo con e senza radici e ricavandola per differenza.

Trenching

Utilizzata in passato solo in foresta, questa tecnica consiste nel tranciare tutte le radici ai bordi di un plot trattato in modo da interrompere tutti gli input sotterranei dalle piante. Per questo motivo la rinnovazione se presente va rimossa. La trincea deve superare la profondità degli strati interessati dalla presenza della maggior parte delle radici. Quindi la ricrescita viene impedita mediante l'apposizione di una barriera impenetrabile alle radici (tessuto non tessuto, pellicola di polietilene ecc.). il maggior pregio di questo metodo è quello di lasciare intatto il profilo del suolo e quindi non cambiare le condizioni fisiche del sistema suolo pianta. I limiti maggiori del metodo dipendono dal surplus di lettiera radicale che si verifica nel plot trattato, e nel generalmente riportato aumento di umidità dovuto alla mancata suzione radicale (Hanson et al. 2000; Subke et al. 2006). La mancanza di radici vivi comporta anche il mancato effetto “*priming*” da parte della rizosfera (Kuzyakov 2006).

Girdling

Anche questa tecnica è stata applicata solo in foresta. Consiste nella cercinatura, ovvero nella rimozione di una striscia di corteccia di parecchi centimetri di altezza attorno alla circonferenza dei tronchi di tutte le piante presenti nel plot trattato. Questo metodo permette alle piante di mantenere attivo il trasporto di acqua verso le chiome nello xilema, interrompendo allo stesso tempo il flusso di assimilati dalle

chiome verso le radici attraverso il floema, in quanto il cambio viene rimosso con la corteccia. Questo metodo rispetto al *trenching* ha il vantaggio di non modificare l'umidità del suolo, per il resto comporta riduzione dell'effetto *priming* a causa della mancata rizodeposizione (Subke et al. 2004) e nel secondo anno presenta lo stesso effetto di surplus di lettiera radicale del *trenching* (Bhupinderpal-Singh et al. 2003). Inoltre non dovrebbe essere usato con specie ricche di carboidrati non strutturali nelle radici grosse, perché se no la pianta attinge a quelli per far fronte al mancato afflusso dal floema (Hogberg et al. 2006).

Formazione di gap

La respirazione del suolo misurata sotto copertura viene confrontata con quella misurata nelle radure, per esempio nelle tagliate a raso dopo l'utilizzazione. Questo è probabilmente il più afflitto da perturbazioni dei metodi di esclusione radicale a causa del drastico cambiamento di clima tra la tagliata e il bosco, a partire dal bilancio radiativo della superficie del suolo e conseguenti fluttuazioni giornaliere della temperatura, poi presenta gli altri inconvenienti descritti per il *trenching* (Subke et al. 2006)

Separazione fisica delle componenti

Component integration

Prevede la separazione fisica delle componenti che contribuiscono al flusso di CO₂ dal suolo (radici, suolo setacciato e lettiera), seguito dalla misura del flusso di ognuna di esse, incubata separatamente a temperatura standard.. Il flusso di ogni componente viene quindi moltiplicato per la loro importanza spaziale, cioè per lo spazio relativo occupato, in modo da integrare il flusso sommando i vari contributi. Il limite sta nella perturbazione che segue alla separazione delle componenti, per cui i singoli flussi misurati possono essere diversi da quelli in campo (Hanson et al. 2000). Il disturbo è tanto maggiore perché viene a mancare la naturale aggregazione del suolo, il cui

setacciamento comporta il rimescolamento di pool di decompositori caratterizzati da diversa attività. Infine l'errore che si compie deriva dalla somma degli errori fatti nello stimare ogni contributo (Subke et al. 2006).

Respirazione di radici recise

Questa tecnica consiste nel misurare il flusso di CO_2 prodotta da radici appena tagliate. Queste devono essere prima separate dalle particelle di suolo e mantenute umide. Il valore di flusso viene poi riportato all'unità di superficie moltiplicandolo per la densità radicale dell'area e rapportato al flusso totale che viene invece misurato in campo con camerette di respirazione. Quindi ogni errore derivante dalla perturbazione, riguarda la sola misura della respirazione radicale. (Subke et al. 2006)

Respirazione di radici vive

Si scavano con cura delle porzioni di radici, comprese quelle fini, e le si chiudono in una cuvette per misurarne il flusso direttamente. Analogamente al metodo precedente i valori vengono poi moltiplicati per la densità radicale per riportarle alle unità di superficie, e confrontati con il flusso totale.

Tecniche isotopiche

Marchatura isotopica

Applicazione di fumigazioni con CO_2 arricchita con ^{13}C per creare una differenza di $\delta^{13}\text{C}$ tra la sorgente radicale e il suolo e la SOM. Oppure sfruttando trapianti di piante C4 in suoli C3, o viceversa, e campionando quindi il flusso di CO_2 per studiarne il $\delta^{13}\text{C}$. Questi metodi sono tra i meno intrusivi di tutti e quindi raccomandabili. Tuttavia la fumigazione con CO_2 comporta anche un effetto di fertilizzazione che si manifesta con un'augmentata allocazione alle radici e rizodeposizione, per cui con

un stimolo dell'effetto *priming*, alla lunga poi il suolo comincia ad arricchirsi di SOM marcata per cui la differenza in $\delta^{13}\text{C}$ cala (Subke et al. 2006).

Radiocarbon

Il tempo di decadimento del ^{14}C consente la datazione della sostanza organica, in quanto il suo $\delta^{14}\text{C}$ riflette quello dell'atmosfera quando è stata assimilata fotosinteticamente. Le sperimentazioni di armi nucleari degli anni 50 hanno fatto culminare la concentrazione di questo isotopo radioattivo negli anni 50-60, e ciò permette di poter datare con facilità la CO_2 derivante dalla decomposizione della SOM e determinare quindi la componente "eterotrofa" del flusso. L'inconveniente è che non si determina il contributo della sostanza organica di recente sintesi (meno di un anno) per cui la stima di delle due componenti è abbastanza grezza (Subke et al. 2006).

Metodi indiretti

Metodo della regressione

La respirazione del suolo in un sito viene correlata con la biomassa radicale nello stesso posto. La variazione nel flusso, viene quindi a dipendere dalla densità di radici (fini o totale) e l'intercetta sull'asse delle ordinate della retta di regressione, l'ipotetico punto a biomassa radicale zero, dalla porzione del solo flusso eterotrofo. Questo metodo pur non essendo affatto perturbativo, risente dell'estrema variabilità del suolo in termini di contenuto in carbonio, frazione inorganica e struttura degli orizzonti, tutti parametri che influiscono sulla componente eterotrofa del flussodisturbando la relazione con le sole radici.

PARTE SPERIMENTALE

3 SCOPO DELLO STUDIO

Il presente studio si propone di giungere alla determinazione dei flussi di carbonio in due sistemi arborei tipici della pianura padana: un bosco artificiale di latifoglie piantato su terreni ex-coltivi ed un meieto in piena produzione.

Si è preso come anno di riferimento il 2006, in cui la ripartizione della Produzione Primaria Netta (NPP, *Net Primary Production*) nei vari comparti dell'ecosistema è stata stimata ricorrendo a diverse metodologie. Particolare attenzione è stata posta alla quantificazione della Produzione Primaria Netta Ipogea (BNPP, *Belowground Primary Production*) e alla stima della rizodeposizione (fig 8). Le piante allocano al sottosuolo una percentuale del C fissato con la fotosintesi stimata tra il 35 e l'80 %, suddivisa tra produzione radicale, respirazione radicale e rizomicrobica e rizodeposizione, nonché un 10 % circa con l'apporto di lettiera epigea (Ryan and Law 2005). L'approccio metodologico si è differenziato leggermente nei due sistemi.

Nel sito forestale si è voluta verificare in primo luogo la seguente equazione:

$$NEP^I = NPP - R_h \quad (7)$$

dove NEP è la Produzione Netta dell'Ecosistema, R_h la respirazione eterotrofa e l'NPP la produzione primaria netta. Ciò in virtù del fatto che per questo sito sono stati messi a disposizione i dati relativi allo scambio netto di CO₂ a livello di Ecosistema (NEP) raccolti dal CNR-IBIMET di Bologna con il metodo della correlazione turbolenta (*Eddy-covariance*) (Verma et al. 1986; Aubinet et al. 2000), nonché i dati di Produzione Primaria Netta Epigea (ANPP, *Belowground Primary*

Production) monitorati a partire dal 1999 dal gruppo di Selvicoltura ed Ecologia Forestale del Dipartimento di Colture Arboree, con inventari annuali del popolamento forestale.

La rizodeposizione ($Litter_{root}$) è stata stimata applicando l'approccio dell'Allocazione Totale di Carbonio al Sottosuolo (TBCA, *Total Belowground Carbon Allocation*) per i popolamenti lontani dall'equilibrio (Raich e Nadelhoffer 1989; Giardina e Ryan 2002; Davidson et al .2002;), secondo cui è vera la eq.(5) che viene riportata nuovamente per comodità:

$$R_r + Litter_{root} + \Delta C_{root} = TBCA = R_{soil} - Litter_{leaf} + \Delta litterC + \Delta soilC + \Delta c_{root} \quad (5)$$

da cui

$$Litter_{root} = R_{soil} - R_r - Litter_{leaf} + \Delta litterC + \Delta soilC \quad (6)$$

dove R_{soil} è la respirazione del suolo, R_r è la respirazione radicale , $Litter_{root}$ e $Litter_{leaf}$ sono rispettivamente la lettiera radicale e quella fogliare, $\Delta litter C$ è l'incremento di lettiera superficiale, $\Delta soilC$ quello di C organico nel suolo e ΔC_{root} l'incremento in carbonio nelle radici.

Per il frutteto sono stati messi a disposizione i valori di scambio netto di CO_2 della parte epigea della pianta (NAE, *Net Aboveground Exchange*), misurati tramite un sistema aperto completamente automatizzato (Corelli Grappadelli e Magnanini 1993) perfezionato dal gruppo Fisiologia delle piante da frutto del Dipartimento di Colture Arboree, installato su tre piante durante la stagione vegetativa.

Per il meleto l'equazione da verificare diventa la seguente:

$$NAE - ANPP - R_r = BNPP = \Delta c_{root} + \Delta f_{root} + Litter_{root} \quad (7)$$

Il dato di scambio netto della parte epigea (NAE), meno la Produzione Primaria Netta Epigea (ANPP, *Aboveground Net Primary Production*) e la respirazione radicale (R_r), è uguale alla BNPP, questa si divide quindi in incremento di biomassa delle radici grosse (Δc_{root}), incremento di biomassa delle radici fini (Δf_{root}) e rizodeposizione ($Litter_{root}$). Quest'ultima può essere quindi esplicitata in questo modo:

$$Litter_{root} = NAE - ANPP - R_r - \Delta coarse_{root} C - \Delta fine_{root} C \quad (8)$$

Una ulteriore stima della rizodeposizione *netta* è stata ottenuta applicando un metodo originale che prevede l'utilizzo del bilancio di massa a variazioni di $\delta^{13}C$ occorse in porzioni di suolo provenienti da monocoltura di piante C4 ed interrate nei due siti oggetto del presente lavoro.

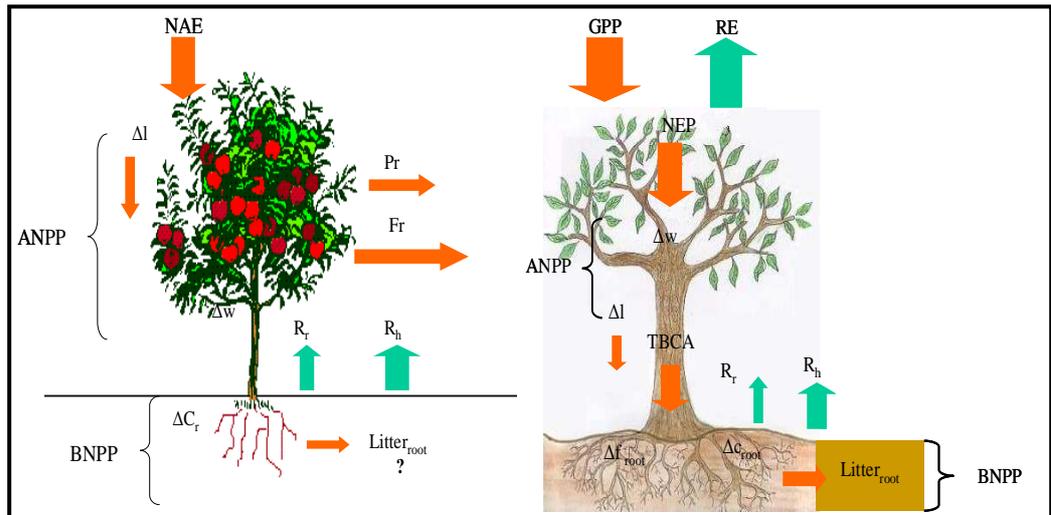


Figura 8 Schema della ripartizione di NPP e dei maggiori flussi di C nel frutteto (a) e nel rimboschimento (b). NAE = Scambio Netto della Parte Epigea; GPP = Produzione primaria lorda; RE = respirazione dell'ecosistema NEP = Produttività netta dell'ecosistema; ANPP = Produzione Primaria Netta Epigea; BNPP = Produzione Primaria Netta Ipogea; R_h = respirazione eterotrofa; R_r = respirazione radicale; Δw = incremento degli organi legnosi ipogei; Δl = la produzione di foglie; ΔC_r = incremento di carbonio nelle radici; TBCA = allocazione totale alle radici; $Litter_{root}$ è la rizodeposizione, valore al lordo di ΔC_{soil} .

4 MATERIALI E METODI

4.1 Studio relativo ad un ecosistema boschivo (rimboschimento)

4.1.1. Descrizione area di studio

Il popolamento è costituito da un rimboschimento misto di pianura realizzato con fini naturalistici, su ex-coltivi nel 1992, con specie tipiche delle foreste planiziali ed è situato in Provincia di Modena, nel comune di Nonantola (44° 41' Nord, 11° 02' Est) (fig 9). La stazione è perfettamente pianeggiante e posta a 15 m.s.l.m. L'impianto ha previsto la messa a dimora di circa 40000 semenzali a radice nuda di 1-2 anni di età su una superficie complessiva di 38,6 ha, con un sesto di 3 x 3 m, disposizione a quadrato e distribuzione casuale delle diverse specie. La piantumazione è stata preceduta da una rippatura alla profondità di 100 cm, seguita da un affinamento superficiale del terreno. La densità iniziale di 1111 piante ad ettaro, si è oggi ridotta a 829 (Magnani et al. 2005). Le specie presenti sono latifoglie, per lo più autoctone, con prevalenza di farnia (*Quercus robur* L.) e di frassini (frassino meridionale, *Fraxinus angustifolia* L., e frassino maggiore, *F. excelsior* L.), seguiti da acero campestre (*Acer campestre* L.), salici (in particolare salice bianco, *Salix alba* L.), pioppi (pioppo bianco, *Populus alba* L. e pioppo nero, *P. nigra* L.) e magaleppo (*Prunus mahaleb* L.) e presenze minori di carpino bianco (*Carpinus betulus* L.) e ontano nero (*Alnus glutinosa* L.). (Tab. 1). I suoli sono molto profondi, tipici di aree morfologicamente depresse della pianura alluvionale, sottoposti periodicamente ad allagamento, classificati dalla cartografia tematica regionale come serie regionale o sotto-unità "Risaia del Duca" RSD1 (Regione Emilia-Romagna 1994) e rientranti secondo la Soil Taxonomy della USDA nella classe dei Fine, Mixed, Mesic Entic Chromusterts (Soil Survey Staff 1999). In particolare, il sito oggetto di studio è caratterizzato da un tenore in argilla molto alto, con valori compresi tra

il 58 e il 62 % (Ponti et al. 2004). Il suolo è caratterizzato dall' 1,57 % di carbonio organico nel suolo (SOC) nei primi 40 cm e di 1,32 % nell'orizzonte compreso tra 40 e 60 cm di profondità (11,8 kg m⁻² sui 60 cm di profondità). Il clima è caratterizzato da forti escursioni termiche, precipitazioni primaverili ed autunnali ed una marcata aridità estiva. La precipitazione media annua è di 700 mm e la temperatura media annua di 13,7 °C (Magnani et al.2005).

A partire dal 1999 il rimboschimento è stato sottoposto ad inventario annuale per la stima degli incrementi legnosi da parte del gruppo di Selvicoltura ed Ecologia Forestale del Dipartimento di Colture Arboree, che dal 2001 esegue anche il monitoraggio della respirazione del suolo. Dal 2001 il sito è monitorato per quanto riguarda gli scambi gassosi a livello di ecosistema dal CNR-IBIMET di Bologna, che vi ha posto una torre attrezzata per le misure di Eddy covariance, nell'ambito del progetto europeo CARBOEUROFLUX (Reichstein et al. 2003; Hemming et al. 2005; Granier et al. 2007)



Figura 9 Il rimboscimento di Nonantola (a) e la sua collocazione geografica (b)

Specie	Importanza %
<i>Quercus robur</i> L.	31 %
<i>Fraxinus</i> spp	24 %
<i>Acer campestre</i> L.	14 %
<i>Prunus mahaleb</i> L.	10 %
<i>Salix</i> spp	8 %
<i>Populus</i> spp	7 %
<i>Alnus</i> spp	4 %
<i>Carpinus betulus</i> L.	2 %

Tabella 1. Distribuzione specifica percentuale del popolamento di Nonantola. Dati da Magnani et al. 2005.

4.1.2. Ripartizione della respirazione del suolo (R_{soil})

Nel giugno 2005 sono state costituite 6 parcelle isolate dall'ingresso delle radici (*trenched plots*) disposte ogni 40 metri su due direzioni perpendicolari nella "footprint area" della torre *Eddy-covariance*. I "trenched plots" (50 x 50 x 50 cm) sono stati eseguiti mediante lo scavo di trincee larghe 15 cm e profonde 50 sui 4 lati. Il monolito (Fig.10) risultante è stato quindi avvolto da un tessuto geotessile resistente alle radici ma permeabile ad acqua e gas costituito da fibre in polipropilene unite termicamente (Dupont), le trincee sono state quindi riempite nuovamente col suolo originario.

In queste parcelle si è potuto dunque misurare in modo relativamente indisturbato la componente del flusso di CO_2 dal suolo a carico dei soli organismi eterotrofi (R_h).

In ogni "trenched plot" sono stati sistemati due collari di PVC per la misura della respirazione (altezza 12 cm, diametro interno 10 cm). I collari, inseriti fino a lasciare 4 cm esposti, presentavano 2/3 ordini di fori di diametro di 0,8 cm nella parte interrata in modo tale da non ostacolare la diffusione orizzontale dei gas nel suolo e permettere, nei punti di controllo, la ricrescita delle radici fin nei primi centimetri. Il campionamento della respirazione del suolo è risultato essere costituito da 12 collari di *trenching* e 12 collari di controllo situati alla stessa distanza dalle piante arboree adulte.

Il flusso di CO_2 è stato misurato con un analizzatore di tipo IRGA (*Infra Red Gas Analyser*) EGM4 (PP Systems, UK) dotato di una cameretta cilindrica per la respirazione del suolo (SRC 1) e di una sonda per la temperatura del suolo (STP 1). In contemporanea ad ogni misura è stata rilevata la temperatura (-8 cm) e l'umidità del suolo (0-6 cm) con una sonda Theta Probe tipo ML 2x (Delta-T Devices Ltd, UK). Il dato di umidità è stato preso in tre punti esterni al collare per evitare la perturbazione della sezione di flusso. I valori espressi in millivolts (**mV**)

sono stati trasformati in percentuale di volume attraverso l'utilizzo di una funzioni polinomiale i cui coefficienti sono stati calcolati specificamente per il sito seguendo le indicazioni del manuale d'uso (DELTA-T DEVICES 1999).

Le misure sono state eseguite ogni mese a partire dall'estate del 2005 in due momenti del giorno tra le 3 e le 5 (ora solare), in assenza di fotosintesi (*min*), e tra le 13 e le 15 in corrispondenza del massimo valore di temperatura dell'aria (*max*). I valori giornalieri di flusso sono stati stimati utilizzando la media delle due misure effettuate nell'arco della giornata estesa alle 24 ore (Boone et al. 1998). Per effettuare le misure si sono evitate le giornate caratterizzate da precipitazioni o immediatamente successive ad esse, per evitare l'inibizione del flusso dovuta alla saturazione con H₂O della porosità del suolo (DiLustro et al. 2005) o un suo stimolo, quando la pioggia avviene dopo un periodo secco (Lee et al. 2002). In cinque occasioni tra luglio 2005 ed ottobre 2006 (una volta a stagione) è stata eseguito un ciclo di 4/5 misure nelle 24 ore per ogni collare, ciò col duplice intento di studiare gli andamenti giornalieri dei due flussi e di verificare se due misure erano sufficiente per calcolare il flusso giornaliero. Nel 2006 il monitoraggio è stato eseguito in 11 date (17/1, 14/2, 28/3, 27/4, 24/5, 20/6, 7/8, 27/8, 5/10, 31/10, 12/12).

Per ricavare un dato di respirazione annua i dati raccolti di respirazione del suolo e microbica si sono utilizzati per costruire due modelli esponenziali di primo ordine del tipo:

$$F = a e^{kT} \quad (8)$$

Dove F è il flusso, T è la temperatura del suolo e a e k sono due parametri. Per la parametrizzazione si sono utilizzati i dati medi dei flussi giornalieri di tutti i collari del controllo e del *trenching*, ciò per eliminare la variabilità spaziale, dipendente da fattori diversi dalla temperatura. La temperatura del suolo utilizzata per calcolare la

respirazione annuale tramite l'impiego dei due modelli sopradescritti è stata misurata in continuo con due sensori sistemati presso la torre, rispettivamente a 5 e 10 cm di profondità.



Figura 10 a) Preparazione dei *trenched plots* e strumentazione per la misura dei flussi. a) Zolla esclusa dalla presenza di radici vive; b) *Trenched plot* con collari e cameretta SRC 1 collegata all'EGM4 PP SYSTEMS e Sensore Teta Probe MI 2x Delta-T Devices; c) Collare di misura di R_{soil} ; d) Collare di misura di R_h

4.1.3 Misura dello scambio netto dell'ecosistema (NEE) e dei parametri ambientali.

Lo scambio netto dell'ecosistema è stato misurato con la tecnica dell'*eddy-covariance* da personale del CNR-IBIMET (BO) a partire dal febbraio 2001 utilizzando un analizzatore a risposta veloce Li-6262 (Li-Cor, Lincoln, NE, USA) ed un anemometro ultrasonico tridimensionale R2 (Gill Instr., Limington, Hampshire, UK) collocato ad un'altezza di 13 m (fig. 11); il dato è stato quindi corretto per l'accumulo di CO₂ all'interno della copertura. Tutti i principali parametri micro-ambientali (radiazione, temperatura dell'aria e del suolo, umidità dell'aria e del suolo) sono stati anche misurati in continuo in corrispondenza della stazione di misura dei flussi.

Il database a disposizione per il 2006 è risultato lacunoso per due lunghi periodi (20 marzo –12 aprile, 28-giugno-31 luglio) e uno breve (25-31 maggio). Negli ultimi due casi però erano disponibili i valori di radiazione fotosinteticamente attiva (**PAR**) e temperatura dell'aria utili alla costruzione delle formule di “riempimento”.(*gap-filling*) necessarie per integrare i dati mancanti. Queste sono state costruite separatamente per il giorno e per la notte. Per il giorno si sono plottati i dati istantanei di radiazione fotosinteticamente attiva (PAR) espressa in W m⁻² ed i corrispondenti valori di fissazione netta (Fc) espressi in μmol CO₂ m⁻² sec⁻¹ misurati in giornate tipo ogni mese. Le equazioni di tipo esponenziale ottenute mese per mese, sono state quindi usate per ricostruire i dati di Fc mancanti. Per la notte le formule di “*gap filling*” sono state costruite, sempre mese per mese, plottando i valori di temperatura dell'aria istantanea e i corrispondenti valori di respirazione dell'ecosistema (ER) registrati in notti tipo, e quindi applicate per ricostruire i dati mancanti di ER.

La prima lunga lacuna ha richiesto la ricostruzione delle giornate mancanti sulla base dei dati climatici della stazione meteorologica dell'ARPA Emilia-Romagna di S. Agata Bolognese, situata a 5 km di

distanza dal sito sperimentale. I dati disponibili per la stazione di S.Agata sono quelli giornalieri di precipitazioni (cumulo), umidità relativa dell'aria e temperatura dell'aria (medie).

Dopo aver confrontato i dati di temperatura con quelli misurati presso la torre Eddy (fig.12), si sono scelte le giornate tipo con temperatura e umidità dell'aria uguale o simile a quelle mancanti nel database, prendendo in esame la settimana antecedente e susseguente il periodo di gap. Individuate le giornate, si è assunto che in giorni simili anche l'andamento di PAR e T dell'aria nel sito forestale fossero identici



Figura 11 Particolari della torre Eddy nella primavera 2006. In senso orario da sinistra: gli anemometri direzionali e l'analizzatore di gas, la torre e il bosco di Nonantola visto dalla torre.

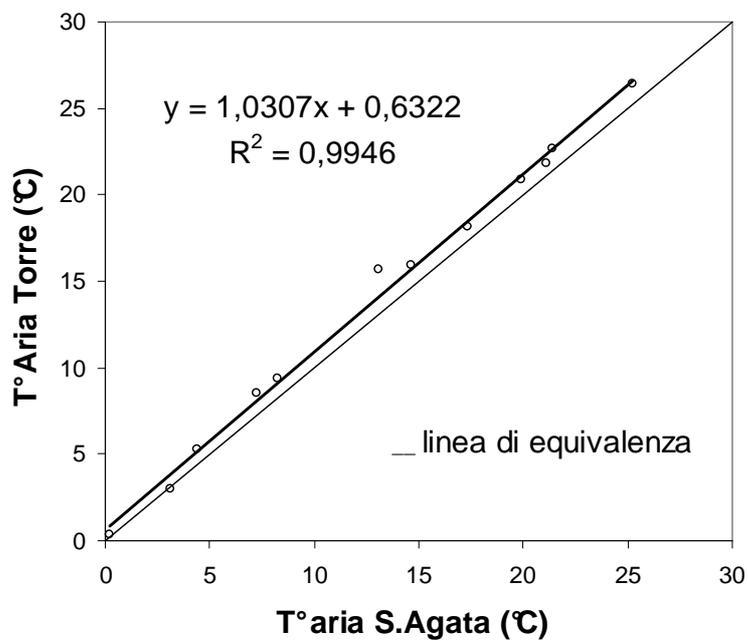


Figura 12 Confronto tra la temperatura dell'aria nella stazione meteo di S. Agata e quella misurata presso la torre Eddy a Nonantola. Valori medi mensili.

4.1.4. Misura della produttività primaria netta (NPP)

Produttività primaria netta epigea (ANPP)

L'inventario della biomassa del popolamento adulto è stato eseguito annualmente su file permanenti, dal 1999 dal gruppo di Selvicoltura del Dipartimento di Colture Arboree. Nel febbraio e marzo del 2006 sono state misurate i diametri e le altezze di circa 400 piante su 4 file, quindi il volume dendrometrico degli individui di ogni specie è stato stimato utilizzando tavole di cubatura locali specifiche per le specie oggetto di studio (Regione Emilia-Romagna 2000). Il volume legnoso complessivo è stato infine stimato utilizzando fattori di conversione specifici: per i rami ci si è basati su dati di letteratura relativi a piante di dimensioni simili (Castellani 1982).

La densità del legno è stata calcolata direttamente su carote legnose estratte a 1.30 m da un campione di 24 piante rappresentative delle quattro principali specie.

Per la rinnovazione, dal 2006 si è adottato un metodo distruttivo su 10 miniplots per stabilire gli stocks di biomassa e costruire relazioni allometriche sulle giovani piante, tra età, diametro e altezza e peso del fusto. Per il 2006 si è utilizzata la relazione età (anni) peso del fusto (grammi di sostanza secca) costruita sulla distruzione di 50 piante di età compresa tra 1 e 7 anni alla fine della stagione vegetativa ($r^2 = 0,9762$; $p < 0,01$) applicata sullo stesso campione di 261 individui di cui è stata misurata l'età n e di conseguenza l'età $n-1$ per stimarne l'incremento di biomassa annuale.

La produzione di foglie (ΔI) è stata stimata tramite la raccolta della litterfall in apposite litter-traps a base quadrata, di 1 m² di superficie apposte all'inizio del 2006 in corrispondenza dei plot di respirazione del suolo. Con cadenza quindicinale o mensile la lettiera raccolta dalle trappole è essiccata in stufa a 65°C per 48 ore e poi pesata.

La concentrazione di C presente nella biomassa è stata determinata su campioni delle varie specie presenti tramite analizzatore elementare (CHNS-O modello EA 1110, Thermo Electron, Germany).

Produttività primaria netta ipogea (BNPP)

L'incremento delle radici grosse (diametro > 2mm) delle piante adulte (Δc_{root}) è stato stimato pari al 20% della produzione legnosa epigea secondo quanto riportato da diverse ricerche su piante arboree (Cairns et al.1997; Curtis et al. 2002; Giardina et al 2004; Newman et al. 2006).

Per le radici fini (Δf_{root} ; $\emptyset \leq 2$ mm) si è provveduto al campionamento della biomassa mediante *soil-coring* (prelievo di carote di suolo) all'inizio e alla fine del periodo sperimentale. I carotaggi sono stati eseguiti con una trivella a sgorbia (Eijkelkamp, NL) fino a 60 cm di profondità, a tre diverse distanze dal fusto in 12 plot (6 di Frassino e 6 di Farnia) per un totale di 36 *cores* in ogni data. I campioni di suolo raccolti (lunghezza 60 cm; diametro 2,5 cm). Nel secondo campionamento le carote di suolo sono state divise in due profondità (0-40 cm; 40-60 cm) al fine di valutare il diverso contributo di ogni strato. In ogni occasione i campioni sono conservati in cella frigorifera a 5 °C prima della determinazione della biomassa radicale per un massimo di 7 giorni. Il peso fresco dei campioni è stato registrato e sottocampioni rappresentativi sono stati essiccati in stufa per determinarne l'umidità. Le 12 ore precedenti il lavaggio delle radici i campioni sono stati tenuti in ammollo in soluzione 0,5 molare di Na₂CO₃ per favorire lo scioglimento delle argille. Quindi i campioni sono stati lavati e setacciati con acqua corrente, usando una serie di setacci a maglia di ampiezza decrescente (2; 1; 0,2 mm). Le radici sono state raccolte a mano con l'ausilio di pinzette. In entrambe le occasioni il lavoro è stato eseguito dalle medesime persone. Il materiale è stato quindi essiccato in stufa ventilata a 65°C per minimo 48 ore e pesato. La densità radicale

delle radici fini per unità di superficie, Frd ($t\ ha^{-1}$) è stata calcolata con la seguente formula:

$$Frd = \frac{Ps}{Pr \times Bd} \times 6000 \quad (9)$$

dove Ps è il peso secco del campione, Pr è il peso secco delle radici nel campione (g), Bd è la bulk density ($g\ cm^{-3}$) e 6000 il fattore di conversione da ($g\ cm^{-3}$) a ($t\ ha^{-1}$)

Per la stima dell'incremento di biomassa radicale della rinnovazione si è applicato un rapporto *peso fusto / peso radici* di 0,968, calcolato sulle 50 piante distrutte nel settembre 2006 all'interno di 10 miniplots distribuiti casualmente nell'ambito del popolamento.

La percentuale di C presente nella biomassa delle radici fini è stata misurata tramite analizzatore elementare (CHNS-O modello EA 1110, Thermo Electron, Germany)

L'input di lettiera radicale $Litter_{root}$ è stato stimato applicando l'approccio dell'allocazione totale alle radici (TBCA) con l'ausilio della equazione 6 che si riporta di seguito:

$$Litter_{root} = R_{soil} - R_r - Litter_{leaf} + \Delta litterC + \Delta soilC \quad (6)$$

dove R_{soil} è la respirazione del suolo, R_r è la respirazione radicale, e $Litter_{leaf}$ è la lettiera fogliare, $\Delta litterC$ è l'incremento di lettiera superficiale, $\Delta soilC$ l'incremento di carbonio nella frazione minerale del suolo.

Con l'eccezione di $\Delta litter C$ e $\Delta soil$, di difficilissima determinazione a scala annuale, tutti gli altri membri della (6) sono stati misurati o stimati. Considerando che l'entità di $\Delta litter C$ e $\Delta soil$ nel nostro sistema è molto piccola confrontata a quella degli altri flussi, si è deciso di trascurarli, tenendone conto in fase di discussione (Raich and Nadelhoffer 1989; Giardina e Ryan 2002; Davidson et al.2002).

L'equazione applicata per il calcolo della rizodeposizione è quindi diventata:

$$Litter_{root} = R_{soil} - R_r - Litter_{leaf} \quad (10)$$

4.1.6. Misura della rizodeposizione netta con il metodo isotopico.

La rizodeposizione ottenuta dall'applicazione delle equazione (9) è stata verificata con un metodo isotopico. Nello specifico sono stati interrati due serie di In-growth cores (Igc) di suolo proveniente da colture decennali di mais, caratterizzato da un valore di $\delta^{13}\text{C}$ di -21,8 ‰. Tale valore è sufficientemente diverso da quello delle radici circostanti (-26,98 ‰) per applicare il bilancio di massa (Staddon 2004).

La percentuale di carbonio di origine radicale sul totale presente negli In-growth cores dopo un anno (C_{root}), si ricava applicando la seguente equazione:

$$C_{root} / C_{tot} = \frac{\delta^{13}C_{tot} - \delta^{13}C_{cont}}{\delta^{13}C_{root} - \delta^{13}C_{cont}} \times \quad (11)$$

in cui C_{tot} è la concentrazione di carbonio organico misurato nel suolo contenuto negli Igc dopo un anno, $\delta^{13}C_{tot}$ è il delta del suolo estratto dagli Igc dopo un anno, $\delta^{13}C_{cont}$ è il delta del suolo estratto dai controlli dopo un anno e $\delta^{13}C_{root}$ è il delta delle radici delle piante. Il risultato è la frazioni di carbonio di origine radicale presente negli in-growth cores.

Gli Igc sono stati preparati con segmenti lunghi 70 cm di rete tubolare in polietilene, con sezione di 2,5 cm e diametro delle maglie di 0.5 cm (Sigma-Aldrich). Le “calze” chiuse ad una estremità con corda di nylon, sono state alloggiare in buchi profondi 60 cm, ricavati con una trivella e riempiti di suolo con l'ausilio di un tubo e di un imbuto come descritto da Oliveira e colleghi (2000)(fig. 13a). Il suolo è stato precedentemente seccato e passato al setaccio con maglie di 2 mm^{-2} , pesato e dosato in modo tale da ricostituire la densità del suolo circostante. Per campionare l'eventuale variabilità spaziale della densità radicale, gli Igc sono stati messi a tre distanze del fusto (50, 100 e 150

cm) tra due piante contigue della stessa specie (fig 13b e 13c), appaiati da controlli costituiti da sacchetti costruiti con un tessuto impermeabile alle radici ma permeabile alla soluzione circolante nel suolo e ai gas (lo stesso usato come barriera nei *trenching*, (fig 13a) piazzati a due distanze dal fusto (50 e 100 cm). In totale, nel marzo 2006, sono stati messi a dimora 18 *Igc* e 12 controlli in 6 plot (3 di farnia e 3 di frassino).

All'inizio di aprile 2007 gli *Igc* sono stati estratti scavando delle buche per liberarli (fig 13d) su un lato e permetterne il recupero con la massima cautela. La crescita di nuove radici all'interno delle maglie creava infatti il rischio di lacerazioni e perdita di materiale. Il loro contenuto, una volta setacciato e liberato dalle radici, è stato seccato e pestato finemente fino ad ottenere una polvere con diametro delle particelle inferiore a 0,2 mm, da cui sono stati estratti sottocampioni di circa 7 mg per la determinazione del $\delta^{13}\text{C}$ allo spettrometro di massa (IRMS, Delta Plus, Thermo Electron).



Figura 13 Igc di suolo C4 nel bosco di Nonantola. a) le “calze” di rete e i controlli; b) la messa a dimora; c) la posizione; d) l'estrazione.

4.2 Studio relativo ad un ecosistema produttivo arboreo (frutteto)

4.2.1. Descrizione area di studio

Il frutteto oggetto di studio è un impianto di melo in piena produzione situato a Cadriano presso l'azienda sperimentale della Facoltà di Agraria (fig.14). Si tratta della cv. Mondial Gala innestata su M9 e allevata a "spindlebush". L'impianto è stato effettuato nell'inverno 1996/97, con sesto d'impianto di 3,8 x 1,0 m, risultante in una densità di 2630 piante ad ettaro, disposte su filari singoli con direzione SE-NW.

Gli interfilari, larghi 2 m, sono inerbiti, mentre lungo i filari, il suolo è stato mantenuto privo di vegetazione per una larghezza di 1,8 m, applicando, quando necessario, dei trattamenti con erbicidi non residuali. L'impianto riceve un apporto annuale di nutrienti di 80 kg N, 15 kg P e 100 kg K per ettaro.

Il clima è di tipo temperato continentale, con piovosità media attorno ai 700 mm annui, concentrata in autunno e primavera e spesso con siccità estiva pronunciata. La temperatura media annuale è di circa 12°C, con escursioni giornaliere non molto forti. La zona è caratterizzata da inverni rigidi tra dicembre e febbraio con valori di temperatura media dei mesi più freddi attorno allo zero ed estati calde con temperature medie di 20-23°C. Il suolo è di tipo limoso-argilloso (sabbia 18%, limo 50%, argilla 32%) e con pH subalcalino (Ceccon 2007). Il suolo è caratterizzato dall' 1,18 % di carbonio organico nel suolo (SOC) nei primi 30 cm e di 1,10 % nell'orizzonte compreso tra 30 e 60 cm di profondità. Il meletto è provvisto di un impianto d'irrigazione a microportata con ali gocciolanti al suolo lungo i filari e gocciolatori da 2 litri/ora posti ogni 40 cm.



Figura 14 Il meieto di Cadriano (a) e la sua localizzazione geografica (b).

4.2.2. Ripartizione della R_{soil} nelle sue componenti autotrofa ed eterotrofa

Per lo studio nel frutteto si è considerata solo la striscia diserbata in quanto sotto di essa si ritrovano quasi completamente gli apparati radicali delle piante arboree; questo fatto, confermato in un precedente studio (Solimando 2004) è spiegato dalla presenza dell'impianto di ferti-irrigazione localizzata.

Nel maggio 2005, sono state create 4 aree di *trenching* con la stessa metodologia illustrata nel paragrafo 4.1.2, posizionate nei lati Sud e Nord di una fila, nell'area di pertinenza di due piante contigue, e due collari dello stesso tipo utilizzato nel rimboschimento, sono stati piazzati in ogni plot, per un totale di 16 collari per la misura di R_h . I "trenched plots" nello stesso lato di una fila distavano tra loro 6 metri ed erano intervallati da due plot per la misura di R_{soil} distanziati 2 metri l'uno dall'altro e ciascuno dotato di due collari di PVC realizzati come descritto sopra, per un totale di 16 collari di controllo (fig. 15 e 16).

Le misure di flusso e di umidità del suolo sono state effettuate esattamente come descritto nel paragrafo 4.1.2. con cadenza mensile a partire dall'estate del 2005 in due momenti del giorno tra le 3 e le 5 (ora solare) (*min*), e tra le 13 e le 15 in corrispondenza del massimo valore di temperatura dell'aria (*max*). I dati sono stati poi integrati a valori giornalieri mediando i valori medi delle due misure e moltiplicandolo per le 24 ore (Boone et al. 1998). In cinque occasioni tra luglio 2005 ed ottobre 2006 (una volta a stagione) è stata eseguito un ciclo di 4/5 misure nelle 24 ore per ogni collare, duplice intento di studiare gli andamenti dei due flussi e di verificare metodo di integrazione giornaliera del dato. Nel 2006 sono stati eseguiti 10 rilievi nelle seguenti date: 25/1, 27/2, 27/ 3, 4 e 25/5, 4 e 20/7, 7/9, 12/10 e 27/12, i dati giornalieri ottenuti dall'integrazione come sopra, sono stati considerati rappresentativi del periodo precedente e successivo la misura, e sono stati ulteriormente integrati a mensili e ad annuali.

Anche in questo esperimento è stata studiata la risposta dei flussi a temperatura e umidità del suolo, ma il modello esponenziale semplice dipendente dalla temperatura, espresso dalla (8), non è risultato sufficiente a descrivere il comportamento della respirazione a causa del verificarsi di valori limitanti di umidità.

La mancanza di sensori di umidità del suolo che registrassero il dato in continuo non ha permesso di utilizzare un modello che prendesse in considerazione anche questo secondo parametro per l'integrazione.

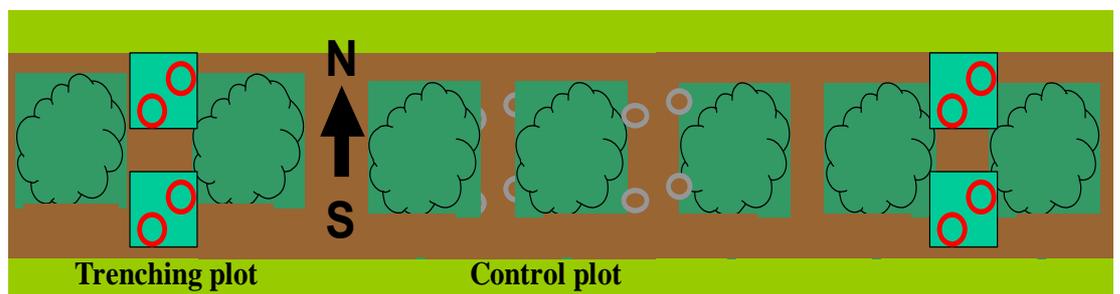


Figura 15 Schema della disposizione dei *trenched plots* e dei collari lungo i filari del meieto. Da Ceccon (2007) modificato



Figura 16 Misura della respirazione eterotrofa nei *trenched plots* (a) e collari di controllo (b).

4.2.3 Misura della NAE e dei parametri ambientali.



Figura 17 Palloni per la misura degli scambi gassosi a livella di chioma. In primo piano la centralina elettronica e il CIRAS. Foto di Marco Zibordi.

La determinazione della fotosintesi netta dell'intera chioma è stata effettuata grazie alla collaborazione con il Prof. L. Corelli Grappadelli e i suoi collaboratori, tramite un sistema aperto completamente automatizzato. Questo apparato consta di 3 camere di assimilazione autocostruite in PVC connesse ad un IRGA di tipo CIRAS SC (PP System, UK) (fig.17) attraverso il quale è possibile campionare la concentrazione di anidride carbonica e vapor d'acqua in entrata e in uscita da ciascuna camera (pallone) (Corelli Grappadelli e Magnanini 1993). Ogni pallone è servito da un ventilatore elettrico in grado di convogliare aria al suo interno; la portata in ingresso viene continuamente monitorata attraverso un flussimetro autocostruito e preventivamente calibrato. L'aria in ingresso e in uscita da ogni singolo pallone viene indirizzata all'IRGA attraverso un sistema di tubi ed

elettrovalvole la cui apertura e chiusura è programmata da un datalogger (CR10X Cambell Scientific, UTAH) in grado, altresì, di memorizzare il flusso di dati provenienti dall'IRGA. La programmazione ha previsto un ciclo di registrazione completo dei dati dei 3 palloni della durata di 15 min. (4 campionamenti orari per ognuno dei 3 palloni.)

In prossimità dei palloni è stata installata una centralina meteorologica (Addcon Telemetry GmbH) che ha registrato dalla primavera del 2005 precipitazioni, PAR, temperatura dell'aria e del suolo e umidità dell'aria.

Durante la stagione vegetativa 2006 i palloni sono stati montati per sei periodi, a fine maggio (tre giorni), fine giugno (8 giorni), fine luglio (7 giorni), quasi tutto agosto (26 giorni, di cui 15 pre raccolta e 11 post), settembre (10 giorni) ed ottobre (10 giorni).

In fase di elaborazione ho scelto di scartare i dati notturni misurati dai palloni a causa dell'estrema variabilità di quest'ultimi, legata alle irregolarità nella circolazione della CO₂ e degli altri gas di notte in cui si determina un ristagno di masse d'aria, che portano il sistema sovrastimare fortemente la respirazione nelle notti senza brezza (Corelli Grappadelli, comunicazione personale.)

Si è dunque divisa la fase diurna, con PAR positiva, da quella notturna con PAR uguale a zero, e si sono costruite delle relazioni tra i dati medi di PAR in Watt m⁻² e quelli di scambio netto di CO₂ in μmol pt⁻¹sec⁻¹, ottenuti con frequenza di 30 minuti. Per ogni pianta e per ogni periodo sono state costruite relazioni lineari o logaritmiche del tipo:

$$NAE = a + b \times PAR \quad (12)$$

e

$$NAE = a + b \times \ln(PAR) \quad (13)$$

(STATGRAPHICS Plus 2.1). I valori dei coefficienti, gli r² sono riportati in tabella 2.

Periodo	Tipo	Pianta 1			Pianta 2			Pianta 3					
		a	b	r ²	a	b	r ²	a	b	r ²			
26-28 /05	Y=a+bx	1,052	0,057	0,80	**	7,275	0,114	0,85	**	7,402	0,082	0,83	**
24-29 /06	Y=a+bx	5,593	0,056	0,61	**	16,959	0,066	0,61	**	16,160	0,063	0,66	**
25-31 /07	Y=a+bln(x)	-90,622	22,571	0,68	**	-75,379	19,720	0,59	**	-79,515	20,732	0,71	**
1-16 /08	Y=a+bln(x)	-91,586	23,636	0,74	**	-81,135	21,579	0,71	**	-87,820	22,895	0,78	**
18-27 /08	Y=a+bln(x)	-66,313	18,245	0,53	**	-83,506	17,850	0,70	**	-56,568	16,523	0,73	**
21-30 /09	Y=a+bx	13,966	0,058	0,65	**	17,549	0,085	0,61	**	11,383	0,051	0,65	**
1-11 /10	Y=a+bx	15,377	0,060	0,60	**	17,902	0,074	0,62	**	13,349	0,044	0,61	**

Tabella 2 Parametri e coefficienti di determinazione delle equazioni utilizzate per il calcolo di NAE nella fase diurna del periodo vegetativo. ** indica $p < 0,01$.

Grazie ai dati di PAR registrati in continuo è stato possibile integrare il flusso la fissazione netta diurna dall'1/05/2006 al 31/10/2006. Il periodo dalla schiusura delle gemme (circa metà aprile) e quello di abscissione delle foglie (1-21 novembre) non sono stati considerati dal punto di vista della fissazione.

Per calcolare la respirazione notturna si è applicato il modello descritto da Butler e Landsberg (1981) che lega la respirazione dell'intera pianta in diverse fasi fenologiche alla temperatura dei tessuti (T) e alla superficie degli stessi:

$$R = a e^{kT} \quad (14)$$

In cui R è la respirazione della pianta a è l'intercetta sull'asse delle ordinate espressa in $\text{mg CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ e k è la pendenza. Gli autori hanno sottoposto piante di 5-6 anni cresciute in vaso, a differenti temperature ambientali in successivi esperimenti nel corso dell'anno da settembre 1978 ad ottobre 1979. In nove occasioni le piante venivano tenute al buio per circa 36 h e i loro scambi gassosi venivano monitorati attraverso una camera che le conteneva e un IRGA. Quindi hanno ricavato mediante regressione semplice le curve ed i coefficienti tipici della risposta alla temperatura in ogni fenologico .

Nell'integrazione si è usato un valore fisso di $k = 0,84$, che gli autori riportano come pendenza comune alle varie fasi fenologiche, e differenti valori di a ($\text{mg m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) durante la stagione (tab. 3).

Stadio fenologico (Landsberg and Butler 1981)	Pianta Intera (PI) / Scheletro (S)	<i>a</i> (mg m ⁻² s ⁻¹)	Periodo
Gemma d'inverno	PI	0,0047	Gen., Feb., Nov., Dic.
Rottura gemme	PI	0,0054	Mar.
Punte verdi	PI	0,0062	Apr.
Piena fioritura	PI	0,0068	Mag., Giu.
Pre-raccolta	PI	0,0043	Lug., Ago. (pre raccolta)
Pre-raccolta	S	0,0032	Ago. (post-raccolta), Sett., Ott.

Tabella 3 Coefficienti di Butler e Landsberg (1981) nelle diverse fasi fenologiche e relativi periodi per cui sono stati utilizzati per l'integrazione dei dati.

Come variabile di ingresso si è utilizzata la temperatura dell'aria, considerando gli eventuali scostamenti da quella dei tessuti di segno opposto durante il corso dell'anno. La superficie delle tre piante è stata ricostruita in ogni momento dell'anno. Per fare questo, tronco e branche sono state approssimate a tronchi di cono, i rami dell'anno a coni. I diametri e le lunghezze sono state misurate due volte a distanza di un anno negli stessi punti. La superficie misurata a febbraio 2006 è stata attribuita costante alla pianta da gennaio a giugno (tolta la superficie del legno di potatura a fine febbraio), quella misurata a febbraio 2007, da luglio a dicembre. La superficie fogliare è stata ricostruita a partire dal LAI misurato per ogni singolo albero sulla base della biomassa fogliare raccolta nella stagione e considerando il peso specifico dell'area fogliare (correlato alla biomassa con $r^2 = 0,96$; $p < 0,01$) (Zibordi et al., dati non pubblicati). Ho considerato che l'area fogliare degli alberi di melo sia incrementata linearmente dal primo aprile (valore pari a 0) fino ad un valore massimo in data 31 luglio, rimanendo poi costante fino al 30 settembre, e che quindi sia calata linearmente fino a raggiungere nuovamente 0 in data 21 novembre, quando le ultime foglie sono state staccate a mano (vedi più avanti la stima della ANPP). La superficie dei rami dell'anno è stata ipotizzata in crescita lineare dal 1 di maggio fino al 31 luglio e poi costante fino a dicembre. La superficie dei frutti è stata ricostruita a partire dal numero di frutti per albero e dal loro peso medio grazie ad un relazione peso fresco del frutto –diametro costruita per la

stessa varietà coltivata a S. Anna di Cadriano nell'estate del 2007 (Zibordi et al., dati non pubblicati). Noti il numero ed il diametro medio, la superficie totale dei frutti, approssimati a sfere, è stata considerata in crescita lineare dal 1 maggio al 18 agosto, giorno della raccolta.

Lo scambio netto del mese di aprile, in cui non è stato possibile eseguire misure di NAE con i palloni, è stato considerato pari al 5,1 % dello scambio netto cumulato nei restanti 11 mesi, basandosi sui Wibbe et al. (1993) che hanno monitorato gli scambi gassosi su melo, calcolando il *budget* annuale di carbonio. In considerazione delle fenologie tipiche del melo in pianura padana (apertura delle gemme nel mese di marzo e piena fioritura nel mese di aprile), ho ritenuto che l'errore legato a questa assunzione fosse inferiore a quello di considerare nullo il bilancio netto del mese di aprile.

4.2.4. Misura della produttività primaria netta (NPP)

Produttività primaria netta epigea (ANPP)

Per stimare la biomassa aerea dei tre alberi in oggetto, nel febbraio del 2006 e 2007 sono stati contati il numero delle branche e dei rami dell'anno, il loro diametro alla due estremità e la loro lunghezza. La circonferenza degli alberi è stata misurata sopra e sotto il punto di innesto. Le branche ed il fusto sono state approssimate a tronchi di cono, i rami dell'anno a coni.

Le misure eseguite a distanza di un anno negli stessi punti hanno permesso di registrare gli incrementi dimensionali dello scheletro legnoso. Nell'inverno del 2005 sono stati recisi altri 3 alberi della stessa combinazione di innesto a 5 cm dal suolo. Su di essi è stato possibile ricavare relazioni tra peso secco delle branche direttamente inserite sul fusto ed il loro volume. Si è inoltre proceduto a ricavare una relazione tra il peso secco dei rami e la loro lunghezza. In totale si è operato su 173 branche (fig 18a) e su alcune centinaia di rami. Per questi ultimi infatti il campione di piante distrutte è stato integrato con un database precedentemente ottenuto grazie ad estirpazioni di alcuni alberi effettuate negli anni precedenti (Mayer 2005) (fig.18b). Per i fusti ci si è basati sulle tre piante estirpate nel 2005 (fig. 18c)

Durante l'anno è stata raccolto il materiale oggetto di potatura, la cascola dei frutticini, la produzione di frutti alla raccolta e la lettiera fogliare, che nell'ultima fase (ottobre-novembre) è stata intercettata mediante l'apposizione di reti avvolgenti intorno alla pianta

Produttività primaria netta ipogea (BNPP)

Per quanto riguarda l'incremento delle radici grosse (Δc_{root}) si è utilizzata una relazione allometrica tra diametro sotto il punto di innesto (**PI**) e peso secco della biomassa (fig. 19) ottenuta sulla base di estirpazioni svolte in passato nello stesso frutteto e altre eseguite

durante il 2006 su varietà innestate sempre su M9 per un totale di 13 piante (Solimando 2004; Scandellari et al. dati non pubblicati).

Per quantificare l'incremento nella biomassa delle radici fini (Δf_{root}) si è operato tramite due prelievi (marzo 2005-marzo 2006) di carote di suolo (da 0 a 60 cm di profondità), in 9 punti caratterizzati per distanza dal tronco e dal filare. Le radici fini sono state separate dal suolo e si è comparata la variazione di biomassa da un anno a quello successivo. Ogni anno si è operato su 4 alberi per un totale 36 prelievi/anno. Per il trattamento delle carote, la separazione delle radici ed il calcolo della densità radicale si rimanda al paragrafo 4.1.4.

Per la trasformazione dei valori di biomassa in carbonio si sono utilizzati coefficienti specifici per i vari organi della pianta, determinati sperimentalmente tramite analisi elementare (CHNS-O modello EA 1110, Thermo Electron, Germany). (tab 4).

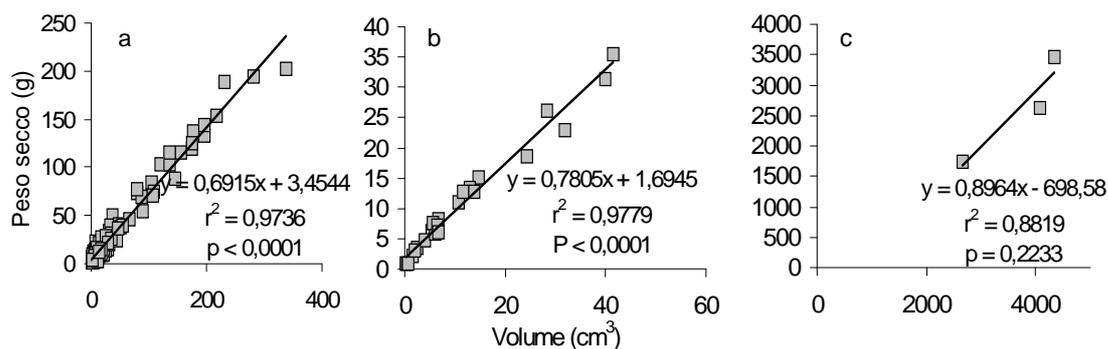


Figura 18 Relazioni volume- peso secco utilizzate per stimare la biomassa delle branche (a), dei rami dell'anno (b) e dei fusti (c).

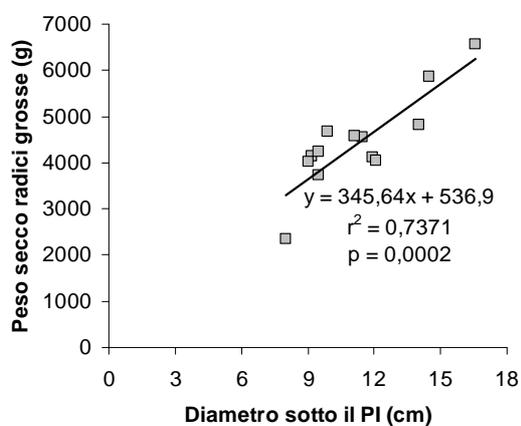


Figura 19 Relazione allo metrica tra diametro sotto il punto di innesto e la biomassa delle radici grosse. n = 13. Scandellari et al., dati non pubblicati.

Organo	% C	ds
Fusto	44,6	0,2
Branche	44,2	0,3
Rami	44,2	0,2
Foglie	45,0	0,2
Frutti	42,4	1,4
Radici grosse	46,8	0,1

Tabella 4 Contenuto percentuale in carbonio dei diversi organi delle piante di melo.

4.2.5. Misura della rizodeposizione netta con il metodo isotopico.

Anche nel frutteto è stato utilizzato il metodo degli *Igc* di suolo C4 per stimare la rizodeposizione netta. Tramite l'applicazione dell'eq. (11) Con la stessa metodologia descritta nel paragrafo 4.1.6., in una fila caratterizzata dallo stesso trattamento ferti-irriguo di quelle delle piante e dei collari monitorati per gli scambi gassosi, nel maggio 2006 sono stati inseriti 8 cores per pianta su tre piante, a quattro distanze dal fusto (15, 30, 45, 60 cm) ripetute due volte, in direzioni sfalsate di 45° (fig. 20). Allo stesso modo 4 controlli sono stati messi sotto una pianta della stessa fila.

A giugno 2007 gli *Igc* sono stati recuperati e trattati come descritto in paragrafo 4.1.6.

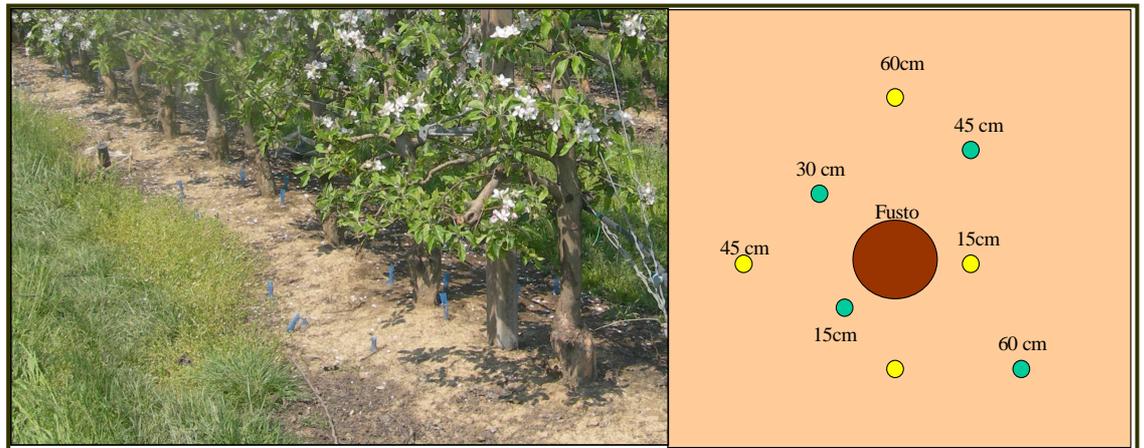


Figura 20 *In-growth cores* nel filare del meleto a Cadriano e schema della loro disposizione rispetto al fusto.

5 RISULTATI

5.1. Il rimboschimento – Nonantola

5.1.1. Caratteristiche climatiche durante il periodo di studio.

Il 2006, con 412 mm di precipitazioni è stato un anno meno piovoso della media, e la temperatura media annua di 13 °C è risultata più bassa di quella riportata per la zona (13,7 °C). Le temperature sono variate tra i 0,2 °C di gennaio e i 25,2 luglio, le precipitazioni hanno avuto due minimi in luglio ed ottobre e un culmine in settembre creando due periodi di aridità secondo i criteri di Walter e Lieth (1967) (fig. 21). L'umidità del suolo (fig. 22) è rimasta abbastanza costante da gennaio ad aprile con valori compresi tra 38,6 % e 40,3 %, per calare poi rapidamente fino al 26,7 % di luglio, rimanere su valori bassi fino a ottobre per poi risalire. La temperatura del suolo (fig.17) invece è cresciuta costantemente da gennaio (1,4 °C) a luglio (22,7°C) per decresce fino a dicembre (7 °C), rimanendo sopra i 19°C da giugno a settembre.

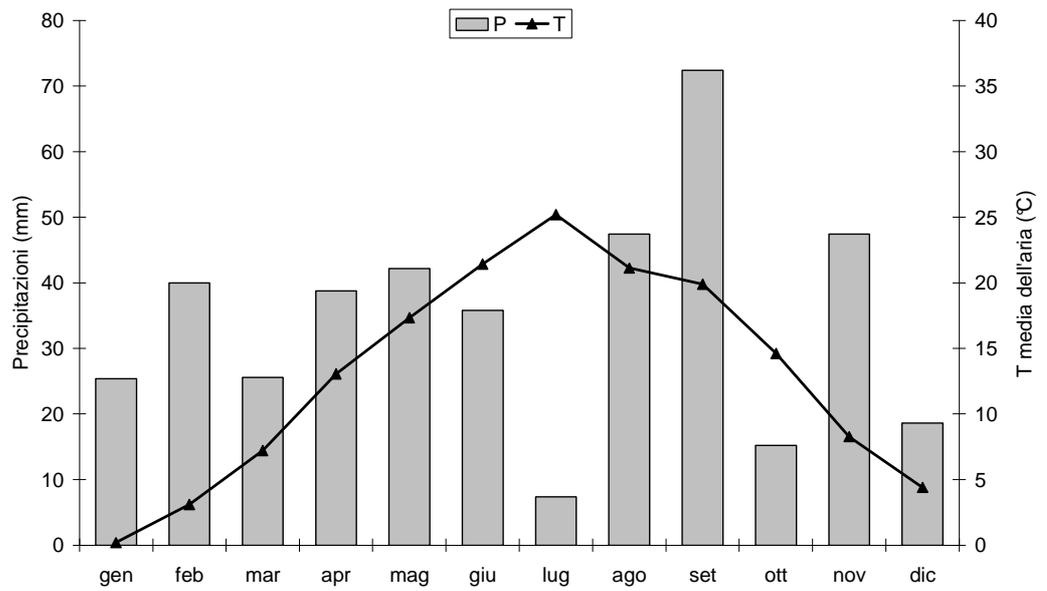


Figura 21 Diagramma termo-udometrico per la stazione meteo di S. Agata a 5 km dal sito di Nonantola. Dati del servizio Idrometeorologico dell'ARPA Emilia-Romagna

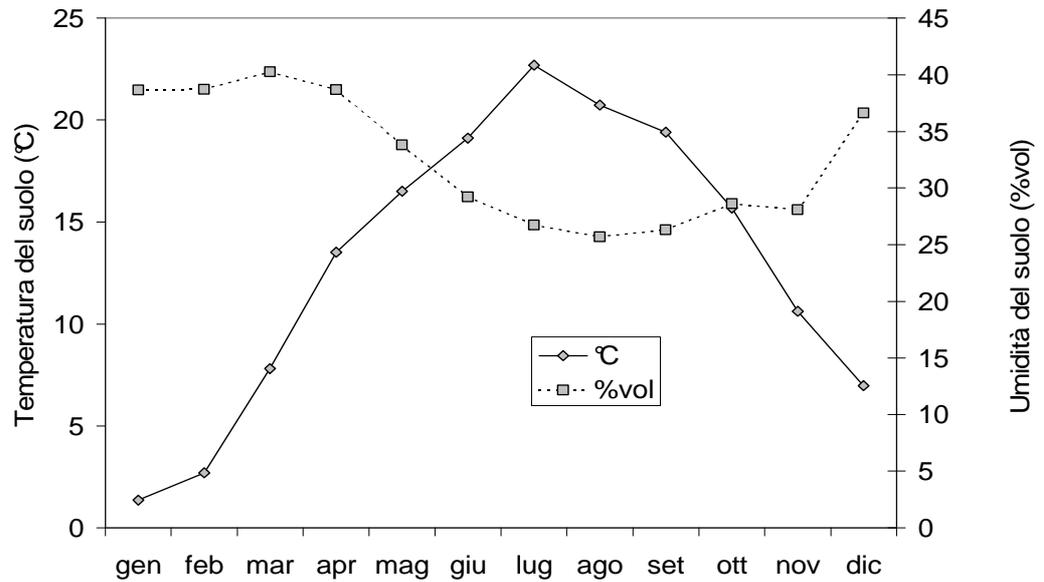


Figura 22 Andamento di temperatura (°C) ed umidità del suolo (% vol) registrate dai sensori presso la torre Eddy. Medie mensili.

5.1.2. La respirazione del suolo e le sue componenti

Il confronto tra integrali giornalieri di flusso calcolati come media delle misure cosiddette di “minimo” e “massimo” e quelli calcolati come media di 4 misure nelle 24 ore (ciclo giornaliero), è riportato in figura 23. Se si escludono alcuni collari nel ciclo del 20/8 la relazione che lega i due valori è molto buona.

La figura 24 riporta gli andamenti di umidità, temperatura e flusso misurati in campo nelle 11 date del 2006, la tabella 5 riporta i valori e i risultati del test t sulle medie. La temperatura del suolo nei trenched plot non ha mostrato differenze significative rispetto al controllo 7 volte su 11, risultando maggiore nei controlli il 17/1, il 31/10 e il 12/12, minore il 27/4. In ben sei occasioni (27/4, 24/5, 20/6, 5/10, 31/10 e 12/12) l'umidità nei trenching è risultata maggiore in modo significativo di quella dei controlli ($p < 0.01$) e in una data (17/1) è risultata minore. Solo in due date la differenza in valore assoluto ha superato il 14%, raggiungendo il 19,2 % il 20 maggio ed il 43,3 % il 24 giugno. Il valore di R_h è variato dal 64% al 94% di R_{soil} e in due casi (28/3 e 7/8) lo ha superato (tab. 5). Tuttavia la differenza risulta statisticamente significativa solo in 5 occasioni nella primavera e in autunno, indicando un contributo della componente eterotrofa del flusso pari a ~ 70 % nel primo caso e ~ 75 % nel secondo. Sono 4 le occasioni in cui in nessuno dei tre parametri misurati si riscontra una differenza significativa, il 14/2, il 28/3, il 7 e 27 /8. Nei primi due casi l'umidità è ai livelli maggiori riscontrati nei secondi due è ai valori minimi e sotto il punto di appassimento calcolato per il sito (Tonon et al.2006).

R_{soil} e R_h rispondono alle variazioni di temperatura per buona parte dell'anno secondo un modello esponenziale (fig. 25a), che spiega da solo quasi il 90 % della variabilità interannuale dei flussi. Pur non essendosi evidenziata una chiara relazione di R_{soil} e R_h con l'umidità del suolo (fig. 25b), ad agosto 2006, in concomitanza della discesa del tenore idrico sotto il punto di appassimento, si è persa la relazione con

la temperatura (fig. 25), infatti mentre le temperature rimangono quasi costanti il flusso ha un crollo (molto più ripido nel controllo che nel treading) per poi risalire nel primo rilievo di ottobre seguendo di nuovo l'umidità.

I due flussi sono stati poi integrati su base annua con le due equazioni esponenziali descritte in tabella 6 sulla base dei dati di temperatura raccolti in continuo dal CNR IBIMET presso la torre Eddy. Il contributo delle radici è stato quindi calcolato come differenza tra R_{soil} e R_h . La figura 26 riporta l'andamento dei flussi così calcolati. La R_{soil} cumulata è di 21,76 t di CO_2 ad ettaro contro le 17,90 t di CO_2 di R_h (pari rispettivamente a 5,94 e 4,88 t di C ha^{-1} anno^{-1}). Con un contributo medio annuo della respirazione microbica pari a circa l'82 % del totale (fig.27). Conseguentemente la R_f risulta pari a 3,87 t di CO_2 ad ettaro corrispondente a 1,05 t di C, con un contributo totale annuo del 17,8 %, che varia da un 10,5 % di gennaio a un 19,8 % di luglio.

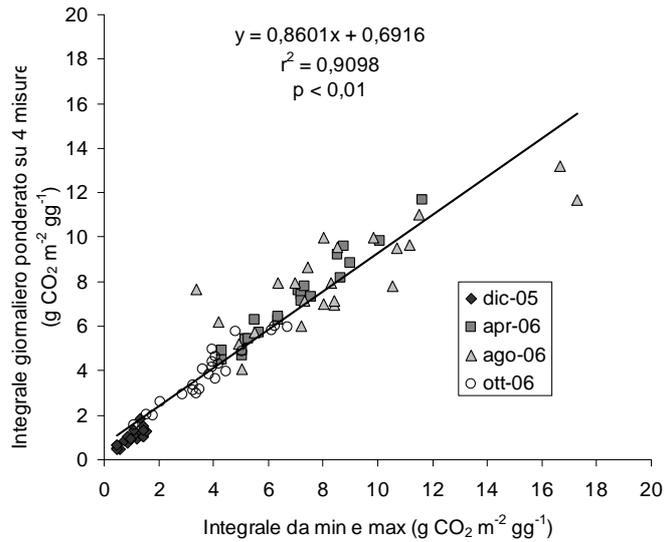


Figura 23 Confronto tra l'integrale giornaliero dei flussi ottenuto usando il valore medio di due misure in ogni collare e quello ottenuto utilizzando 4 misure. I valori delle ascisse sono la media di due misure effettuate nei punti cosiddetti di *min* e di *max*. I valori delle ordinate sono la media di 5 punti per luglio e dicembre 2005 e di 4 per aprile, agosto e ottobre 2006.

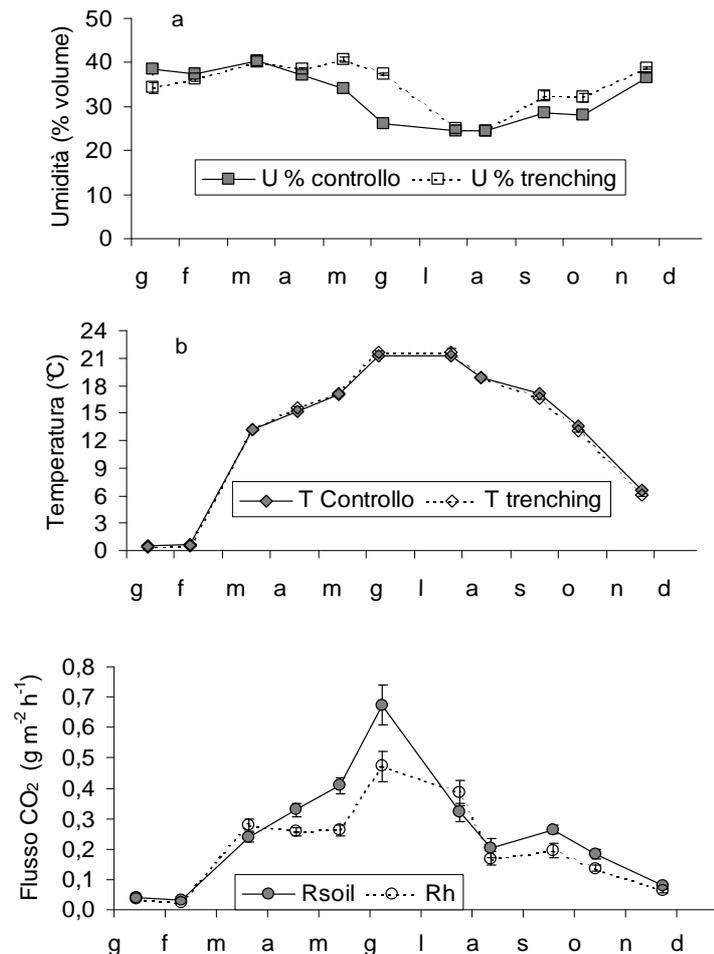


Figura 24 Andamento dell'umidità (a), della temperatura (b) e della respirazione del suolo (c) nel *trenching* (R_{soil}) e nel controllo (R_h) a Nonantola nel 2006. Simboli pieni e linee continue indicano il controllo, simboli vuoti e linee tratteggiate indicano il *trenching*. Ogni punto è la media di due misure (*min* e *max*) effettuate su 11 (R_s) e 12 (R_h) collari. Le barre indicano l'errore standard della media

Data	Tc	Tt	Ttest	Uc	Ut	Ttest	R _{soil}	R _h	Ttest	R _h /R _{soil}
17/01/2006	0,5	0,4	**	38,4	34,2	*	0,04	0,04	ns	0,94
14/02/2006	0,6	0,6	ns	37,4	36,3	ns	0,03	0,03	ns	0,86
28/03/2006	13,1	13,2	ns	40,4	40,1	ns	0,24	0,28	ns	1,17
27/04/2006	15,2	15,6	*	37,0	38,5	**	0,33	0,26	**	0,78
24/05/2006	17,0	17,1	ns	34,1	40,7	**	0,41	0,26	**	0,64
20/06/2006	21,2	21,6	ns	26,0	37,3	**	0,67	0,47	**	0,70
07/08/2006	21,3	21,7	ns	24,6	24,9	ns	0,32	0,39	ns	1,20
27/08/2006	18,9	18,9	ns	24,4	24,4	ns	0,20	0,17	ns	0,82
05/10/2006	17,2	16,6	ns	28,6	32,6	**	0,26	0,20	**	0,74
31/10/2006	13,5	13,1	**	28,1	32,0	**	0,18	0,14	**	0,75
12/12/2006	6,6	6,0	**	36,6	38,8	**	0,08	0,06	ns	0,78

Tabella 5 Confronto tra controllo e *trenched plot*. Temperatura (°C), umidità (% vol) e flusso di CO₂ (g m⁻² h⁻¹) nei controlli (Tc, Uc, R_{soil}) e nei *trenched plot* (Tt, Ut, R_h). R_{soil} e R_h sono la media di due misure (min e max) su 11 e 12 collari rispettivamente. ** = p < 0,01; * = p < 0,05; ns = non significativo.

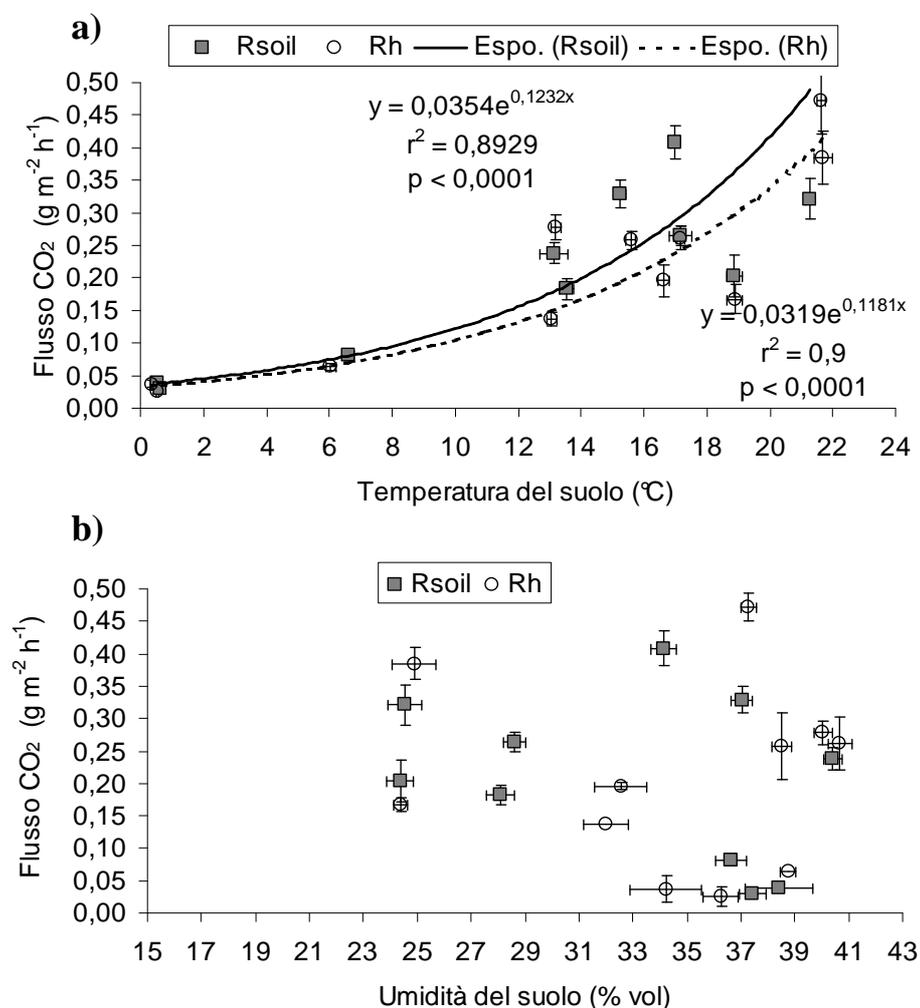


Figura 25 Risposta dei flussi alla temperatura (a) e all'umidità del suolo (b) a Nonantola. R_{soil} misurata nei controlli e R_h misurata nei trenching. Ogni punto è la media di due misure effettuate su 11 (R_{soil}) e 12 (R_h) collari. Le equazioni in (a) sono state usate per integrare il flusso annuale. Le barre indicano l'errore standard della media.

Componente	a	k	r^2	Q_{10}
R_{soil}	0,00354	0,1232	0,893	3,43
R_h	0,389	0,1181	0,900	3,26

Tabella 6 Intercetta a , pendenza k e coefficiente di determinazione r^2 delle equazioni utilizzate per la modellazione dei flussi.

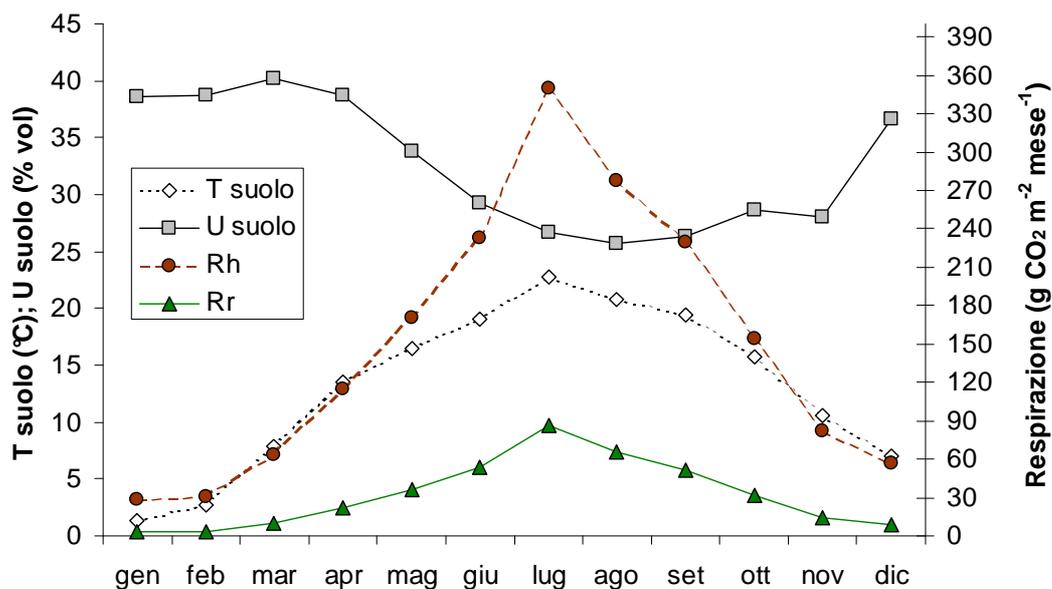


Figura 26 Andamento di R_h e R_r mensili sovrapposti a temperatura ed umidità del suolo. R_h è stato integrato con l'applicazione dell'equazione riportata in fig. 19a. R_r è ottenuto per differenza da R_{soil} a sua volta integrato con l'equazione riportata in fig. 19a.

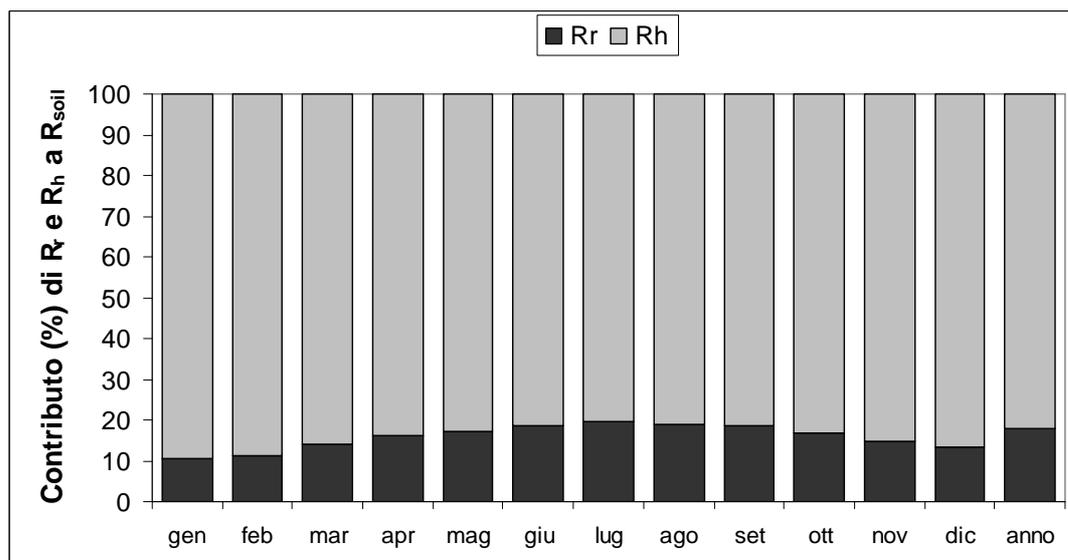


Figura 27 Andamento percentuale delle due componenti di R_{soil} modellizzate a Nonantola durante l'anno di riferimento 2006.

5.1.3 Misura dello scambio netto dell'ecosistema (NEE).

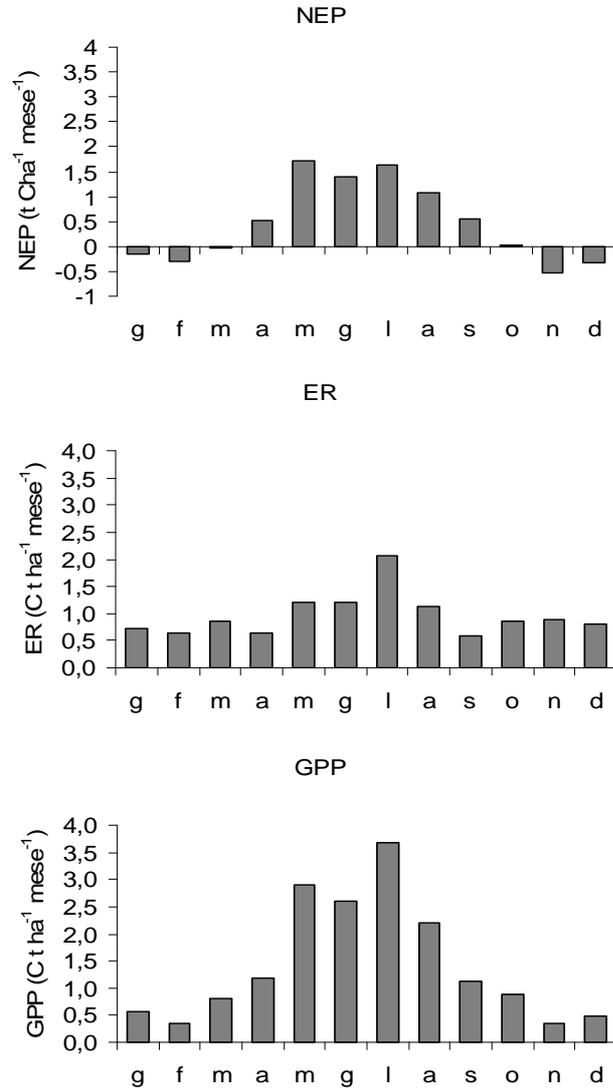


Figura 28 Andamenti dei parametri misurati (NEP) e calcolati (GPP, ER) con il metodo dell'Eddy-covariance nel sito di Nonantola.

La NEP misurata con la tecnica della correlazione turbolenta per l'anno 2006 è stata di **5,51** t di C ha⁻¹ con una ER stimata di **11,64**¹ da cui si ricava la GPP che è risultata pari a **17,15**. Gli andamenti delle tre grandezze sono riportati in figura 28. Sottraendo R_h a ER si ottiene la respirazione autotrofa totale dell'ecosistema (R_{total} , **6,76**) suddivisa in respirazione radicale (R_r , **1,05**) e respirazione autotrofa ipogea (R_a , **5,72**).

¹ D'ora in poi le cifre in neretto si intendono in tonnellate di C per ettaro.

5.1.4 Misura e ripartizione della produzione primaria netta (NPP).

La NPP da inventario è risultata pari a **9,66** t di C ha⁻¹, costituita per il 54% da BNPP (**5,25** t di C ha⁻¹) e per il 46% da ANPP (**4,41** t di C ha⁻¹), il dettaglio delle singole componenti la produzione è riportato in tab.7 e in figura 29. L'incremento legnoso del fusto e dei rami (Δw) è stato di **2,75** t di C ha⁻¹ e la produzione di foglie, raccolte alla caduta (Δl) di **1,66**.

La BNPP è risultata composta per il 38,6 % dall'incremento delle radici (ΔC_r , **2,02** t di C ha⁻¹), suddiviso in radici grossolane più le radici della rinnovazione (Δc_{root} , **1,38** t di C ha⁻¹), e incremento delle radici fini (Δf_{root} , **0,64** t di C ha⁻¹). Il restante 61,4 % da rizodeposizione ($Litter_{root}$, **3,22** t di C ha⁻¹) stimata con il metodo del TBCA (eq. 6).

L'applicazione della eq. (11) per la stima della rizodeposizione netta con metodo isotopico, rapportato alla profondità del suolo (60 cm) interessata dall'esperimento e tenuto conto della *bulk density* del suolo (1,33) fornisce un valore di C rizodeposto pari **3,27** t ha⁻¹.

La produttività netta dell'ecosistema calcolata come la differenza tra NPP e Rh (eq. 7) è risultata di **4,78** t di C ha⁻¹. L'allocazione totale di carbonio al suolo, è risultata pari a **6,3** t di C ha⁻¹.

Nr	Componente	Valore (t C ha ⁻¹ anno ⁻¹)	Metodo
1	R_{soil}	5,94	IRGA+cameretta (controlli)
2	R_h	4,88	IRGA+cameretta (trenching)
3	R_r	1,06	Differenza (1 - 2)
4	Δw popolamento adulto	2,10	Inventario
5	Δw rinnovazione	0,65	Inventario
6	Δl	1,66	Littertrap
7	ANPP	4,41	Somma (4 + 5 + 6)
8	Δc_{root} popolamento adulto	0,75	0,2*(4)
9	Δc_{root} rinnovazione	0,63	0,97*(2)
10	Δf_{root}	0,64	Carotaggi
11	ΔC_r	2,03	Somma (8 + 9 + 10)
12	$Litter_{root}$	3,22	TBCA (1 - 3 - 6)
13	TBCA	6,30	TBCA (1 - 6 + 11)
14	BNPP	5,25	Somma (11 + 12)
15	NPP	9,66	Somma (7 + 14)
16	NEP	4,78	Differenza (15 - 2)
17	NEP*	5,51	Eddy covariance (-NEE)

Tabella 7 Produzione primaria netta e sua divisione nel comparto epigeo (ANPP) ed ipogeo (BNPP) dell'ecosistema. R_{soil} = respirazione totale del suolo; R_h = respirazione eterotrofa; R_r = respirazione radicale; Δw = incremento degli organi legnosi ipogei; Δl = la produzione di foglie; Δc_{root} = incremento delle radici grosse; Δf_{root} = incremento delle radici fini; ΔC_r = incremento di carbonio nelle radici; TBCA = allocazione totale alle radici; $Litter_{root}$ è la rizodeposizione, valore al lordo di Δc_{soil} ; NEP = Produttività netta dell'ecosistema.

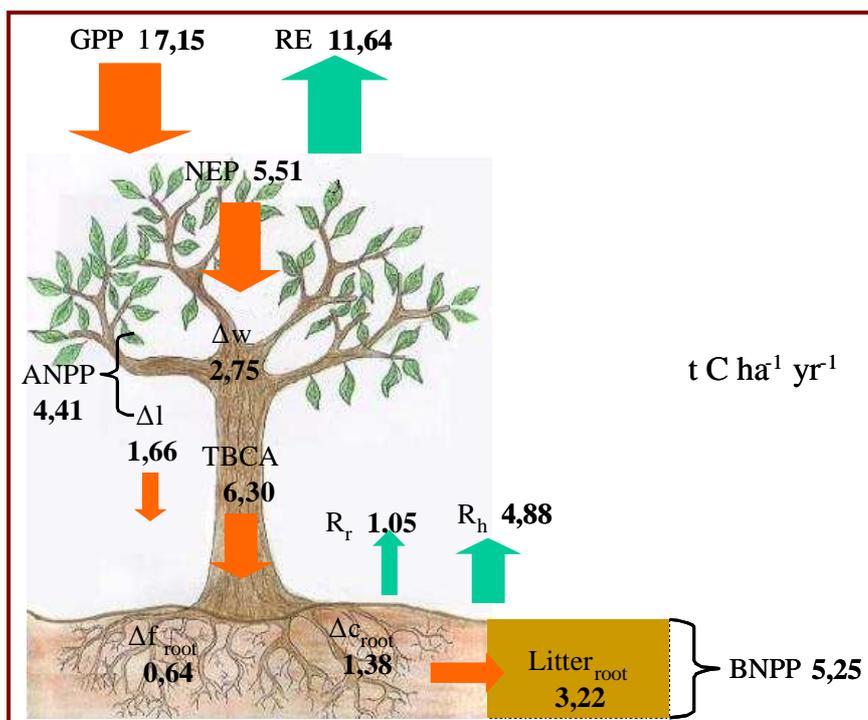


Figura 29 Schema dei flussi e dei comparti nel rimboscimento. Le frecce indicano i flussi, le cifre indicano le quantità e sono espresse in tonnellate di C ettaro all'anno. GPP = Produzione primaria lorda; RE = respirazione dell'ecosistema. Per le altre sigle si si rimanda alla tabella 6.

5.2. Il frutteto – Cadriano

5.2.1. Caratteristiche climatiche durante il periodo di studio.

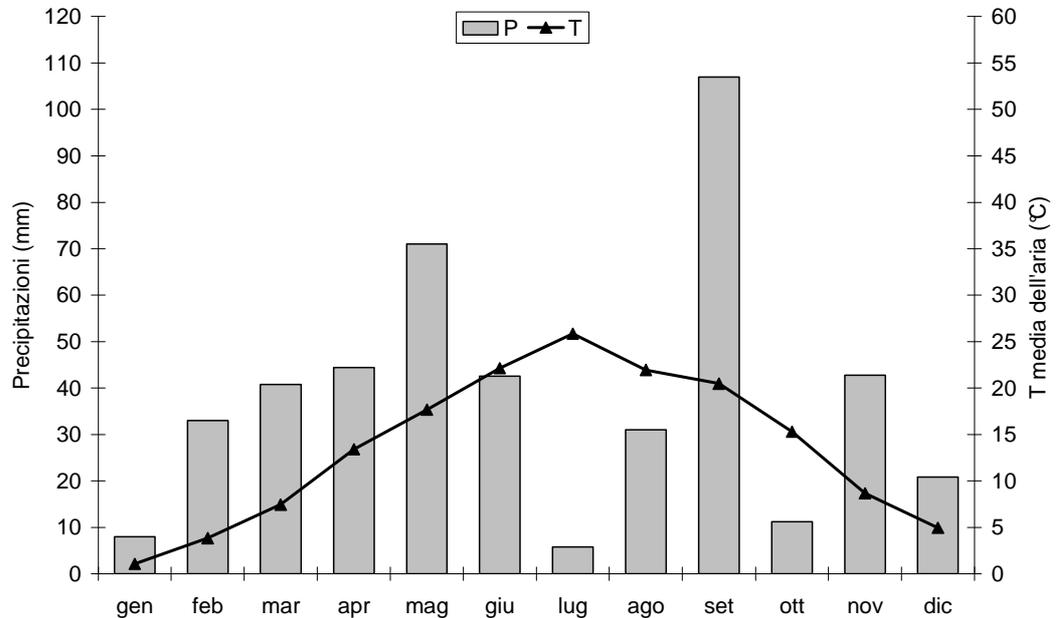


Figura 30 Diagramma termo-udometrico di Cadriano. Dati registrati dalla stazione meteo installata presso il sito sperimentale. (Addcon Telemetry GmbH, dati forniti dal Dott. Marco Zibordi).

Il 2006, con 458 mm di precipitazioni è stato un anno meno piovoso della media, ma decisamente più caldo, con una temperatura media annua registrata di 13,6 °C contro i 12°C di quella media riportata per la zona (Ceccon 2007). La temperatura media dell'aria è variata tra gli 1,1 °C di gennaio e i 25,8 di luglio, le precipitazioni hanno avuto due minimi in luglio ed ottobre e due picchi in maggio e settembre. Secondo i criteri di Walter e Lieth (1967) ciò dovrebbe aver portato al verificarsi di due periodi di limitazione idrica nel suolo non raggiunto dall'irrigazione: il primo e più lungo da giugno ad agosto, il secondo ad ottobre (fig. 30).

Gli effetti della siccità estiva, nonostante l'irrigazione localizzata, sono stati riscontrati anche durante la misura puntuale dell'umidità del suolo e dei flussi di CO₂.

5.2.2. La respirazione del suolo e le sue componenti

Il confronto tra integrali giornalieri di flusso calcolati sulla media delle misure cosiddette di “minimo” e “massimo” e quelli calcolati sulla media ponderata di 4 misure nelle 5 ore, è riportato in figura 31. Se si escludono alcuni collari nel ciclo del 7/8 la relazione che lega i due valori è molto buona.

La figura 32 riporta gli andamenti di umidità, temperatura e flusso misurati in campo nelle 10 date del 2006, la tabella 7 riporta i valori e i risultati del test t sulle medie. La temperatura del suolo nei *trenched plot* non ha mai mostrato differenze significative rispetto a quella nel controllo. In tre occasioni (25/1, 27/2, 27/3) l'umidità nei *trenching* è risultata lievemente minore a quella dei controlli e in un solo caso di poco maggiore (4/7). Ciò è in contrasto con quanto la logica spinga a pensare (e cioè che il mancato assorbimento radicale comporti un aumento di contenuto idrico del suolo nelle aree prive di radici vive), ma può essere spiegato dalla presenza di un'irrigazione a goccia che crea grosse differenze nel contenuto idrico dei primi centimetri di profondità nello spazio di poche decine di centimetri lineari.

Il valore di R_h è variato dal 39% al 86% di R_{soil} (tab. 7). Tuttavia nelle tre date estive (4 e 20/7, 7/09) caratterizzate da valori di umidità vicini al punto di appassimento per il sito (15-20% in volume) la differenza risulta statisticamente non significativa. In queste tre date, nonostante la presenza dell'irrigazione, i valori medi di umidità registrati nei primi 6 cm sono stati molto bassi (rispettivamente 22, 18,3 e 18,5 in % di volume), con singoli valori che hanno raggiunto il 17 % nella prima data ed il 14% nelle successive.

La variabilità interannuale è risultata essere spiegata in parte dalla temperatura con un modello esponenziale sia per R_{soil} ($r^2 = 0,65$) che per R_h ($r^2 = 0,69$) (figura 33a) ma, eliminando dal dataset i valori registrati con umidità limitante, il modello spiega fino al 97 e al 89 % della variabilità rispettivamente (figura 33b). La relazione tra flusso

respiratorio ed umidità del suolo, al contrario è risultata molto bassa (fig. 34)

Non avendo a disposizione misurazioni in continuo dei dati di umidità del suolo, non è stato possibile integrare i dati con un modello che prevedesse entrambe le variabili in entrata. D'altra parte la sola temperatura non bastava a spiegare il flusso per tutto l'anno a causa dei valori estivi estremamente limitanti. Per questo motivo i dati sono stati integrati a valori annuali considerando i valori giornalieri come rappresentativi del mese. I dati mensili, espressi per m^2 di suolo, sono stati poi sommati per calcolare il flusso annuale e trasformati per ettaro in base alla superficie di suolo rappresentata dalla striscia diserbata, presente sotto gli alberi (pari a circa il 47% di quella totale).

I dati ottenuti indicano valori di **2,32** t di C ha^{-1} , di cui **1,31** a carico della componente eterotrofa (58,1 %) e **1,01** a carico di quella autotrofa (41,9%)(fig. 30).

Gli andamenti di R_h e R_r , stimata per differenza, sono riportati in figura 35. Si vede molto bene come entrambi i flussi crescano parallelamente alla temperatura nella prima parte dell'anno, con un comportamento che comincia a differenziarsi tra il 27/3 ed il 4/5, quando ad un discreto aumento di temperatura ed un contemporaneo calo dell'umidità del suolo, R_h rimane quasi costante mentre R_r aumenta passando dal 23% al 47% del flusso totale (fig.31). Il 25/5 i flussi seguono ancora la temperatura, ma dal 4/7, in concomitanza con la discesa dell'umidità verso valori prossimi al punto di appassimento, il comportamento dei due flussi si differenzia: R_r cala seguendo l'umidità fino al 20/7 (ultimo rilievo prima della raccolta, avvenuta il 17/8) per poi risalire indipendentemente da essa triplicando il proprio valore il 7/9. Il culmine del flusso autotrofo è stato raggiunto il 12/10, dopodiché è calato insieme alla temperatura. R_h invece dal 4/7, segue sempre la temperatura indipendentemente dall'umidità, fino alla fine dell'anno.

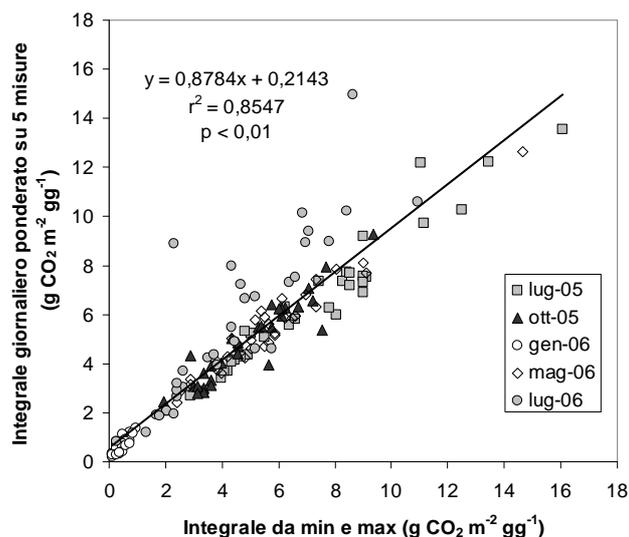


Figura 31 Confronto tra l'integrale giornaliero dei flussi ottenuto usando il valore medio di due misure in ogni collare e quello ottenuto usando 5 misure per collare. I valori delle ascisse sono la media di due misure effettuate nei punti cosiddetti di *min* e di *max*. I valori delle ordinate sono la media di 5 punti.

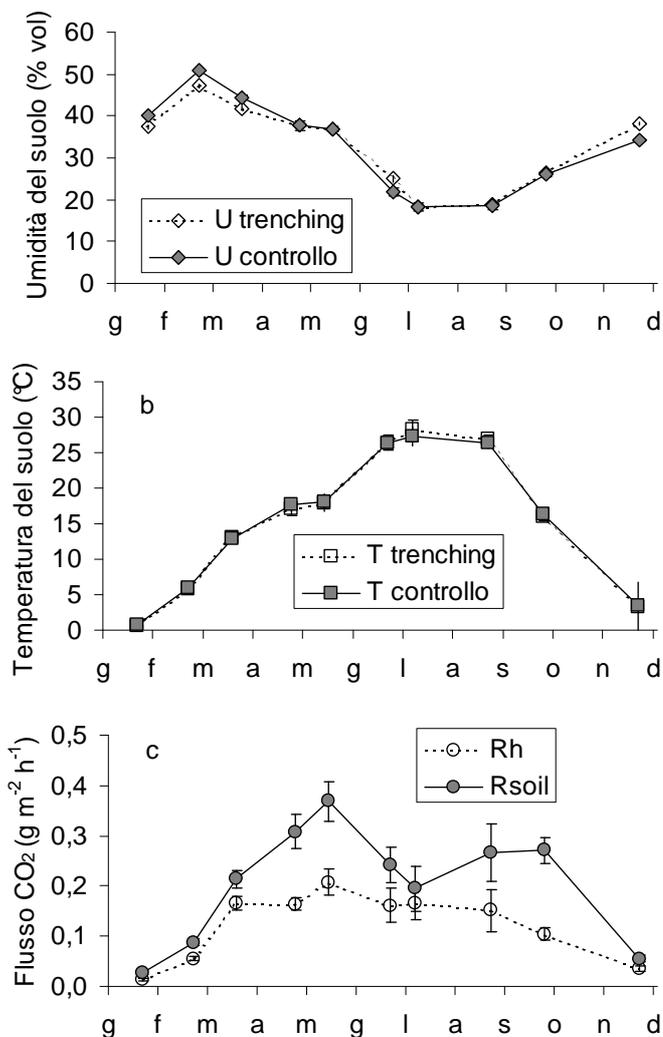


Figura 32 Andamento dell'umidità (a), della temperatura (b) e della respirazione del suolo (c) nel *trenching* (R_{soil}) e nel controllo (R_h) a Cadriano nel 2006. Simboli pieni e linee continue indicano il controllo, simboli vuoti e linee tratteggiate indicano il *trenching*. Ogni punto è la media di due misure (*min* e *max*) effettuate su 8 (R_s) e 8 (R_h) collari. Le barre indicano l'errore standard della media.

Data	Tc	Tt	t _{test}	Uc	Ut	t _{test}	R _{soil}	R _h	t _{test}	R _r	R _h /R _{soil}
25/01/2006	0,7	0,5	ns	40,2	37,4	**	0,03	0,01	**	0,01	0,52
27/02/2006	5,9	5,8	ns	50,9	47,1	**	0,09	0,06	**	0,03	0,63
27/03/2006	12,9	13,0	ns	44,5	41,8	**	0,21	0,17	*	0,05	0,77
04/05/2006	17,6	17,1	ns	37,7	38,0	ns	0,31	0,16	**	0,14	0,53
25/05/2006	18,0	18,0	ns	36,9	36,8	ns	0,37	0,21	**	0,16	0,56
04/07/2006	26,4	26,4	ns	22,0	25,0	**	0,24	0,16	ns	0,08	0,67
20/07/2006	27,3	28,2	ns	18,3	18,3	ns	0,19	0,17	ns	0,03	0,86
07/09/2006	26,4	26,9	ns	18,5	19,0	ns	0,27	0,15	ns	0,11	0,57
12/10/2006	16,3	16,0	ns	26,1	26,5	ns	0,27	0,10	**	0,17	0,39
12/12/2006	3,4	3,2	ns	34,4	38,2	ns	0,06	0,04	*	0,02	0,63

Tabella 8 Confronto tra controllo e trenched plot a Cadriano. Temperatura (°C), umidità (% vol) e flusso di CO₂ (g m⁻² h⁻¹) nei controlli (Tc, Uc, Rsoil) e nei trenched plot (Tt, Ut, Rh). Rsoil e Rh sono la media di due misure (min e max) su 8 collari. Rr è ottenuta per differenza tra Rsoil e Rh. ** = p < 0,01; * = p < 0,05; ns = non significativo.

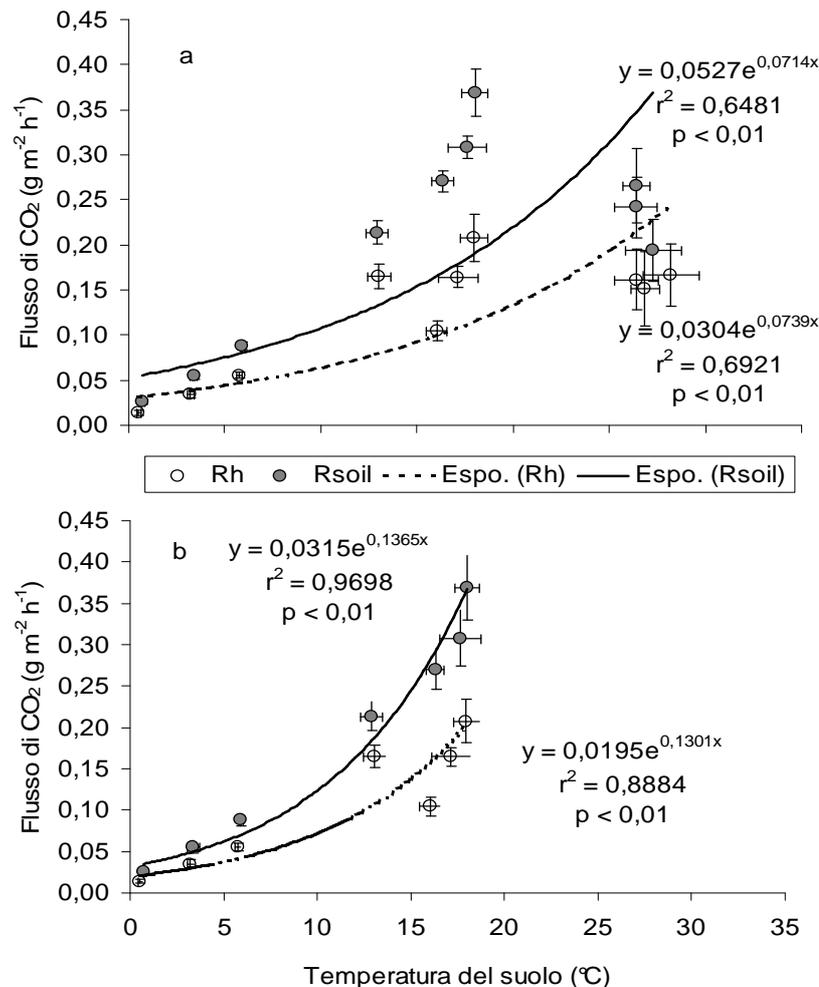


Figura 33 Risposta dei flussi respiratori del suolo (valori giornalieri) alla temperatura del suolo a Cardiano utilizzando tutte le date (a) ed escludendo le tre date caratterizzate da umidità limitante (b). R_{soil} misurata nei controlli e R_h misurata nei trenching. Ogni punto è la media di due misure effettuate su 8 (R_{soil}) e 8 (R_h) collari. Le barre d'errore indicano l'errore standard.

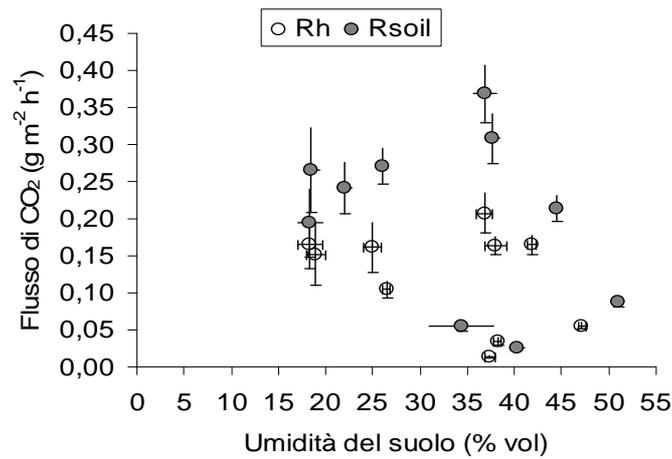


Figura 34 Risposta dei flussi all'umidità del suolo a Cadriano. R_{soil} misurata nei controlli e R_h misurata nei trenching. Ogni punto è la media di due misure effettuate su 8 (R_{soil}) e 8 (R_h) collari. Le barre d'errore indicano l'errore standard.

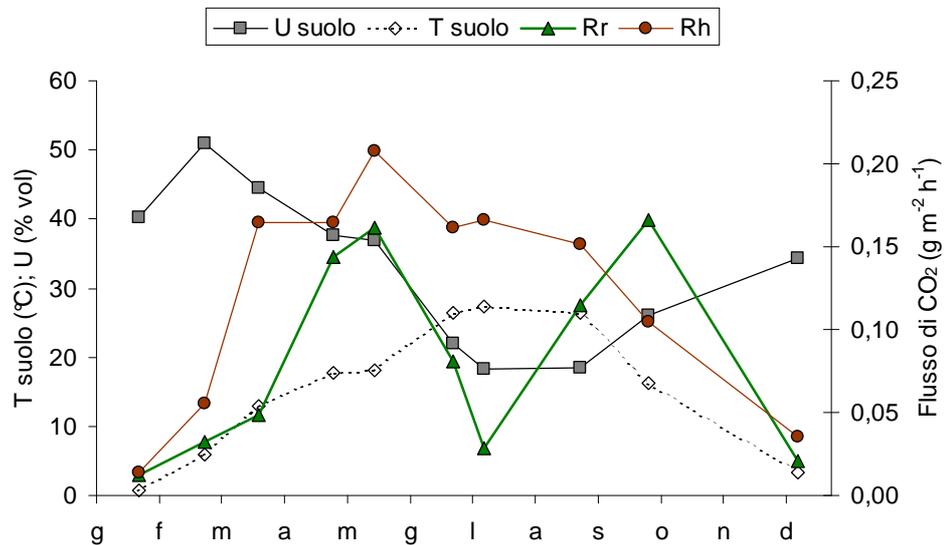


Figura 35 Andamento di R_h e R_r sovrapposti a temperatura ed umidità del suolo. R_r è ottenuto per differenza da R_{soil} nei giorni in cui sono stati effettuati i rilievi. Temperatura ed umidità sono quelle misurate nei controlli.

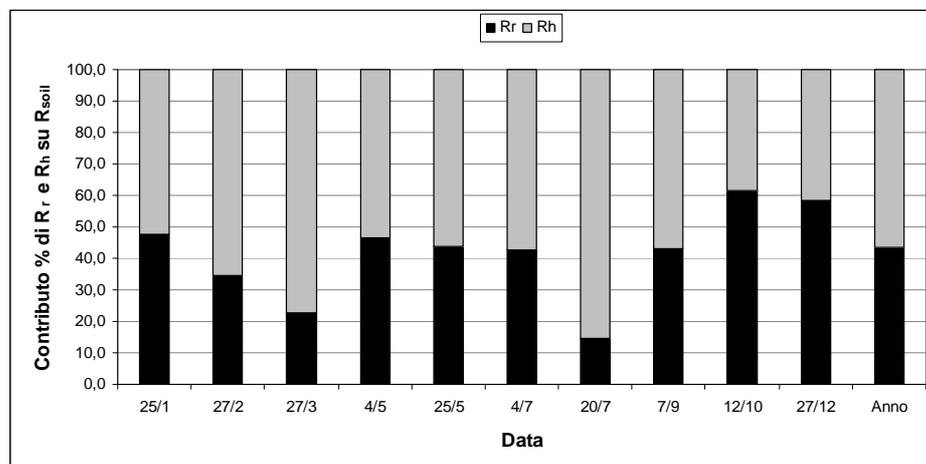


Figura 36 Contributo percentuale delle componenti di R_{soil} nelle 10 giornate tipo e su base annua nel 2006.

5.2.3 Misura dello scambio netto della parte epigea (NAE).

Lo scambio netto di CO₂ della parte epigea del frutteto, misurato su tre piante in 6 momenti successivi (maggio, giugno, luglio, agosto, settembre e ottobre) è stato calcolato sulla base dei dati di assimilazione netta giornaliera (quando la PAR era positiva) e di respirazione notturna (quando la PAR era nulla), scegliendo un valore soglia cautelativo di 30 W m⁻².

Il modello temperatura – flusso di CO₂ m⁻² per il calcolo della respirazione (Butler e Landsberg 1981) è stato applicato quindi al periodo “invernale” (gennaio – aprile; novembre – dicembre). Il risultato in valore assoluto della differenza tra assimilazione e respirazione è riportato in figura 37, mese per mese. Il contributo del mese di aprile alla fissazione netta annuale è stato calcolato come il 5 % di quello del resto dell’anno. Il mese di novembre è stato considerato neutro ai fini del bilancio. Il risultato è un valore di NAE annuale pari a **10,7 ± 1,3 t di C ha⁻¹**. Questi valori derivano dal prodotto degli scambi gassosi delle singole piante per il numero di individui ad ettaro derivato dal sesto d’impianto (2632).

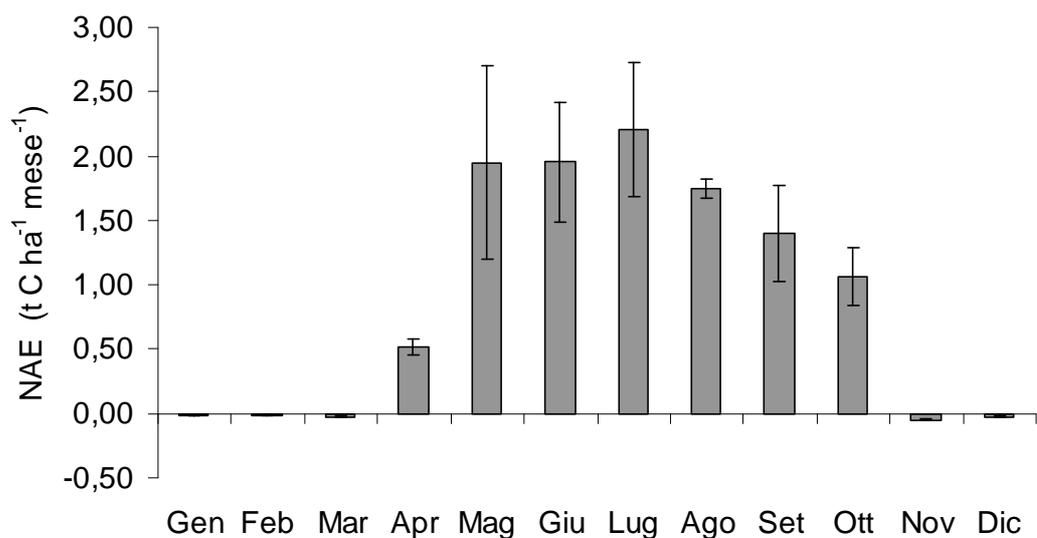


Figura 37 Andamento dello scambio netto della parte epigea (NAE) nel 2006. Le barre indicano la deviazione standard della media, n = 3.

5.2.4 Misura e ripartizione della produzione primaria netta (NPP).

La produzione primaria netta del frutteto (NPP) è risultata pari a **9,71 ± 1,3** t di C ha⁻¹ (media ± d.s; le unità di misura verranno tralasciate nel resto del paragrafo). La sua ripartizione tra epigea ed ipogea è riassunta in tabella 8 e schematizzata nella figura 38.

L'ANPP (**5,40 ± 0,76**), pari al 59,2% della NPP, è costituita per un 42 % dalla produzione di frutti (Fr, **2,27 ± 0,19**), della restante parte il 50 % è costituito dall'incremento degli organi permanenti (Δw , **1,54 ± 0,42**) ed il resto dalla produzione di foglie (Δl , **0,88 ± 0,18**) e produzione di nuovi rami (Pr, **0,71 ± 0,34**). La lettiera fogliare è segnata come flusso verso il suolo e dentro l'ecosistema nella figura 32, mentre i residui di potatura sono considerati in uscita dal sistema in quanto nel frutteto sperimentale venivano asportati dal sistema e trinciati al di fuori dell'area occupata dai filari. Alla luce di ciò la Produttività Netta dell'Ecosistema (NEP) è risultata pari a **5,42 ± 1,05**.

Il flusso di C verso le radici (BCA), risultante dalla sottrazione del carbonio fissato nella parte epigea (ANPP) da quello assimilato (NAE), è uguale a **5,32 ± 0,55**, pari al 49,7% di NAE. Il C immobilizzato nelle radici grosse (Δc_{root}), calcolato per mezzo delle relazioni allometriche costruite *ad hoc*, è risultato pari **0,24 ± 0,14**. Il campionamento tramite *soil coring* delle radici fini, ha rilevato un incremento nella densità radicale (Δf_{root}), di **1,01**, valore riferito alla superficie di suolo diserbata e non differenziato per singola pianta. Sottraendo al flusso di C verso le radici la respirazione radicale (pari in media a **1,01**), è stato possibile calcolare la BNPP, pari a **4,32 ± 0,55**. Per il calcolo della rizodeposizione ($Litter_{root}$, **3,06 ± 0,44**) si è proceduto per differenza, sottraendo alla BNPP l'incremento totale di C nelle radici (ΔC_r , **1,25 ± 0,14**). Il risultato dell'applicazione della eq. (11) per la stima della rizodeposizione netta con metodo isotopico, rapportato alla profondità del suolo (60 cm) interessata

dall'esperimento, considerata la *bulk density* del suolo di $1,55 \text{ t m}^{-3}$ e riportato alla superficie interessata dai filari diserbati, ha stimato una rizodeposizione netta di **2,37** t di C ha^{-1} .

5.1.5 Stima e ripartizione della NPP tramite l'approccio della TBCA

Come ulteriore riprova ho ritenuto di poter applicare l'eq. (6), già applicata nel rimboschimento, anche alla striscia diserbata del frutteto:

$$Litter_{root} = R_{soil} - R_r - Litter_{leaf} + \Delta litter C + \Delta soil C \quad (6)$$

in cui R_{soil} è la respirazione del suolo, R_r è la respirazione radicale, e $Litter_{leaf}$ è la lettiera fogliare, $\Delta litter C$ è l'incremento di lettiera superficiale, $\Delta soil C$ l'incremento di carbonio nella frazione minerale del suolo. Per il frutteto, è stato assunto che non vi sia accumulo di lettiera al suolo e quindi che $\Delta litter C$ sia pari a zero, mentre il valore di $\Delta soil C$ è stato stimato pari a **0,8** t di C ha⁻¹ anno⁻¹ (unità di misura lasciata implicita d'ora in avanti nel testo), in base alla all'aumento nella concentrazione totale di carbonio nel suolo dall'impianto (Simoni 2001) al 2007. Utilizzando questo approccio, la stima della rizodeposizione è pari a **1,27 ± 0,18**.

Adottando il procedimento utilizzato nel sito forestale, la BNPP ricostruita da questo valore di $Litter_{root}$ diventa **2,52 ± 0,09**, pari al 31,8 % della NPP che diventa **7,92 ± 0,77**. La produzione netta dell'ecosistema (NEP) che ne risulta è **6,61 ± 0,77**. Il flusso totale alle radici (BCA) ottenuto dalla somma di BNPP e respirazione radicale (R_r), diventa pari a **3,53 ± 0,09**. La ripartizione generale della NPP sulla base dell'approccio del TBCA è riassunta in tabella 9 e schematizzata in fig. 39

Nr	Comparto/flusso	media	ds	% di NPP	Determinazione
1	R_{soil}	2,32			IRGA+camerette(controlli)
2	R_h	1,31			IRGA+camerette(trenching)
3	R_r	1,01			Differenza (1 - 2)
4	ΔC_{soil}	0,84			Incremento medio dall'impianto
5	Δw	1,54	0,42	19,4	Inventario
6	Pr	0,71	0,26	8,9	Inventario
7	Δl	0,88	0,18	11,1	Raccolta
8	Fr	2,27	0,19	28,7	Raccolta
9	ANPP	5,40	0,76	68,2	Somma (5 + 6 + 7+ 8)
10	ΔC_{root}	0,24	0,14	3,1	Inventario
11	Δf_{root}	1,01		12,8	Carotaggio
12	ΔC_r	1,25	0,14	15,8	Somma (9 + 10)
13	$Litter_{root}$	1,27	0,18	16,0	TBCA (1 - 3 - 7 + 4)
14	BNPP	2,52	0,09	31,8	Somma (
15	BCA	3,53	0,09		Somma (3 + 14)
16	NPP	7,92	0,77		Somma (9 + 14)
17	NEP	6,61	0,77		Differenza (16 - 8)

Tabella 10 Ripartizione della NPP in base all'approccio della TBCA. R_{soil} = respirazione totale del suolo; R_h = respirazione microbica; R_r = respirazione radicale; ΔC_{soil} = incremento in carbonio organico del suolo; Δw = incremento organi legnosi epigei; Δl produzione di foglie; Pr = produzione di nuovi rami (equivalente alla potatura); Fr = produzione di frutti; BCA = allocazione al sottosuolo; ΔC_{root} = incremento delle radici grosse; Δf_{root} = incremento delle radici fini; ΔC_r = incremento totale di C nelle radici; $Litter_{root}$ = rizodeposizione; NEP = Produttività netta dell'ecosistema. Valori espressi in $t\ C\ ha^{-1}\ anno^{-1}$. ds = deviazione standard (n = 3). I valori che non hanno deviazione standard sono stimati sulla superficie totale dei filari e non per singole piante.

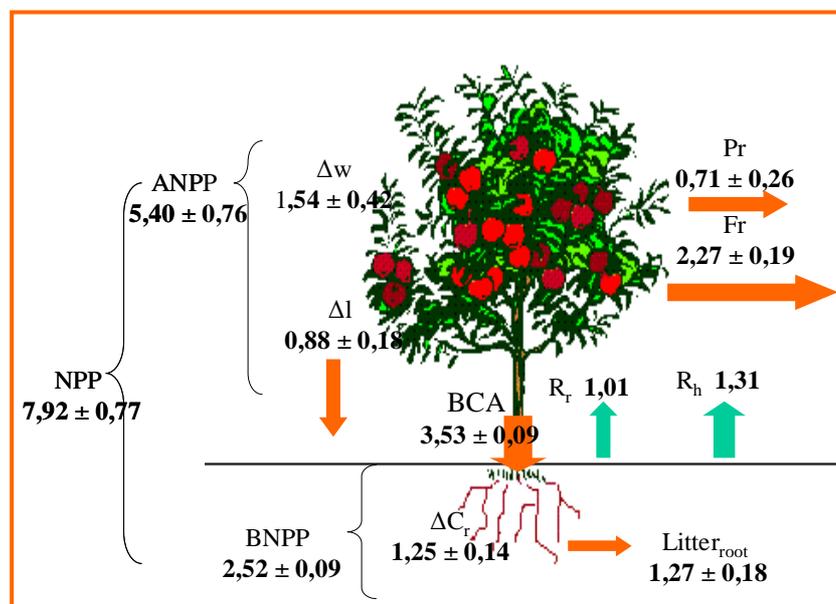


Figura 39 Schema dei flussi e dei compartimenti nel frutteto come calcolato in base all'approccio della TBCA. Le frecce indicano i flussi e le asportazioni; le cifre indicano le quantità. Valori espressi in $t\ C\ ha^{-1}\ anno^{-1}$. Per le sigle si rimanda alla tabella 9.

6 DISCUSSIONI

6.1 Flussi di carbonio nel rimboschimento

La respirazione del suolo e le sue componenti

Su base annuale, il modello esponenziale descrive bene il rapporto tra temperatura ed flusso sia per la componente eterotrofa che per quella autotrofa stimata per differenza (fig.40). I modelli hanno confermato la maggior sensibilità di quest'ultima, caratterizzata da un Q_{10} di 6,18, quasi doppio rispetto a quello della prima (tab. 11) e più alto sia del Q_{10} di 3,9 calcolato sulla respirazione della rizosfera in un bosco di faggio del nord della Francia (Epron et al. 2001) che del 4,6 calcolato da Boone et al. (1998) in un bosco misto di latifoglie del Massachussettes. Saiz e colleghi (2006) riportano valori superiori a 5 in boschi artificiali di abete di Sitka in Irlanda su terreni ex-coltivi. Questi valori di Q_{10} sono comunque più alti di quelli che caratterizzano le radici isolate e che si aggirano attorno a 2 (Atkin e Tjoelker 2003), poiché sono il risultato dell'effetto combinato di più variabili. La risposta della respirazione autotrofa misurata col metodo del *trenching* alla temperatura non è quella delle sole radici, ma anche quella dei microrganismi associati alle radici (micorrize) e quella proveniente dalla decomposizione degli essudati e della lettiera radicale fresca (Boone et al. 1998). Ulteriori variazioni nel tasso di respirazione della rizosfera possono essere dovuti anche alle dinamiche della biomassa delle radici fini e all'attività enzimatica ad essa associata. Essendo questi fenomeni non indipendenti dalla temperatura, il loro effetto può confondere la reale risposta delle radici (Boone et al. 1998; Davidson et al. 2006).

L'approccio della ripartizione della respirazione del suolo (R_{soil}) con il metodo del *trenching*, ha portato, a scala annuale, ad un rapporto R_h/R_{soil} di 0,82, più alto di quanto riportato in letteratura. Il contributo della respirazione eterotrofa alla respirazione totale in ecosistemi

forestali varia tra il 10 e il 90 % con valori medi del 50-55 % (Hanson et al. 2000). Subke et al. (2006) riportano valori di R_h/R_{soil} per foreste decidue in ambiente temperato, stimati con lo stesso metodo, compresi tra 0,37 e 0,67. D'altra parte, Rey et al (2002) in un ceduo di cerro del centro Italia, caratterizzato da clima più marcatamente Mediterraneo, calcolano un rapporto di 0,77 a scala annuale ed attribuiscono un così basso contributo delle radici al flusso totale agli effetti di una ceduazione avvenuta l'anno precedente (minore flusso di zuccheri verso le radici a causa della ridotta NEE e NPP e stimolo di R_h con il surplus di lettiera superficiale e radicale conseguente al taglio e all'allestimento del legname). Melillo et al. (2002), riportano un contributo medio di R_h pari all'80% in un popolamento misto di latifoglie del Massachussettes. La meta-analisi di letteratura compiuta da Subke e colleghi (2006), analizzando studi che hanno separato le componenti della R_{soil} con diversi approcci, evidenzia come il valori di R_h/R_{soil} siano in generale ben correlati con la R_{soil} , decrescendo all'aumentare di questa. I valori misurati a Nonantola rientrano fra quelli degli ecosistemi boreali e temperati.

Un così alto contributo relativo della respirazione eterotrofa può essere in parte spiegato dalla perturbazione arrecata dall'approccio di ripartizione. Il *trenching* causa un immediato aumento di necromassa radicale nei *trenched plots* che si risolve in un surplus di substrato per i decompositori rispetto ai *plots* di controllo. Questo effetto è stato quantificato in numerosi studi con determinazione diretta dei tassi di decomposizione radicale (campionamento della biomassa radicale all'inizio e alla fine dell'esperimento di esclusione radicale ed impostazione di un esperimento parallelo con *litterbags* radicali) o applicando tassi di decomposizione desunti dalla letteratura. Epron et al (1999) calcolarono direttamente il tasso di decomposizione della lettiera radicale come descritto nell'esempio, e determinarono un contributo del 24% su R_h in una foresta di faggio di 30 anni in Francia. Molto recentemente Ngao et al. (2007) hanno calcolato un contributo della

decomposizione radicale al flusso eterotrofico di CO_2 in *trenched plots* pari al 42% in un bosco misto di faggio di 20 anni di età, nel nord-est della Francia, correggendo R_r/R_{soil} da 0,8 a 0,45. Mediamente però le correzioni per il surplus di lettiera radicale portano ad un abbassamento del 12 % di R_h (Subke et al. 2006). L'effetto del surplus di lettiera radicale viene minimizzato dalla posposizione nel tempo dell'inizio delle misure effettuate nelle parcelle trattate. Nel nostro caso i *trenched plots* sono stati eseguiti sette mesi prima dell'inizio delle misure. Il flusso dal suolo è stato comunque monitorato in quel periodo mostrando un rapporto R_r/R_{soil} superiore a 1 da giugno a novembre (dati non mostrati).

Un ulteriore effetto perturbativo del metodo sulla stima del flusso, come si è detto nell'introduzione, è quello sull'ambiente abiotico del suolo, legato all'aumento di contenuto idrico a causa della mancata suzione radicale. Questo fenomeno, direttamente verificato nel sito di Nonantola con la misura dell'umidità dell'orizzonte superficiale del suolo in occasione delle misure di flusso, è risultato significativo nel 60% delle occasioni. Ngao et al. (2007) hanno quantificato questa sovrastima in un 5% a livello annuo, con punte del 7% durante la stagione vegetativa quando la differenza in tenore idrico tra il controllo e il trattamento aveva mostrato valori assoluti maggiori. In mancanza di dati specifici del sito riguardo i tassi di decomposizione della lettiera radicale e considerati i mesi intercorsi dall'esecuzione del *trenching* all'inizio del periodo di riferimento, non ho ritenuto di adottare una correzione con dati di letteratura. Inoltre una correzione del 5 % per l'errore imputabile alla differenza di umidità avrebbe cambiato di poco il bilancio dei flussi.

Sia la respirazione della rizosfera che quella eterotrofa sono risultate legate positivamente alla produzione primaria lorda (GPP) stimata con l'eddy covariance (fig.36). Il legame tra respirazione radicale e totale e fotosintesi, come conseguenza del trasporto alle radici di zuccheri solubili altamente energetici, è stato evidenziato in

popolamenti di conifere e latifoglie (Hogberg et al. 2001; Bhupinderpal-Singh et al. 2003; Knohl et al. 2005; Sampsons et al. 2007; Moyano et al. 2008). L'influsso della produttività sulla respirazione del suolo e le sue componenti è stato descritto su un campione di 18 ecosistemi forestali europei (Janssens et al. 2001). La GPP, intesa come misura della produttività potenziale di un sito, è risultata spiegare meglio della temperatura la differenza tra siti diversi. Essa infatti finisce per determinare anche l'apporto di lettiera fogliare e radicale e quindi influenzare anche la componente eterotrofa del flusso (Janssens et al. 2001).

Misura e ripartizione della produzione primaria netta (NPP).

La verifica della produzione netta dell'ecosistema (NEP) stimata attraverso le misure di eddy covariance, con un metodo indipendente basato sulla stima per via inventariale degli stock di carbonio nei diversi compartimenti del sistema, si scontra con la difficoltà di stimare la componente ipogea della produzione primaria netta (BNPP) costituita in buona parte dalla lettiera radicale (*Litter_{root}*). La stima della rizodeposizione totale (3,22 t C ha⁻¹ anno⁻¹, pari al 33 % della NPP) ottenuta con l'approccio del bilancio di massa (TBCA) ha completato il nostro bilancio inventariale, permettendoci di confrontare il *sink* annuo di 5,51 t di C con una produttività netta dell'ecosistema misurata pari a 4,78 t di C ha⁻¹ anno⁻¹. Il valore di lettiera radicale così ottenuto è sottostimato a causa della assunzione che non avvenga nessun aumento di C organico nel suolo, mentre è verosimile che questo si verifichi nel corso di un anno in un sistema giovane, costituito da un imboschimento di terreni ex-coltivi. Post e Kwon (2000) riportano valori medi di sequestro del C in seguito a cambio d'uso del suolo verso la foresta, pari 0,34 di C ha⁻¹ anno⁻¹. L'applicazione del metodo isotopico per la stima della rizodeposizione netta, ha portato un valore di input di carbonio di origine radicale pari a 3,27 di C ha⁻¹ anno⁻¹, molto vicino a quello

stimato con l'eq. (10). La coincidenza delle due stime è rafforzata dal fatto che entrambe sottostimano, essendo la seconda una misura del C rizodeposto al netto della decomposizione avvenuta nel corso dell'anno. Simili valori di $Litter_{root}$, calcolati con il bilancio di massa del C nel suolo, sono riportati da Ehman et al.(2002) per foreste decidue delle medie latitudini nell'Indiana del sud, di 60-80 anni di età. Gli autori calcolano in due anni successivi 3,68 di C ha⁻¹ anno⁻¹ e 2,70 di C ha⁻¹ anno⁻¹ pari al 40 e al 32% della NPP. Malhi et al. (1999) riportano valori di 3,95 di C ha⁻¹ anno⁻¹ (41,2 % di NPP) per una giovane foresta temperata di latifoglie. Un input radicale medio di 2,69 di C ha⁻¹ anno⁻¹ (41,1 % di NPP) in 5 anni di osservazioni è riportato per boschi misti di latifoglie decidue in Michigan (Gough et al. 2008). Tenendo presente la probabile sottostima, comunque i due valori indipendenti di NEP non differiscono molto tra loro, con il metodo micrometeorologico che supera quello inventariale del 13 %. Curtis et al. (2002) confrontando la NEP ottenuta con i due metodi (meteorologico e biometrico) in cinque siti forestali nell'america nord orientale, non trovano differenze nella media ma, nei singoli sistemi presi singolarmente, la stima biometrica a volte è maggiore e a volte minore di quella da eddy covariance. Questi scostamenti vengono spiegati per la differenza temporale tra i processi del ciclo del carbonio misurati con i due metodi (per esempio l'effetto di un'anomalia nella GPP sarà espressa come alterato incremento legnoso nell'anno successivo). Ehman e colleghi (2002) evidenziano scostamenti in alto rispetto alla misure di eddy covariance che vanno dai 14 al 31%.

La NEP del nostro sistema è risultata consistente se confrontata con altri ecosistemi di latifoglie decidue della fascia temperata. I valori di ANPP sono compresi tra quelli riportati da Luysaert et al. (2007) per le foreste decidue della fascia temperato-umida mentre quelli di GPP e NPP un più alti dell'intervallo comprendente il 75% delle osservazioni, per la produzione netta la differenza è per lo più imputabile alla BNPP. Questa è infatti risultata abbastanza elevata (5,25 di C ha⁻¹ anno⁻¹ pari al

54 % della NPP), superiore al *root/shoot ratio* (rapporto tra BNPP/ANPP) di 0,456 riportato per le foreste temperate di latifoglie a scala globale (Mokany et al. 2006). Newman et al. (2006) riportano lo stesso valore di BNPP/NPP per un bosco misto di latifoglie del Kentucky di 90 anni di età mentre Gough et al. (2008) un valore più basso (47,2 %). Giardina et al. (2004) riunendo i dati di alcune *review* riportano valori di BNPP in funzione della produzione primaria netta epigea (ANPP) estremamente variabili, il rapporto BNPP/ANPP a Nonantola è di 1,19 ed è molto simile a quello riportato per un popolamento a predominanza di *Tilia* (Reich e Bolstad 2001).

Il rapporto tra l'allocazione totale alle radici (TBCA) (Raich e Nadelhoffer 1989) e NPP (1,43) e tra R_{soil} e NPP (0,61) si sovrappongono bene a quelli riportati recentemente da Palmroth et al. (2006). Litton et al (2007) hanno passato in rassegna 62 lavori riportanti la partizione di GPP nell'ecosistema, e hanno calcolato regressioni tra questa e la ANPP legnosa (Δw), ANPP fogliare (Δl) e TBCA. L'applicazione delle equazioni porta a stime molto simili dei parametri misurati (tab.12), e quindi rafforza in qualche modo sia la stima di NPP che quella di GPP.

Il rapporto NPP/GPP è utilizzato come indice di efficienza nell'uso del carbonio (CUE, *Carbon Use Efficiency*) è l'inverso del rapporto respirazione/fotosintesi, ovvero $CUE = 1 - R_{total}/GPP$ e varia normalmente tra 0,4 e 0,55 (Gifford 2003). A Nonantola il CUE è risultato pari a 0,56, molto simile allo 0,55 di un popolamento di latifoglie miste nel Tennessee studiato da Malhi et al. (1999), ma più alto di quello medio di 0,43 calcolato da Litton et al. (2007) e da quello medio di 0,47 (0,17-0,77) proposto da De Lucia e colleghi (2007), i quali per altro, per popolamenti di pioppo di 3 anni di età in Italia centrale, riportano valori di CUE compresi tra 0,58 e 0,72. Globalmente CUE è risultato correlato negativamente all'età (DeLucia et al.2007), e l'alta efficienza fotosintetica riscontrata a Nonantola è legata alla giovane età del popolamento.

In sintesi il quadro che ne esce è quello di un popolamento giovane ancora in espansione per quanto riguarda le potenzialità produttive viste la ridotta biomassa epigea. L'altissimo contenuto in argilla del suolo caratterizza fortemente sia le proprietà fisiche che chimiche del suolo. L'alternarsi di periodi rigonfiamento e saturazione ad altri di ritiro e crepacciamento profondo finiscono verosimilmente per influenzare il turnover radicale e gli input di lettiera nel suolo. In queste condizioni fisico chimiche, la sostanza organica ha verosimilmente tempi di decadimento abbastanza lunghi e tassi di accumulo nel suolo elevati. Per questo motivo e alla luce di altre similitudini emerse dai confronti con la letteratura, il bosco di Nonantola sembra più vicino agli ecosistemi boreali per quanto riguarda l'entità dei flussi e degli stock che a quelli temperati, confermando quanto ipotizzato da Luyssert et al. (2007) a proposito del fatto che le dinamiche della NEP, a differenza di quelle di GPP e NPP, siano guidate, a scala globale, da fattori non climatici quali lo stato successionale, la forma di conduzione, la storia del sito e i fattori di disturbo che lo condizionano.

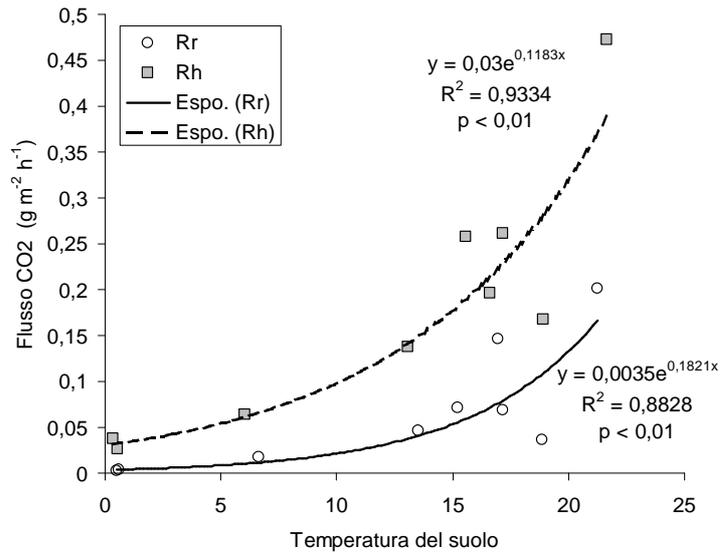


Figura 40. Risposta dei flussi autotrofo R_r ed eterotrofo R_h alla temperatura del suolo nel rimboschimento Sono stati tolti i valori in cui R_h ha superato R_{soil} (28/3 e 7/8)

	a	k	r^2	Q_{10}
R_h	0,0195	0,1301	0,933	3,26
R_r	0,0119	0,1432	0,883	6,18

Tabella 11 Intercetta a , pendenza k e coefficiente di determinazione r^2 delle equazioni che descrivono la risposta delle componenti di R_{soil} alla temperatura del suolo (fig. 35).

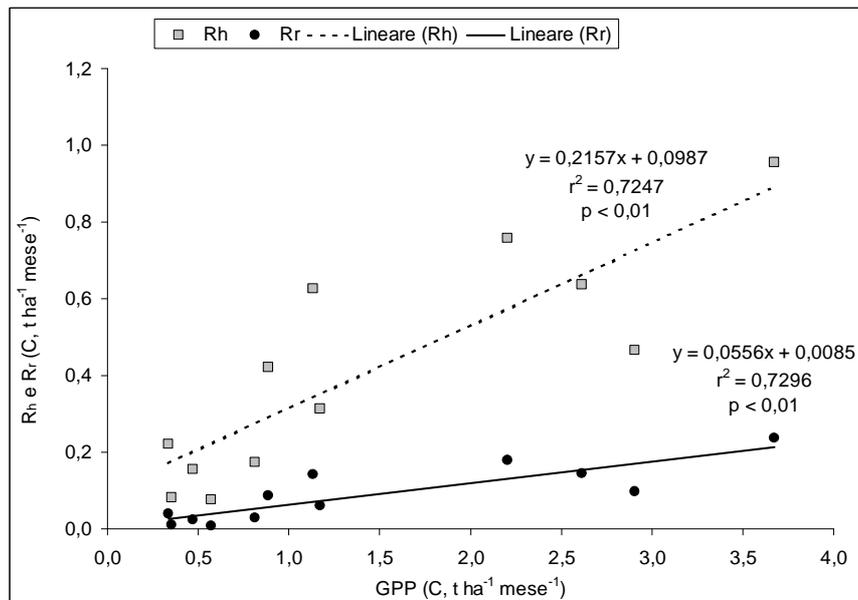


Figura 41 Relazione tra GPP e R_h e R_r (cumulate mensili) nel 2006 a Nonantola. I valori di R_h sono integrati con l'applicazione del modello esponenziale semplice descritto nei risultati; R_r è ottenuto per differenza da R_{soil}

Flusso	Misurato	Altre stime
Δw^*	1,66	1,37
ΔI^*	2,75	3,00
ANPP	4,41	4,37
TBCA[•]	6,3	6,17
TBCA[†]	6,3	7,62
TBCA[§]	6,3	4,48
R_{soil}[‡]	5,94	6,14

Tabella 12. Applicazione di alcune equazioni riportate in letteratura per la stima di ANPP, TBCA e R_{soil}. $\Delta w = -214,4 + 0,30 * GPP$ ($r^2=0,89$; $n=32$); $\Delta I = 0,08 * GPP$ ($r^2 = 0,71$; $n= 32$); $TBCA = 0,36 * GPP$ ($r^2=0,73$; $n=34$) da Litton et al.(2007).[†] $TBCA = 28 MAT + 398$ ($r^2=0,45$; $n=32$) da Giardina et al.(2004). [§] $TBCA = 1,92 * \Delta I + 130$ ($r^2=0,52$; $n=30$) e [‡] $R_{soil} = 2,92 * \Delta I + 130$ ($r^2=0,71$; $n=30$) da Raich e Nadelhoffer (1989). Tutte le equazioni valgono per valori espressi in $g C m^{-2} anno^{-1}$. MAT = Temperatura media annua.

6.2 Flussi di carbonio nel frutteto.

La respirazione del suolo e le sue componenti

Su base annuale il modello esponenziale descrive bene il rapporto tra temperatura e flusso di CO₂ sia per la componente eterotrofa che per quella autotrofa (fig.42). Il Q₁₀ della risposta alla temperatura è, come ci si attende (Boone et al., 1998) ed in accordo con quanto visto nel sito di Nonantola, più alto per il flusso associato alle radici, rispetto al flusso di natura eterotrofia. Si rimanda a questo proposito alla discussione nel paragrafo 6.1.

Nessuno degli inconvenienti dovuti alla perturbazione del sistema con il taglio delle radici e discussi per il sito di Nonantola si è presentato a Cadriano. L'umidità nei *trenched plots* è risultata superiore a quella dei controlli in una sola occasione senza comportare anomalie nel flusso di CO₂ (tab.7). Probabilmente la decomposizione della lettiera radicale qui è avvenuta in tempi molto più rapidi rispetto al bosco, oppure ciò è da porre in relazione al fatto che il frutteto era sottoposto ad irrigazione. Il fatto che nel monitoraggio da luglio a dicembre del 2005 si sia sempre avuta una differenza significativa tra controllo e trattamento (dati non mostrati) sembra indicare che già a distanza di un mese, l'eventuale surplus di flusso respiratorio dovuto alla decomposizione delle radici si fosse esaurito.

La risposta del flusso alla temperatura del suolo, segue un andamento esponenziale per un intervallo di valori fino a circa 15°C oltre il quale il trend si perde dando luogo ad una maggiore variabilità dei risultati all'aumentare della temperatura. Questo comportamento suggerisce che ad elevate temperature si sia verificato l'intervento di altri fattori limitanti il flusso, che di fatto abbia provocato la caduta della relazione con la temperatura. Analizzando i risultati del flusso in base ai valori di umidità del suolo, si può vedere come questi raggiungano valori prossimi al punto di appassimento (15-20 % in volume) proprio

in corrispondenza dei valori massimi di temperatura registrati (fig.27). La figura 28 mostra l'effetto della rimozione dei valori misurati nelle date caratterizzate da umidità limitante sulla risposta del flusso alla temperatura. Ciò conferma l'effetto di disturbo dell'umidità nei confronti della risposta della respirazione al variare della temperatura (Davidson et al. 1998).

I valori di R_{soil} ottenuti in questo lavoro sono in parte paragonabili con i risultati di studi condotti da su analoghi ecosistemi arborei da frutto (Miremadi 1963; Proctor et al. 1976; Psarras et al. 2000). I singoli valori di flusso, hanno raggiunto massimi di 1,3-1,4 g CO₂ m⁻² h⁻¹, soprattutto nel periodo estivo e nelle tesi con esposizione a Sud del filare. Miremadi (1963), riporta valori medi di respirazione compresi tra i 0,28 g CO₂ m⁻² h⁻¹ a settembre ai 0,04 g CO₂ m⁻² h⁻¹ a novembre. Proctor (1979) riporta valori medi di flusso misurati in un meleto del Canada, compresi tra un minimo di 0,1 g CO₂ m⁻² h⁻¹ a settembre ed un massimo di 0,36 g CO₂ m⁻² h⁻¹ a maggio, con singoli picchi di 0,95 g CO₂ m⁻² h⁻¹. Psarras e colleghi (2000) in un meleto (cv. Mutsu su M9), riportano i valori che più si avvicinano a quelli ottenuti in questo lavoro. Infatti, vengono indicati valori massimi di flusso di 1 - 1,1 g CO₂ m⁻² h⁻¹ per il mese di giugno, con una media di 0,42 g CO₂ m⁻² h⁻¹ durante il periodo da giugno ad ottobre, paragonabili anche se di poco superiori, a quelli ottenuti nello stesso periodo in questo studio (~ 0,30 g CO₂ m⁻² h⁻¹). Altri autori riportano invece valori di flusso molto più elevati, come Blanke (1997), che in un meleto ammendato con sostanza organica in Germania ha misurato valori 4 volte maggiori dei nostri, indicando picchi di flusso fino a 4,27 g CO₂ m⁻² h⁻¹.

L'andamento della respirazione "rizosferica" nel corso dell'anno (fig. 35), dopo aver presentato un picco nel mese di maggio, raggiunge un minimo nel punto più secco della stagione (massima distanza tra le curve dell'umidità del suolo e delle temperature), per poi aumentare repentinamente nel rilievo del 7 settembre, pur in assenza di mutamenti nei fattori abiotici (fig. 32). Tra il 20/7 ed il 7/9 si situa la raccolta dei

frutti (18/8), poi fino al 12/10 R_r sale con un tasso maggiore di R_h . Ebert e Lenz (1991) suggeriscono che la respirazione radicale (autotrofa), sia in parte direttamente influenzata dalla presenza dei frutti sull'albero. I loro dati indicano come alberi privi di frutti abbiano una maggiore tendenza a traslocare i prodotti della fotosintesi verso le radici rispetto ad alberi in fase di fruttificazione. Infatti, la scarsa crescita radicale di alberi che portano frutti deriva dal sostanzioso richiamo di carboidrati da parte di questi ultimi, a scapito degli altri organi della pianta (Maggs 1963; Palmer 1992).

Misura e ripartizione della produzione primaria netta (NPP).

La ripartizione dello scambio netto della parte epigea (NAE) modellizzato a scala annuale sulla base di misure dirette, porta alla determinazione di un flusso alle radici (BCA) di 5,32 t di C ha⁻¹ simile per entità alla produzione primaria netta epigea (ANPP). Di questo flusso, di dimensioni notevoli per un sistema frutticolo, il 56 % è rappresentato dall'input di lettiera radicale (*Litter_{root}*) di 3,06 t di C ha⁻¹ anno⁻¹. Questo valore che è pari a circa il 30 % della NPP, è superiore a quello riportato per alberi di melo in vaso da Scandellari et al. (2007), che grazie a tecniche isotopiche hanno riportato valori di rizodeposizione netta pari al 18% della NPP. Considerando i valori di biomassa di radici fini misurata a dicembre 2006 (1,4 t di C ha⁻¹) e l'incremento nella densità di radici fini nel corso dello studio, i dati di rizodeposizione ottenuti in campo nella presente tesi, se fossero interamente attribuibili turnover radicale implicherebbero un tasso di turnover annuale variabile tra 1,2 e 2,2 (a seconda che si consideri la densità radicale finale o quella iniziale). Ciò potrebbe essere compatibile con le evidenze sperimentali di Wells e Eissenstat (2001) che indicano come in estate, il 50% delle nuove radici prodotte abbia una vitalità media di 4-6 settimane. L'utilizzo di porta-innesto nanizzanti e cultivar selezionate per le capacità produttive, unito alle

condizioni ideali di “coltivazione” che si riscontrano nel frutteto, farebbero inoltre ipotizzare ad un investimento relativo minore della pianta nell’apparato radicale rispetto a quanto viene in un sistema lasciato all’evoluzione naturale come quello di Nonantola. D’altra parte, l’elevata allocazione alle radici misurata nel 2006 nel frutteto potrebbe essere in relazione con la bassa produttività dell’impianto registrata nell’anno di riferimento per il mio studio rispetto al precedente (Ceccon 2007) in cui la produzione fu di $4,4 \text{ t C ha}^{-1}$, spiegabile con una alternanza di produzione.

La stima della rizodeposizione netta con il metodo isotopico ha prodotto un risultato di $2,37 \text{ t C ha}^{-1}$, che sembra compatibile con una $\text{Litter}_{\text{root}}$ di $3,06 \text{ t C/ha}$. Tuttavia, l’estrema variabilità legata alle stime di variazione di C nel suolo rende questo risultato puramente indicativo. Una stima della variazione annuale nel C nel suolo potrebbe permettere speculazioni anche sui valori credibili di input radicale. Confrontato con i valori di SOC pre-impianto (confronto criticabile vista la non verificabilità delle metodologie di analisi e campionamento di allora), il contenuto in C organico del suolo nel 2007 testimonia un incremento medio annuo di $0,8 \text{ t di C ha}^{-1}$, più del doppio del valore medio di $0,33 \text{ t C ha}^{-1}$ riportato da Post e Kwon (2000) per la messa a coltura perenne degli arativi. Il basso valore di R_h (unica uscita influente di C dal sistema suolo) nel filare del frutteto suggerisce che l’intensità della rizodeposizione nell’anno in esame non sia rappresentativo della storia del frutteto dal suo impianto. A fronte di un flusso verso il suolo di circa 4 t di C , se la respirazione eterotrofa fosse pari a $1,31 \text{ t di C}$ si avrebbero infatti accumuli netti di $2,69 \text{ t C ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$.

Occorre inoltre considerare come nel bilancio del frutteto non siano state considerate alcune voci come le asportazioni di C per lisciviazione. Inoltre è possibile che la biomassa radicale e la respirazione radicale siano state sottostimate perchè gli apparati radicali si estendono oltre i 60 cm di profondità presi in esame da questo studio e oltre la striscia diserbata campionata dai collari. Considerata la

metodologia utilizzata per la stima di BCA e *Litter_{root}* la più probabile fonte di “*bias*” risiede nella ricostruzione dello scambio netto delle chiome. A questo proposito, l'utilizzo delle equazioni di Butler e Landsberg, (1989) ha comportato una sottostima della respirazione notturna e invernale, quest'ultima restando al 2% di quanto fissato durante la stagione vegetativa contro il 4% riportato da Lakso et al. (1999).

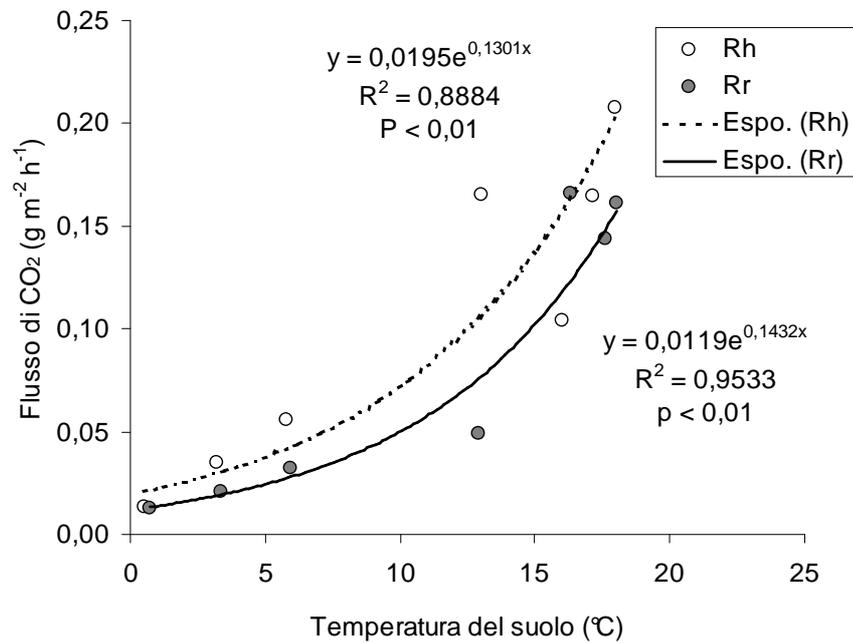


Figura 42 Risposta dei flussi autotrofo R_r ed eterotrofo R_h alla temperatura del suolo nel frutteto Sono stati esclusi dalla regressione i valori ottenuti nelle date caratterizzate da umidità del suolo limitante (4/7, 20/7, 7/9).

	a	k	r^2	Q_{10}
R_h	0,0195	0,1301	0,933	3,26
R_r	0,0119	0,1432	0,883	4,19

Tabella 13 Intercetta a , pendenza k e coefficiente di determinazione r^2 delle equazioni che descrivono la risposta delle componenti di R_{soil} alla temperatura del suolo (fig. 37).

6.3 Confronto dei flussi nei due sistemi

Considerando la differenza negli stock iniziali di C presenti nel sistema (tab.9) i flussi misurati durante il 2006 non sono risultati poi così differenti. A fronte di una grossa differenza nella *standing biomass*, specie quella ipogea, la NPP nei due sistemi è risultata praticamente identica. La maggiore allocazione sopra suolo nel sistema frutticolo è ascrivibile verosimilmente alla produzione di frutti (2,2 t di C ha⁻¹ nel 2006), mentre l'importante flusso di C verso le radici (BCA) che si riscontra nel frutteto è da mettere in relazione sia alle migliori condizioni di fertilità del sistema coltivato sia al fenomeno dell'alternanza di produzione, che cambia i rapporti dell'allocazione nella pianta. D'altronde occorre considerare che gli alberi nel frutteto, seppure con densità (e LAI) inferiori al bosco erano posti in condizioni migliori per estrinsecare elevate produttività nette rispetto al bosco: migliori caratteristiche tessiturali del suolo, concimazione ed irrigazione. La grossa differenza nel flusso totale di CO₂ dal suolo (R_{soil}) tra i due sistemi è tutta a carico della componente eterotrofa ed è sicuramente legata al maggiore contenuto in C organico del suolo (SOC) nel sistema forestale (tab. 15), e alla mancata restituzione al suolo di un ingente parte della ANPP (frutti e potatura) nel frutteto.

L'effetto conservativo delle argille sulla SOM (Di Lustro et al. 2005) contribuisce senz'altro a mantenere alta la differenza tra i due sistemi nel tasso di accumulo di carbonio nel suolo a prescindere dalle restanti variabili che influenzano il processo.

Comparando il valore assoluto dei due flussi, bisogna considerare che essi si riferiscono a superfici diverse (1 ha nel sito forestale, 0,47 ha in quello agrario) riportati i valori a m² si nota che R_{soil} nel comparto alberato del frutteto non è poi così diversa in valore assoluto da quella in foresta (1789 g di CO₂ per m² contro 2176), mentre cambia decisamente la ripartizione: nel frutteto la respirazione radicale spiega il 43,3 % del totale su base annua con valori massimi del 61% dopo la raccolta (tab.

8), nel bosco il valore su base annua è 18% con un valore massimo del 36 % nel periodo tardo primaverile (tab.5). Questo diverso comportamento è legato a diversi fattori che influiscono sull'una e sull'altra componente del flusso di respirazione dal suolo. Del diverso contenuto in SOC tra i due siti si è già detto, mentre un altro importante fattore è di natura fisiologica e legato alle dinamiche di trasferimento di risorse interne della pianta produttiva, a seconda delle fasi fenologiche e della presenza o meno di frutti .

A differenza di ciò che accade in un ecosistema naturale, lo studio del ciclo del C in un frutteto deve inoltre tenere in considerazione la rimozione dal sistema di una parte più o meno consistente del carbonio fissato, attraverso i frutti e, talvolta, i residui della potatura. Se un'elevata ripartizione del C fissato nei frutti (65% della ANPP nel 2005; Ceccon 2007), è auspicabile da un punto di vista della massimizzazione economica del frutteto, ciò comporta una riduzione del C che rimane nel sistema. Ai fini di un bilancio completo del C, vanno anche considerate le emissioni di CO₂ conseguenti alle pratiche di gestione. Ad esempio per ogni kg di azoto prodotto e distribuito in campo è stimato un rilascio di 1,23 kg di CO₂-C mentre ogni litro di gasolio utilizzato corrisponde a 0,71 kg CO₂ rilasciati nell'atmosfera (Robertson et al., 2000; Lal 2004b). Un'indagine approfondita sulla componente erbacea del frutteto diventa fondamentale per stimare con precisione il valore assoluto della NEP.

In definitiva, anche ammettendo una sovrastima di NAE che di conseguenza abbia comportato una sovrastima della NPP nel frutteto, e considerando l'incognita della componente erbacea le produzioni nette dell'ecosistema (NEP) dei due sistemi sono confrontabili, e li rendono li due *sink* di C non indifferenti con circa 5 t di C ha⁻¹ anno⁻¹ fissate, pari a 18,3 t di CO₂.

	Rimboschimento				Frutteto			
	<i>a</i>	<i>k</i>	<i>r</i> ²	<i>Q</i> ₁₀	<i>a</i>	<i>k</i>	<i>r</i> ²	<i>Q</i> ₁₀
<i>R</i>_{soil}	0,0329	0,1305	0,970	3,92	0,00315	0,1365	0,919	3,69
<i>R</i>_h	0,0300	0,1183	0,888	3,67	0,0195	0,1301	0,933	3,26
<i>R</i>_r	0,0035	0,1821	0,953	6,18	0,0119	0,1432	0,883	4,19

Tabella 14 Confronto tra le curve di risposta alla temperatura della respirazione totale (***R*_{soil}**), respirazione eterotrofa (***R*_h**) e respirazione autotrofa stimata per differenza. *a* = intercetta; *k* = pendenza; *r*² = coefficiente di determinazione; *Q*₁₀ = variazione di flusso causata da un aumento di 10 gradi di temperatura. Dalle regressioni sono state escluse, per il frutteto le due date caratterizzate da U % limitante, per il rimboschimento le due date in cui *R*_h ha superato *R*_{soil}.

Comparto	Frutteto	Bosco
Aboveground Standing biomass	9,8	17,8
Belowground Standing biomass	5,92	6,20
Suolo (0-60 cm)	32,4	118,9
Totale	48,1	142,9

Tabella 15 Stima degli stock nei due sistemi studiati nel 2006. Nel frutteto non è considerata la produzione di frutta. Valori in t di C ha⁻¹. Nel frutteto non è stata considerata la vegetazione erbacea ed il suolo a lei sottostante.

7 CONCLUSIONI

Lo scopo che si era proposto questo studio, cioè la determinazione dei flussi e degli *stocks* di C nei due sistemi è stato raggiunto con successo.

La stima del flusso di C dalle radici e verso le radici, e la conseguente quantificazione della produzione primaria netta ipogea (BNPP) nei due sistemi sono i principali risultati di questo studio.

In entrambi i siti la BNPP è risultata dello stesso ordine di grandezza di quella epigea condizionando la produttività netta dell'ecosistema NEP che è pari $5,42 \text{ t c ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$ nel frutteto e $4,78$ nel rimboschimento ($5,51$ con il metodo micrometeorologico). Questi valori hanno confermato le potenzialità di accumulo di C in sistemi arborei, e il loro ruolo nel sequestro della CO_2 atmosferica. La contemporanea stima dei flussi di C da e verso il suolo permette di avere un'idea delle potenzialità di accumulo nei suoli sotto forme a lento turnover, specie in seguito al passaggio da colture annuali a colture perenni caratterizzate da una gestione sostenibile in termini di carbonio.

Nel sito forestale la chiusura del bilancio, la stima della partizione della GPP, la riprova con metodo diverso della stima della rizodeposizione nonché la verifica della NEP con due metodi indipendenti costituiscono un risultato di sicuro valore. Inoltre i maggiori flussi sono risultati perfettamente sovrapponibili con le recenti pubblicazioni su ecosistemi simili.

Nel frutteto la stima della respirazione radicale, e la sua caratterizzazione in termini di risposta ai fattori ambientali e dipendenza dallo stato fisiologico delle piante, la chiusura del bilancio e la partizione della NPP nelle sue componenti hanno permesso di quantificare il flusso totale alle radici e quindi al suolo, con un approccio del tutto originale per questo tipo di ecosistema.

In entrambi i siti, merita di essere sottolineata la validazione del metodo isotopico per la stima della rizodeposizione netta, che allo stato attuale non ha verifiche in letteratura.

L'approccio cosiddetto del TBCA, che si basa sul bilancio di massa dei budget di carbonio in un ecosistema, si è confermato uno strumento validissimo per quantificare il flusso verso le radici richiedendo la misura di pochi parametri che di norma vengono sempre raccolti negli studi quantitativi dei flussi di carbonio. La sua applicazione in un sistema agricolo è una novità..

BIBLIOGRAFIA

- Aber J.D., Melillo J.M., 2001. *Terrestrial Ecosystems*. Hartcourt, Academic Press. San Diego. USA
- Ågren G.I., Bosatta E., 1996. Quality: a bridge between theory and experiment in soil organic matter studies. *Oikos* **76**, 522-528.
- Amundson R., 2001. The carbon budget in soils. *Annual Reviews of Earth and Planetary Sciences* **29**, 535-562
- Atkin O.K., Tjoelker M.G., 2003. Thermal acclimation and the dynamic response of plant respiration to temperature. *TRENDS in Plant Science* **8** (7), 343-351.
- Aubinet M., Grelle A., Ibrom A., Rannik U., Moncrieff J., Foken T., Kowalski A.S., Martin P.H., Berbigier P., Bernhofer C., Clement R., Elbers J., Granier A., Grunwald T., Morgenstern K., Pilegaard K., Rebmann C., Snijders W., Valentini R., Vesala T., 2000. Estimates of the annual net carbon and water exchange of forests: the Euroflux methodology. *Advances in Ecological Research* **30**, 113-175.
- Bellamy P.H, Loveland P.J., Bradley I., Lark R.M. & Kirk G.J. Carbon losses from all soils across England and Wales 1978-2003. *Nature* **437**, 245-248.
- Bhupinderpal-Singh . Nordreg A., Ottosson Lofvenius M., Hogberg M. N., Mellander P. E., Hogberg P., 2003. Tree root and soil heterotrophic respiration as revealed by girdling of boreal Scots pine forest: extending observations beyond the first year *Plant, Cell and Environment*. **26**, 1287-1296.
- Billings S.A., Richter D.D., Yarie J., 1998. Soil carbon dioxide fluxes and profile concentrations in two boreal forests. *Canadian Journal of Forest Research* **28**, 1773-1783.
- Blanke M, 1996, Soil respiration in an apple orchard. *Environmental and. Experimental Botany*. **36**, 339-348.
- Boone R.D., Nadelhoffer K.J., Canary J.D. and Kaye J.P., 1998. Roots exert a strong influence on the temperature sensitivity of soil respiration. *Nature* **396**, 570-572.
- Buchmann N., 2000. Biotic and abiotic factors controlling soil respiration rates in *Picea abies* stands. *Soil Biology and Biochemistry*, **32**, 1625-1633.
- Butler D.R. and Landsberg J.J., 1981. Respiration rates of apple trees estimated by CO₂-efflux measurements. *Plant, Cell and Environment* **4**, 153-159.
- Burton D.L. e Beauchamp E.G., 1994. Profile nitrous oxide and carbon dioxide concentrations in a soil subject to freezing. *Soil Science Society American Journal* **58**, 115-122
- Cairns M.A., Brown S., Helmer E.H., Baumgardner G.A., 1997. *Oecologia* **111**, 1-11.
- Ceccon C., 2007. Flussi di C in un meleto. Tesi di Laurea Specialistica dell'Università degli Studi di Bologna.
- Castellani C, 1982. Tavole stereometriche ed alsometriche costruite per i boschi italiani. Istituto Sperimentale per l'Assestamento Forestale e per l'Alpicoltura, Trento, pp. 810
- Corelli Grappadelli L. and Magnanini E., 1993. A whole-tree system for gas-exchange studies. *HortScience* **28** (11), 41-45.

- Coupland R., Van Dyne G., 1976. System synthesis. In Coupland R (ed.), *Grassland Ecosystems of the world*. Cambridge Un.Press: 97-111.
- Curiel Yuste J., Janssens I.A., Carrara A., Meiresonne L, Ceulemans R., 2003. Interactive effects of temperature and precipitation on soil respiration in a temperate maritime pine forest. *Tree Physiology* **23**, 1263–1270.
- Curtis P.S., Hanson P.J., Bolstad P., Barford C., Randolph J.C., Schmid H.P, Wilson K.B., 2002. Biometric and eddy-covariance based estimates of annual carbon storage in five eastern North American deciduous forests. *Agricultural and Forest Meteorology* **113**, 3-19.
- Davidson E.A, Belk E., Boone R.D., 1998. Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in temperate mixed hardwood forest. *Global Change Biology* **4**, 217-227.
- Davidson E.A, Trumbore S.E, Amundson R, 2000. Soil warming and organic carbon content. *Nature* **408**, 789-790.
- Davidson E.A., Janssens I.A., Luo Y., 2006. On the variability of respiration in terrestrial ecosystems: moving beyond Q_{10} . *Global Change Biology* **12**, 154–164.
- Davidson E.A., Savage K., Bolstad P., Clark D.A., Curtis P.S., Ellsworth D.S., Hanson P.J., Law B.E., Luo Y., Pregitzer K.S., Randolph J.C. and Zak D., 2002. Belowground carbon allocation in forests estimated from litterfall and IRGA-based soil respiration measurements. *Agricultural and Forest Meteorology* **113**, 39–51.
- DELTA_T DEVICES, 1999. Theta Probe Soil Moisture Sensor, Type ML2x. User Manual-1.21. pp 11-12.
- DeLucia E. H., Drake J. E., Thomas R. B., Gonzalez – Meler M., 2007. Forest carbon use efficiency: is respiration a constant fraction of gross primary production? *Global Change Biology* **13**, 1157-1167.
- Dilustro J.J., Collins B., Duncan L. e Crawford C., 2005. Moisture and soil texture effects on soil CO₂ efflux components in southeastern mixed pine forests. *Forest Ecology and Management* **204**, 85-95.
- Ebert G, Lenz F, 1991: Annual course of root respiration of apple trees and its contribution to the CO₂-balance. *Gartenbauwissenschaft* **56**, 130-133.
- Ehman J.L, Schmid H.P, Grimmond C.S.B., Randolph J.C., Hanson P.J., Wayson C.A., Cropley F.D., 2002. An initial intercomparison of micrometeorological and ecological inventory estimates of carbon exchange in a mid-latitude deciduous forest. *Global Change Biology*, **8**, 575-589.
- Epron D., Farque L., Lucot E., Badot P.M., 1999. Soil CO₂ efflux in a beech forest: the contribution of root respiration. *Annals of Forest Science* **56**, 289-295.
- Epron D., Le Dantec V., Dufrene E., Granier A., 2001. Seasonal dynamics of soil carbon dioxide efflux and simulated rhizosphere respiration in a beech forest. *Tree Physiology* **21**, 145-152.
- Fahey T.J., Hughes J.W., 1994. Fine roots dynamics in a northern hardwood forest ecosystem, Hubbard Brook Experimental Forest, NH. *Journal of Ecology* **82**, 533-548.
- Fredericksen T.S. e Zedaker S.M.,1995. Fine root biomass, distribution, and production in young pine-hardwood stands. *NewForests* **10**, 99-110.
- Freibauer A., Rounsevell M., Smith P., Verhagen A., 2004. Carbon sequestration in European Agricultural soils. *Geoderma*.**122**, 1-23.
- Freijer J.I., Leffelaar P.A., 1996. Adapted Fick's law applied to soil respiration. *Water Resources Research* **32**, 791-800.

- Giardina C.P. e Ryan M.G., 2000. Evidence that decomposition rates of organic carbon in soil do not vary with temperature. *Nature* **404**, 858-861.
- Giardina C.P. e Ryan M.G., 2002. Total belowground carbon allocation in a fast-growing *Eucalyptus* plantation estimated using a carbon balance approach. *Ecosystems*, **5**, 487-499.
- Giardina C.P., Coleman M.D., Hancock J.E., King J.S., Lilleskov E.A., Loya W.M., Pregitzer K.P., Ryan M.G. e Trettin C.C., 2004. The response of belowground carbon allocation in forest to global carbon change. In: Binkley D. and Manyilo O. (eds.), *Tree Species Effects On Soils: Implications For Global Change*. NATO Science Series, IV Earth and Environmental Sciences-Vol.55. Springer, Dordrecht, NL, pp 119-154
- Gifford R.M., 2003. Plant respiration in productivity models: conceptualization, representation and issues for global terrestrial carbon-cycle research. *Functional Plant Biology* **30**, 171-186.
- Gough C.M., Vogel C.S., Schmid H.P., Su H.-B., Curtis P.S., 2008. Multi-year convergence of biometric and meteorological estimates of forest carbon storage. *Agricultural and Forest Meteorology* **148**, 158-170
- Grace J., 2004. Understanding and managing the global carbon cycle. *Journal of Ecology* **92**: 189-202.
- Grace J. e Rayment M., 2000. Respiration in the balance. *Nature* **404**, 819-820.
- Granier A, Reichstein M, Bréda N., Janssens I.A., Falge E., Ciais P., Grünwald T., Aubinet M., Berbigier P., Bernhofer C., Buchmann N., Facini O., Grassi G., Heinesch B., Ilvesniemi H., Keronen P., Knohl A., Köstner B., Lagergren F., Lindroth A., Longdoz B., Loustau D., Mateus J., Montagnani L., Nys C., Moors E., Papale D., Peiffer M., Pilegaard K., Pita G., Pumpanen J., Rambal S., Rebmann C., Rodrigues A., Seufert G., Tenhunen J., Vesala T., Wang Q., 2007. Evidence for soil water control on carbon and water dynamics in European forests during the extremely dry year: 2003. *Agricultural and Forest Meteorology* **143**, 123-145
- Hanson P.J., Edwards N.T., Garten C.T. and Andrews J.A., 2000. Separating root and soil microbial contributions to soil respiration: a review of methods and observations. *Biogeochemistry* **48**, 115-146.
- Hemming D., Yakir D., Ambus P., Aurela M., Besson C., Black K., Buchmann N., Burrell R., Cescatti A., Clement R., Gross P., Granier A., Grünwald T., Havrankova K., Janous D., Janssens I.A., Knohl A., Ostner B.K., Kowalski A., Laurila T., Mata C., Marcolla B., Matteucci G., Moncrieff J., Moors E.J., Osborne B., Pereira J.S., Pihlatie M., Pilegaard K., Ponti F., Rosova Z., Rossi F., Scartazza A., Vesala T., 2005. Pan-European $\delta^{13}C$ values of air and organic matter from forest ecosystems. *Global Change Biology* **11**, 1065-1093.
- Hogberg P., Nordgren A., Buchmann N., Taylor A.F.S., Ekblad A., Hogberg M.N., Nyberg G., Ottosson-Loefvenius M., Read D.J., 2001. Large-scale forest girdling shows that current photosynthesis drives soil respiration. *Nature* **411**, 789-792.
- Hogberg P., Buchmann N., Read D.J., 2006. Comments on Yakov Kuzyakov's review „Sources of CO₂ efflux from soil and review of partitioning methods” (Soil Biology and Biochemistry 38, 425-448). *Soil Biology and Biochemistry*, **38**, 2997-2998.
- Houghton R.A., 1999. The annual net flux of carbon to the atmosphere from change in land use 1850 to 1998. *Tellus* **51 B**:298-313.
- IPCC, 2001. *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton J.T., Ding Y., Griggs D.J., Noguer M., van der Linden P.J., Dai X., Maskell K., and Johnson C.A. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881pp.

- Janssens I.A., Kowalski A.S., Longdoz B., Ceulemans R., 2000. Assessing forest soil CO₂ efflux: an in situ comparison of four techniques. *Tree Physiology* **20**, 23-32.
- Janssens I.A., Dore S., Epron D., Lankreijer H., Buchmann N., Longdoz B., Brossaud J. and Montagnani L., 2003a. Climatic influence on seasonal and spatial differences in soil CO₂ efflux. In: Valentini R. (ed), Fluxes of carbon, water and energy of European Forests. *Ecological Studies* **163**, 233-253.
- Janssens I.A., Freibauer A., Ciais P., Smith P., Nabuurs G.-J., Folberth G., Schlamadinger B., Hutjes R.W.A., Ceulemans R., Schulze E.-D., Valentini R., Dolman H., 2003b. Europe's terrestrial biosphere absorbs 7–12% of European anthropogenic CO₂ emissions. *Science* **300**, 1538–1542.
- Kirschbaum M.U.F., 1995. The temperature dependence of soil organic matter decomposition, and the effect of global warming on soil organic storage. *Soil Biology and Biochemistry*. **27**, 753-760.
- Knohl A., Werner R.A., Brand W.A., Buchmann N., 2005. Short-term variations in $\delta^{13}\text{C}$ of ecosystem respiration reveals link between assimilation and respiration in a deciduous forest. *Oecologia* **142**, 70-82.
- Knorr W., Prentice I.C., House J.I., Holland E.A., 2005. Long-term sensitivity of soil carbon turnover to warming. *Nature* **433**, 298-301.
- Kuzyakov Y., 2006. Sources of CO₂ efflux from soil and review of partitioning methods. *Soil Biology and Biochemistry* **38**, 425-448.
- Lakso A.N., Wunsche J. N., Palmer J. W., Corelli Grappadelli L., 1999. Measurement and Modeling of Carbon Balance of the Apple Tree. *Hort Science*, **34**, 1040-1047.
- Lal R., 2004a. Soil Carbon Sequestration Impact on Global Climate Change and Food Security. *Science* **304**, 1623-1627
- Lal R., 2004b. Carbon emission from farm operation. *Environment International*, **30**, 981-990.
- Lavigne M.B., Foster R.J., Goodine G., 2004. Seasonal and annual changes in soil respiration in relation to soil temperature, water potential and trenching. *Tree physiology* **24**, 415-424.
- Lee M., Nakane K., Nakatsubo T., Mo W., Koizumi H., 2002. Effects of rainfall events on soil CO₂ flux in a cool temperate deciduous broad-leaved forest. *Ecological Research* **17**, 401-409.
- Lenz F., 1986. Fruit effects on transpiration and dry matter production in apples, pp. 101-104. In : Lakso a., Lenz F. (eds). Regulation of photosynthesis in fruit trees. New York State Agr. Expt. Sta. Spec. Publ., Geneva.
- Litton C.N., Raich J.W., Ryan M.G., 2007. Carbon allocation in forest ecosystems. *Global Change Biology* **13**, 2089-2109.
- Lloyd J., Taylor J.A., 1994. On the temperature-dependence of soil respiration. *Functional Ecology* **8**, 315–323.
- Luysaert S., Inghima I., Jung M., Richardson A. D., Reichstein M., Papale D., Piao S. L., Schulze E. D., Wingate L., Matteucci G., Aragao L., Aubinet M., Beer C., Bernhofer C., Black K. G., Bonal D., Bonnefond J. M., Chambers J., Ciais P., Cook B., Davis K. J., Dolman A. J., Gielen B., Goulden M., Grace J., Granier A., Grelle A., Griffis T., Grünwald T., Guidolotti G., Hanson P. J., Harding R., Hollinger D. Y., Hutyrá L.R., Kolari P., Kruijt B., Kutsch W., Lagergren F., Laurila T., 2007. CO₂ balance of boreal, temperate, and tropical forests derived from a global database. *Global Change Biology* **13**, 2509–2537.
- Maggs D.H, 1963. The reduction in growth of apple trees brought about by fruiting. *Journal of Horticultural Science* **38**, 119-128.

- Magnani F, Grassi G, Tonon G, Cantoni L, Ponti F, Vicinelli E, Boldreghini P, Nardino M, Georgiadis T, Facini O, Rossi F, 2005. Quale ruolo per l'arboricoltura da legno italiana nel protocollo di Kyoto? Indicazioni da una "Kyoto forest" della pianura emiliana. *Forest@ 2* (4), 333-344. [online] URL: <http://www.sisef.it/>
- Mayer E., 2005. Bilancio del C in un ecosistema arboreo da frutto. Flussi di C in un meleto. Tesi di Laurea dell'Università degli Studi Di Bologna.
- Melillo J.M., Steudler P.A., Aber J.D., Newkirk K., Lux H., Bowles F.P., Catricala C.m Magill A., Ahrens T., Morisseau S., 2002. Soil warming and carbon-cycle feedbacks to the climate change. *Science* **298**, 2173-2176.
- Miremedi A, 1963. Bodenatmung in Apfelpflanzungen in Abhängigkeit von Bodenpflege und Beregnung. *Gartenbauwissenschaft* **18**, 411-449.
- Mokany K., Raison R. J., Prokushkin A. S., 2006. Critical analysis of root: shoot ratios in terrestrial biomes. *Global Change Biology* **12**, 84-96.
- Moyano F.E., Kutsch W.L., Rebmann C., 2008. Soil respiration fluxes in relation to photosynthetic activity in broad-leaf and needle-leaf forest stands. *Agricultural and Forest Meteorology* **148**, 135-143.
- Nadelhoffer K.J., Raich J.W., Aber J.D., 1998. A global trend in belowground carbon allocation: Comment. *Ecology* **79** (5), 1822-1825.
- Newman G.S., Arthur M.A. and Muller R.N., 2006. Above- and Belowground Net Primary Production in a Temperate Mixed Deciduous Forest. *Ecosystems* **9**, 317-329.
- Ngao J., Longdoz B., Granier A., Epron D., 2007. Estimation of autotrophic and heterotrophic components of soil respiration by trenching is sensitive to corrections for root decomposition and changes in soil water content. *Plant Soil* **301**, 99-110.
- Norby R.J., Hanson P.J., O'Neill E.G., Tschaplinski T.J., Weltzin J.F., Hansen R.A., Cheng W., Wullschleger S.D., Gunderson C.A., Edwards N.T. and Johnson D.W., 2002. Net primary productivity of a CO₂-enriched deciduous forest and the implications for carbon storage. *Ecological Applications* **12** (5), 1261-1266.
- Odum E.P., 1969). The strategy of ecosystem development. *Science* **164**, 262-270
- Olesen J., Bindi M., 2002. Consequences of climate change for European agricultural productivity, land-use and policy. *European Journal of Agronomy* **16**, 239-262.
- Oliveira M. do Rosario G., van Noordwijk M., Gaze S:R., Brouwer G., Bona S., Mosca G., Hairiah K., 2000. Auger sampling, Ingrowth Cores and Pinboard methods. In: Smith A.L, Bengough A.G., Engels C., van Noordwijk M., Pellerin S., van de Geijn M. (eds), *Root Methods: A Handbook*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, pp 175-210.
- Palmer J.W., 1992 Effect of varying crop load on photosynthesis , dry matter production and partitioning of Crispin/M27 apple trees. *Tree Physiology* **11**, 19-33.
- Palmroth S., Oren R., McCarthy H.R., Johnsen K.H., Finzi A.C., Butnor J.R., Ryan M.G. and Schlesinger W.H., 2006. Aboveground sink strength in forests controls the allocation of carbon below ground and its [CO₂]-induced enhancement. *Proceedings of National Academy of Sciences*. **103** (51), 19362-19367.
- Pendall E., Bridgham S., Hanson P.J, Hungate B., Kicklighter D.W., Johnson D.W., Law B.E., Luo Y., Megonigal J.P., Olsrud M., Ryan M.G., Wan S., 2004. Below-ground process responses to elevated CO₂ and temperature: a discussion of observations, measurement methods, and models. *New Phytologist* **162** (2), 311-322.

- Ponti F., Minotta G., Cantoni L. and Bagnaresi U., 2004. Fine root dynamics of pedunculate oak and narrow-leaved ash in a mixed-hardwood plantation in clay soils. *Plant and Soil*, **259**, 39–49.
- Post W.M., Kwon K.C., 2000. Soil carbon sequestration and land-use change: processes and potential. *Global Change Biology* **6**, 317-327
- Prentice I.C., Farquhar G.D., Fasham M.J.R., Goulden M.L., Heimann M., Jaramillo V.J., Khashgi H.S., Le Quére C, Scholes R.J., Wallace D.W.R., 2001. The Carbon Cycle and Atmospheric Carbon Dioxide In: Climate Change 2001: The Scientific Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Houghton J.T., Ding Y., Griggs D.J., Noguer M., van der Linden P.J., Dai X., Maskell K. and Johnson C.A. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 881pp.
- Proctor J.T.A., Watson R.L., Landsberg J.J., 1976: The carbon balance of a young apple tree. *Journal of American. Society of Horticultural Sciences* **101**, 579-582
- Psarras G, Merwin IA, Lakso AN, Ray JA, 2000: Root growth phenology, root longevity, and rhizosphere respiration of field grown “Mutsu” apple trees on “Malling 9” rootstock. *Journal of American. Society of Horticultural Sciences* **125**, 596-602.
- Raich J.W. e Schlesinger W.H., 1992. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus* **44 B**, 81-99.
- Regione Emilia-Romagna, 1994. I Suoli dell’Emilia Romagna. Regione Emilia-Romagna, Servizio Cartografico, Bologna, pp. 383.
- Regione Emilia-Romagna, 2000. Tavole Dendrometriche Regionali. Regione Emilia-Romagna, Ufficio Risorse Forestali, Bologna, pp. 81.
- Reich P., Bolstad P., 2001. Productivity of evergreen and deciduous temperate forests. In: Roy J., Saugier B., Mooney H.A. (eds) *Terrestrial Global Productivity*, pp.245-283 Academic Press, San Diego, USA.
- Reichstein M., Rey A., Freibauer A., Tenhunen J., Valentini R., Banza J., Casals P., Cheng Y.F., Grunzweig J.M., Irvine J., Joffre R., Law B.E., Loustau D., Miglietta F., Oechel W., Ourcival J.M., Pereira J.S., Peressotti A., Ponti F., Qi Y., Rambal S., Rayment M., Romanya J., Rossi F., Tedeschi V., Tirone G., Xu M., Yakir D. (2003). Modeling temporal and large-scale spatial variability of soil respiration from soil water availability, temperature and vegetation productivity indices. *Global Biogeochemical Cycles* **17** (4), 1104, doi:10.1029/2003GB002035,.
- Reicosky D.D., Hatefield J.L., Sass R.L., 2000. Agricultural contributions to greenhouse gas emissions. In Reddy K.R e Hodges H.F. *Climate change and global crop productivity*. 8ed CABI Publishing Wallingfor UK.
- Rey A., Pegoraro E., Tedeschi V., De Parri I., Jarvis P.J., Valentini R., 2002. Annual variation in soil respiration and its components in a coppice oak forest in Central Italy. *Global Change Biology* **8**, 851–866.
- Robertson G.P., Paul E.A, Harwood R.R., 2000. Greenhouse gases in intensive agriculture: contributions of individual gases to the radiative forcing of the atmosphere. *Science* **289**, 1922-1925.
- Robinson D., 2007. Implications of a large global root biomass for carbon sink estimates and for soil carbon dynamics. *Proceedings of The Royal Society B* **274**, 2753-2759
- Ryan M.G., Lavigne M.B., Gower S.T., 1997. Annual carbon cost of autotrophic respiration in boreal forest ecosystems in relation to species and climate. *Journal of Geophysical Research* **102**, 871-883.

- Ryan M.G. and Law B.E., 2005. Interpreting, measuring, and modeling soil respiration. *Biogeochemistry*, **73**, 3–27.
- Sampson D.A., Janssens I.A., Curiel Yuste J., Ceulemans R., 2007. Basal rates of soil respiration are correlated with photosynthesis in a mixed temperate forest. *Global Change Biology*, **13**, 2008-2017.
- Saiz G., Byrne K.A., Butterbach-Bahl K., Kiese R., Blujidea V., Farrel E.P., 2006. Stand age-related effects on soil respiration in a first rotation Sitka spruce chronosequence in central Ireland. *Global Change Biology* **12**, 1007-1020.
- Salisbury F.B., Ross C.W., 1999. Fisiologia vegetale. Zanichelli, Bologna, 792 pp.
- Scandellari F., Tonon G., Thalheimer M., Ceccon C., Gioacchini P., Aber J. D., Tagliavini M., 2007. Assessing nitrogen fluxes from roots to soil associated to rhizodeposition by apple (*Malus domestica*) tree. *Trees* **21**, 499-505.
- Schimel D.S., 1995. Terrestrial ecosystems and the carbon cycle. *Global Change Biology* **1**, 77-91.
- Schimel D.S., House J.I., Hibbard K.A., Bousquet P., Ciais P., Peylin P., Braswell B.H., Apps M.J., Baker D., Bondeau A., Canadell J., Churkina G., Cramer W., Denning A.S., Field C.B., Friedlingstein P., Goodale C., Heimann M., Houghton R.A., Melillo J.M., Moore III B., Murdiyarso D., Noble I., Pacala S.W., Prentice I.C., Raupach M.R., Rayner P.J., Scholes R.J., Steffen W.L. and Wirth C., 2001. Recent patterns and mechanisms of carbon exchange by terrestrial ecosystems. *Nature* **414**:169-172.
- Schlesinger W.H., Andrews J.A., 2000. Soil respiration and global carbon cycle. *Biogeochemistry*, **48**, 7–20.
- Schulze D.E., Wirth C. and Heimann M., 2000. Managing forests after Kyoto. *Science* **289**, 2058-2059.
- Simoni G., 2001. Effetti della tecnica di somministrazione dei nutrienti sulla produzione e sulla qualità dei frutti di melo (cv Mondial Gala) Tesi di Laurea dell'Università degli Studi di Bologna.
- Smith P., 2004. Carbon sequestration in croplands: the potential in Europe and the global context. *European Journal of Agronomy*. **20**, 229-236
- Soil Survey Staff, 1999. Soil Taxonomy. Agricultural Handbook No. 436. Soil Conservation Service, US Department of Agriculture, pp. 870.
- Solimando D., 2004. Ruolo della mineralizzazione dell'azoto contenuto nei residui colturali nella nutrizione azotata del melo (*Malus communis*). Tesi di Laurea dell'Università degli Studi di Bologna.
- Staddon P.L., 2004. Carbon Isotopes in functional soil ecology. *TRENDS in Ecology and Evolution* **19** (3), 148-154.
- Subke J.-A., Hahn V., Battipaglia G., Linder S., Buchmann N., Cotrufo M.F., 2004. Feedback interactions between needle litter decomposition and rhizosphere activity. *Oecologia* **139**, 551–559
- Subke J.-A., Inghima I., Cotrufo F., 2006. Trends and methodological impacts in soil CO₂ efflux partitioning: a metaanalytical review. *Global Change Biology* **12**, 1-23.
- Tonon G., Boldregghini P., Grassi G., Panzacchi P., Seufert G. Influence of soil texture on soil respiration at four forest ecosystems. Poster presentato all'*Open Science Conference on the GHG Cycle in the Northern Hemisphere*. Sissi-Lassithi Crete GR – November 14-18, 2006.

- Verma S.B., Baldocchi D.D., Anderson D.E., Matt D.R., Clement R.J., 1986. Eddy fluxes of CO₂, water vapour, and sensible heat over a deciduous forest. *Boundary-Layer Meteorology* 36: 71-91.
- Wells C.E., Eissenstat D.M., 2001. Marked differences in survivorship among apple fine roots of different diameters. *Ecology* **82**, 882-892.
- Wibbe M.L., Blanke M.M., Lenz F., 1993. Effect of fruiting on carbon budgets of apple tree canopies. *Trees* **8**, 56-60.
- Zhou G., Liu S., Li Z., Zhang D., Tang X., Zhou C., Yan J., and Mo J. 2006. Old-Growth Forests Can Accumulate Carbon in Soils *Science* **314**, 1417.