

Università degli studi della Tuscia

DOTTORATO DI RICERCA

in

ECOLOGIA FORESTALE

ciclo XXVI

**ANALISI DELLA RESPIRAZIONE DEL SUOLO
IN FAGGETE SOTTOPOSTE AD INTERVENTI INNOVATIVI DI GESTIONE
FORESTALE**

Dottorando MARCO MICALI

Tutore

Dottor Giorgio Matteucci

Correlatore

Dottor Mario Cammarano

Coordinatore del corso

Prof. Paolo De Angelis

Esame finale

anno 2015

Sommario

RIASSUNTO	1
CAPITOLO I: FORESTE E CICLO DEL CARBONIO	3
1.1 Introduzione	3
1.2 Ecosistemi forestali e assorbimento del carbonio	4
1.3 Gestione forestale e ciclo del carbonio	7
1.3.1 <i>Principali cambiamenti apportati dalla gestione forestale</i>	8
1.3.2 <i>Radiazione solare</i>	8
1.3.3 <i>Umidità</i>	8
1.3.4 <i>Contenuto di carbonio ed azoto</i>	9
1.4 La respirazione del suolo negli ecosistemi forestali	9
1.4.1 <i>Effetto della temperatura del suolo</i>	10
1.4.2 <i>Effetto dell'umidità del suolo</i>	11
1.4.3 <i>Effetto della vegetazione</i>	11
1.4.4 <i>Effetto della qualità del substrato</i>	11
1.4.5 <i>Effetto della gestione forestale</i>	12
CAPITOLO II: OBIETTIVI	14
CAPITOLO III: MATERIALI E METODI	15
3.1 Siti di studio	15
3.1.1 <i>Design sperimentale applicato ai siti</i>	15
3.1.2 <i>Area test Chiarano-Sparvera</i>	17
3.1.3 <i>Area test Cansiglio</i>	20
3.1.4 <i>Area test Mongiana</i>	24
3.2 Design di campionamento della respirazione del suolo	26
3.2.1 <i>Design sperimentale applicato a Chiarano-Sparvera e Mongiana</i>	26
3.2.2 <i>Design sperimentale per la foresta del Cansiglio</i>	27
3.3 Dati strutturali	27
3.4 Misure del clima e del microclima	29
3.5 Misure di respirazione del suolo nei siti	30
3.5.1 <i>Misure di respirazione in camera termostata (water bath)</i>	31
3.6 Studio della lettiera fogliare: litter bags e trappole per la lettiera	32
3.7 Stock di carbonio nel suolo	34
3.8 Analisi statistiche	35
3.8.1 <i>Relazione tra respirazione del suolo e temperatura</i>	35

3.8.2 Relazione tra la sensitività della respirazione alla temperatura e la struttura forestale	36
3.8.3 Relazione tra le temperature del suolo e il taglio	36
3.8.4 Relazione tra respirazione e presenza di lettiera	36
3.8.5 Calcolo della respirazione cumulativa per il sito di Chiarano-Sparvera	36
CAPITOLO IV: RISULTATI	38
4.1 Chiarano-Sparvera	38
4.1.1 Analisi strutturale	38
4.1.2 Relazione tra la respirazione del suolo e la temperatura	38
4.1.3 Calcolo della respirazione cumulativa	41
4.1.4 Relazione tra la sensitività della respirazione alla temperatura e la struttura forestale	42
4.1.5 Relazione tra le temperature del suolo e il taglio	44
4.1.6 Relazione tra respirazione e presenza di lettiera	46
4.2 Mongiana	46
4.2.2 Relazione tra la respirazione del suolo e la temperatura	47
4.2.3 Relazione tra la sensitività della respirazione alla temperatura e la struttura forestale	48
4.2.4 Relazione tra respirazione e presenza di lettiera	51
4.3 Cansiglio	51
CAPITOLO V: DISCUSSIONE DEI RISULTATI	52
CAPITOLO VI: CONCLUSIONI	54
BIBLIOGRAFIA	55

RIASSUNTO

La respirazione degli ecosistemi terrestri è il processo tramite il quale la CO_2 , fissata dalle piante con la fotosintesi torna in atmosfera. La respirazione del suolo, fatta di processi autotrofi (respirazione radicale) ed eterotrofi (decomposizione sostanza organica e carbonio del suolo) rappresenta la parte più rilevante della respirazione degli ecosistemi forestali. La respirazione del suolo è governata da diversi fattori, climatici e funzionali (temperatura, contenuto idrico del suolo, microorganismi) che stagionali (stadio evolutivo del bosco, disturbi). Negli foreste mediterranee e temperate, uno dei principali fattori che può influenzare i processi respirativi è la gestione forestale. Nel presente studio sono stati messi a confronto, in tre faggete, diverse tipologie di gestione forestale, al fine di capire in che modo potesse essere influenzata la respirazione del suolo dai diversi tagli. In ognuno dei siti si sono confrontati i trattamenti tradizionalmente applicati (in genere diradamenti dal basso) con trattamenti mirati alla multifunzionalità che hanno comportato selezione di piante candidate e diradamenti di tipo misto. In due casi, uno dei trattamenti è consistito nella posticipazione del diradamento. Le misure di respirazione del suolo sono state svolte con un sistema portatile di tipo dinamico-chiuso ogni 15-30 giorni, su 18 punti in tre aree di saggio in ogni trattamento e sito.

A parte in casi sporadici di particolare siccità in interazione con il contenuto idrico del suolo, in tutti i siti e trattamenti è emerso che il fattore di controllo principale della respirazione è la temperatura del suolo. Dalla analisi dei dati è emerso che, dopo i tagli, il contributo più forte alla respirazione è dato dalla componente autotrofa (respirazione radicale). Infatti, le piante rimaste, nelle nuove condizioni microclimatiche generate dai tagli, hanno risposto prontamente agli interventi di gestione, e sono risultate più attive a livello fotosintetico e di conseguenza in quello respiratorio. La sensibilità della risposta alla temperatura è risultata influenzata significativamente dalla struttura forestale. Infatti, nel nostro studio è stata trovata una forte correlazione positiva tra la risposta della respirazione alla temperatura del suolo e l'area basimetrica presente nei siti di campionamento, sia prima che dopo il taglio. Inoltre, il numero di piante asportate è risultato positivamente correlato con i residui della relazione tra respirazione, temperatura e area basimetrica.

Dai risultati, è quindi emerso che, nel valutare la risposta della respirazione in ecosistemi forestali gestiti, è di fondamentale importanza inserire parametri strutturali (come l'area basimetrica), anche nei modelli che descrivono la respirazione.

Parole chiave: ciclo del carbonio, respirazione del suolo, gestione forestale, interventi innovativi, sensibilità della respirazione del suolo alla temperatura

ABSTRACT

Respiration of terrestrial ecosystems is the process through which the CO₂ fixed by photosynthesis goes back to atmosphere. Soil respiration, made of autotrophic (roots) and heterotrophic processes (organic matter decomposition) represents the most relevant components of forest ecosystems. Soil respiration is driven by various factors both climatic and functional (soil temperature and water content, soil biota) and structural (age, disturbances). In Mediterranean and temperate forests, forest management is one of the most important factor that can influence respiration processes. In the present study, we compared different types of forest management in three beech forests, in order to understand how the different management options may impact on soil respiration. In each of the sites, the traditionally applied forest management (generally thinning from below) with multipurpose management options that involved the selection of “candidate trees” and mixed thinnings (from below and above). In two cases, one of the options has been the postponement of thinning. Soil respiration measurements were performed with a closed-dynamic portable system, every 15-30 days on 18 points in three sample areas in each treatment and site.

Except in rare cases of intense drought in interaction with the soil water content, in all sites and treatments it showed that the main factor controlling the breathing is the soil temperature. From data analysis, the autotrophic component (roots) resulted the largest contributor to soil respiration. In this respect, the new microclimatic conditions after thinnings caused a prompt response of the remaining plants, that resulted more active in photosynthesis (growth) and respiration. Sensitivity of response to temperature was significantly related to forest structure. In our study, we found a strong positive correlation between the response of soil respiration and temperature and the basal area of trees in the sites (basal area before and after treatments). Furthermore, the number of harvested plants was positively correlated with the residuals of the relations between respiration, temperature and basal area.

From the results, it emerged that, when evaluating the response of soil respiration in managed forests, it is of fundamental importance the consideration of structural variables (e.g. basal area). This is important also for models that may serve to estimate and simulate soil respiration.

Keywords: carbon cycle, soil respiration, forest management, innovative management, sensitivity of soil respiration to temperature

CAPITOLO I: FORESTE E CICLO DEL CARBONIO

1.1 Introduzione

Le foreste giocano un ruolo fondamentale nel ciclo del carbonio a livello globale, grazie alla loro capacità di scambio con l'atmosfera, sequestrando ed immagazzinando la CO₂ atmosferica tramite la fotosintesi e rilasciandola nell'atmosfera stessa con i processi respirativi. Le foreste possono quindi comportarsi come *Sink* (assorbitrici) di carbonio quando il bilancio tra la CO₂ assorbita (fotosintesi) e quella emessa (respirazione) è positivo, al contrario come *Source* (emettitrici) quando tale bilancio è negativo (Landsberg and Gower 1997; Malhi et al. 1999). Si considera che, a livello globale, l'attuale stock di carbonio (C) delle foreste sia di 861 ± 66 Pg C, e che la sua ripartizione sia di 383 ± 30 Pg C (44%) nel suolo, 363 ± 28 Pg C (42%) nella biomassa viva (sia epigea che ipogea), 73 ± 6 (8%) nel legnomorto e di 43 ± 3 Pg C (5%) nella lettiera (Pan et al. 2011). Le emissioni annue di carbonio, derivanti dall'utilizzo dei combustibili fossili e produzione di cemento e dalla deforestazione delle foreste tropicali, ammonterebbero a 9.9 Pg C (Canadell et al. 2007), di questi circa il 45% rimangono nell'atmosfera, perlopiù sotto forma di anidride carbonica, mentre la restante quantità viene assorbita dagli ecosistemi terrestri (30%) e dagli oceani (24%). Fino ad una cinquantina di anni fa per ogni tonnellata di CO₂ emessa, circa il 60% veniva rimosso dai sinks naturali (oceani ed ecosistemi terrestri), mentre oggi siamo tra il 50 ed il 55%. Questo declino dell'efficienza dei sinks naturali sembra maggiormente dovuto agli oceani, mentre per gli ecosistemi terrestri, pur caratterizzata da una grande variabilità interannuale, non è stata trovata una tendenza al declino (Figura 1). Gli ecosistemi terrestri hanno altresì mostrato un aumento del sequestro di carbonio, in particolare negli ultimi due decenni del secolo scorso (Nemani et al. 2003). Tra gli ecosistemi terrestri sono in particolare quelli forestali, soprattutto delle zone temperate e boreali che hanno aumentato la loro produttività, in relazione all'aumento delle deposizioni azotate e alla ricolonizzazione dei terreni abbandonati dall'agricoltura (Speicker et al. 1996, Boisvenue e Running 2006). Va però segnalato che, nel primo decennio di questo secolo, ci sono studi che hanno segnalato un declino di produttività se confrontato con i dati precedenti dovuto al susseguirsi di annate calde e secche in diverse aree del globo (Zhao e Running 2010).

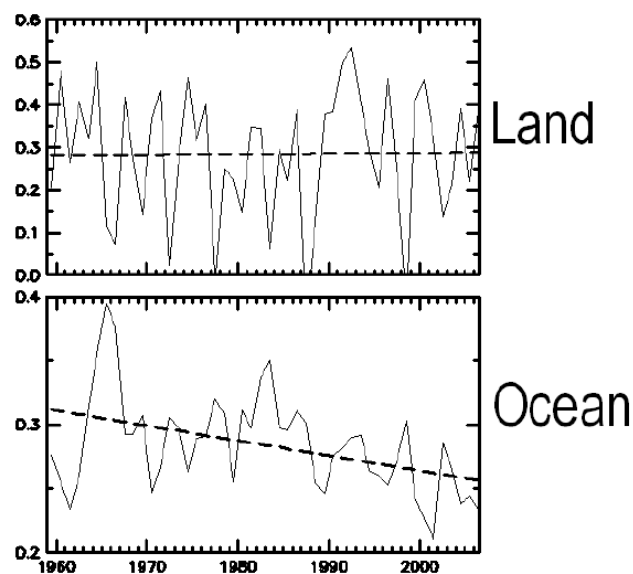
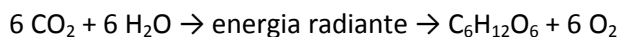


Figura 1. Dinamica temporale dei sink naturali. Mentre è evidente il trend decrescente da parte degli oceani, gli ecosistemi terrestri non mostrano una tendenza analoga da Canadell et al. (2007)

1.2 Ecosistemi forestali e assorbimento del carbonio

Il sequestro di carbonio da parte degli ecosistemi forestali e degli oceani, sono i più importanti contributi per il contenimento della concentrazione dei gas ad effetto serra nell'atmosfera. L'accumulo del carbonio nelle foreste avviene attraverso l'assorbimento della CO_2 atmosferica e la sua assimilazione nella biomassa (epigea ed ipogea): il carbonio atmosferico, in forma gassosa (CO_2), viene fissato sotto forma di carbonio organico negli ecosistemi, attraverso il processo fotosintetico di vegetali superiori, alghe, licheni e batteri fotosintetici. In questo processo, la CO_2 atmosferica viene convertita in carboidrati grazie all'energia radiante:



L'assorbimento lordo di carbonio dall'atmosfera prende il nome di produzione primaria lorda (*GPP Gross Primary Production*).

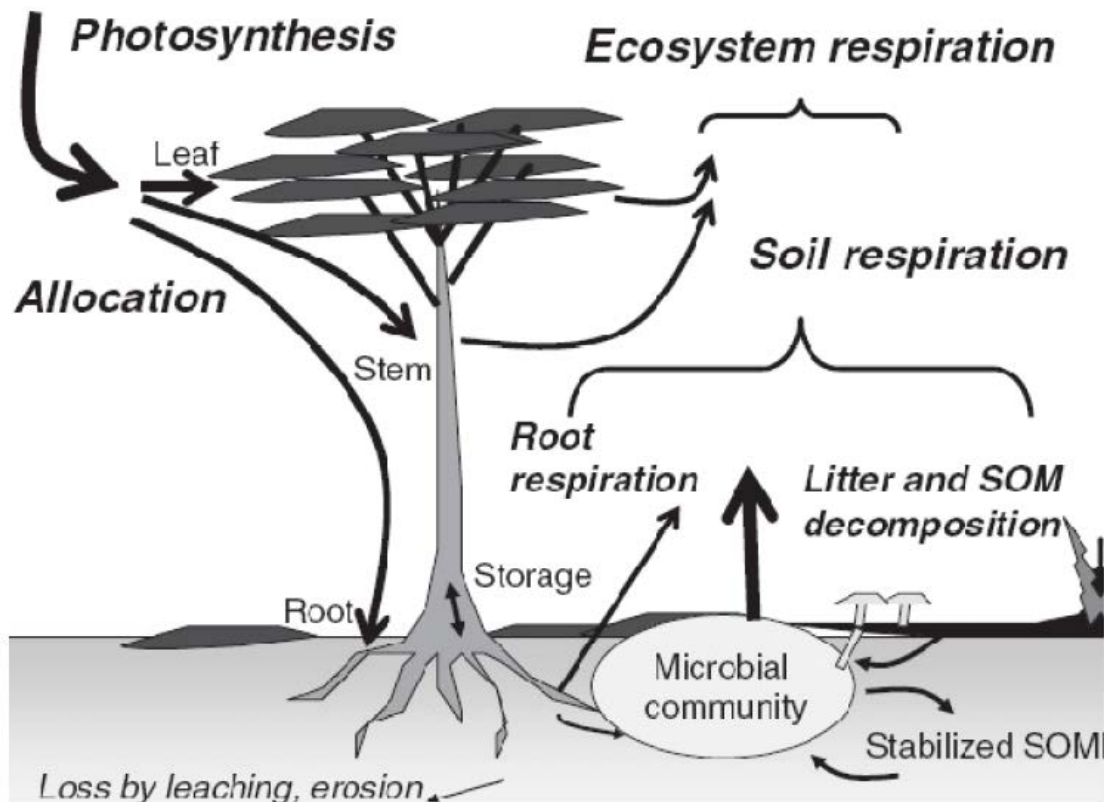
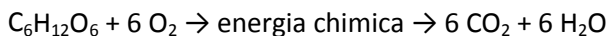


Figura 2. Processi coinvolti nel ciclo del carbonio degli ecosistemi forestali (da Trumbore et al. 2006)

Parte del carbonio assimilato viene però utilizzato dalla pianta stessa per soddisfare le proprie esigenze metaboliche, dando origine ad un flusso in uscita che prende il nome di respirazione autotrofa (*Ra autotrophic respiration*).



La differenza fra produzione primaria lorda e respirazione autotrofa rappresenta la produzione annuale di carbonio delle piante, la produzione primaria netta (*NPP net primary production*) (Figura 3).

$$\text{NPP} = \text{GPP} - \text{Ra}$$

Un'altra parte di carbonio viene rilasciata in atmosfera sotto forma di CO_2 ad opera degli organismi decompositori della sostanza organica tramite la respirazione eterotrofa (*Rh heterotrophic respiration*). Sottraendo la respirazione eterotrofa alla produzione primaria netta, si ha la produzione primaria netta di ecosistema *NEP (net ecosystem production)* detta anche *NEE (Net Ecosystem Exchange)*, che corrisponde alla quantità complessiva di carbonio che in un certo intervallo di tempo è immagazzinata o emessa da un ecosistema.

$$\text{NEP} = \text{NPP} - \text{Rh} = \text{GPP} - (\text{Ra} + \text{Rh})$$

La somma di Ra e Rh rappresenta la respirazione di ecosistema (Re). Tra gli ecosistemi terrestri, le foreste svolgono sicuramente il ruolo più incisivo nel ciclo del carbonio, perché controllano il 70% degli scambi di carbonio fra atmosfera e biosfera (Waring e Schlesinger, 1985).

La NEP è la misura del reale assorbimento di un ecosistema nel breve e medio termine o in assenza di disturbi rilevanti. Infatti, nel lungo termine, una parte del carbonio, che può anche essere rilevante, viene rilasciato in atmosfera in seguito a gestione forestale o per disturbi naturali. La parte di produttività (carbonio) che resta dopo i disturbi viene definita Produzione Netta di Bioma (*Net biome Production*) che tiene conto della scala spaziale (in un certo territorio ci sono ecosistemi disturbati e non disturbati) e/o temporale (i disturbi in momenti non determinati nel corso del ciclo di vita)

$$NBP = NEP - \text{Disturbi}$$

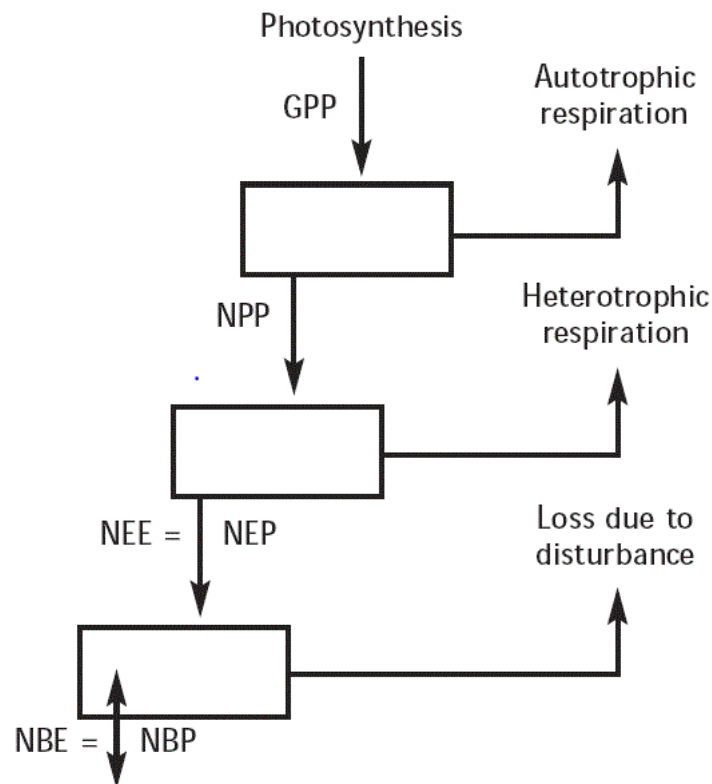


Figura 3. Rappresentazione schematica dei parametri del ciclo del carbonio

Tra gli ecosistemi terrestri, le foreste svolgono sicuramente il ruolo più incisivo nel ciclo del carbonio, perché controllano il 70% degli scambi di carbonio fra atmosfera e biosfera (Waring e Schlesinger, 1985).

Il ciclo del carbonio negli ecosistemi forestali varia in maniera significativa nel tempo (variazioni stagionali, annuali) e nello spazio (a livello locale, regionale, globale) e tutti i cambiamenti sono guidati da variazioni naturali (cambiamenti climatici, siccità, incendi, etc.), o di natura antropica (deforestazione, cambio di uso del suolo, pratiche di gestione).

1.3 Gestione forestale e ciclo del carbonio

Da quando la crescita di biomassa delle foreste in Europa, dovuta a politiche di gestione forestale sostenibile, di conservazione degli ambienti naturali (es. parchi) e dal fenomeno dell'abbandono delle campagne con conseguente ricolonizzazione da parte dei boschi, è di molto superiore rispetto alla biomassa forestale prelevata, le foreste europee sono diventate un sink di carbonio sempre più rilevante, sicuramente il maggiore tra gli ecosistemi terrestri europei. Tra il 2005 ed il 2010, la media annuale di carbonio sequestrato da tali foreste è stata di 870 milioni di tonnellate, pari circa il 10% del totale delle emissioni di gas serra.

In ogni ecosistema forestale la struttura del bosco influenza direttamente tutti quei parametri (irraggiamento solare, temperatura e l'umidità dell'aria e del suolo, quantità di acqua piovana che arriva al suolo, vento), andando così a creare, per ogni tipologia di ecosistema, un proprio microclima (Figura 4). Le attività di gestione interagiscono con la struttura forestale andando a modificare, in differente maniera, tutti questi parametri microclimatici.

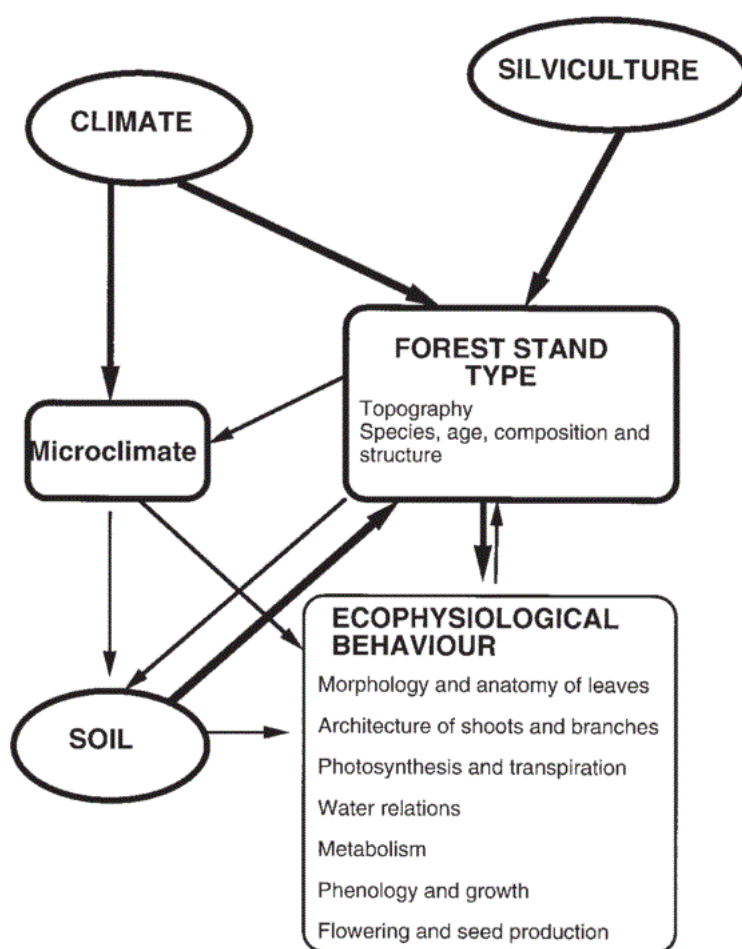


Figura 4. Relazioni tra foresta e selvicoltura: modificazione del microclima.

In fustaie adulte, caratterizzate da una copertura pressoché continua data dalla chiusura delle chiome, interventi sia naturali, come la morte di uno o più individui, o di natura antropica, come le operazioni selvicolturali, vanno a modificare la struttura forestale, e, in seguito all'apertura della copertura forestale, anche le caratteristiche microclimatiche precedenti agli interventi. Ogni modificazione apportata ai

parametri microclimatici ha un effetto più o meno diretto sul ciclo del carbonio, cambiando le dinamiche di assorbimento (maggiore luce a disposizione delle chiome), i tassi di decomposizione della lettiera e del carbonio del suolo con conseguenti effetti sulla componente di respirazione eterotrofa ed autotrofa del suolo. Andando infatti a rimuovere alcune piante (es. tramite diradamenti) si inducono dei cambiamenti che influenzano i processi ecofisiologici sulle piante rimaste (fotosintesi, traspirazione, allocazione) (Figura 4).

1.3.1 Principali cambiamenti apportati dalla gestione forestale

1.3.2 Radiazione solare

Generalmente le piante tendono ad organizzare le chiome in modo tale da massimizzare la fotosintesi (fissazione CO_2), in relazione alle loro capacità di adattamento ai diversi regimi luminosi. Usualmente, in fustaie con alta variabilità verticale, la parte che contribuisce maggiormente all'assorbimento di CO_2 è quella più esposta alla luce. Le foglie che si trovano nella parte più alta della pianta, dette foglie di luce, possiedono un'alta efficienza fotosintetica in modo da ottimizzare l'alta quantità e qualità di luce che ricevono (De Angelis and De Luca 1998, Matteucci et al. 1999). Le dinamiche di accrescimento e la struttura forestale determinano una competizione tra le piante per la risorsa luce. L'apertura di una buca nella foresta, data da un taglio che interrompe la continuità tra le chiome, crea una situazione in cui la luce può penetrare che determina, nelle piante rimanenti una risposta da parte delle foglie di luce e di quelle in posizione intermedia che possono incrementare la loro attività. A seconda delle capacità di adattamento della specie forestale, le foglie degli strati più bassi della pianta (foglie di ombra), potranno contribuire all'aumento di efficienza ovvero, qualora le variazioni delle condizioni di radiazione fossero troppo alte, potrebbero subire danni (Aussenac, 2000). In generale, se l'aumento dell'intensità luminosa all'interno della foresta, determinato da operazioni selvicolturali, porta ad un aumento dell'attività fotosintetica; è però buona norma, prima di operare dei tagli considerare attentamente le condizioni ecologiche del bosco: tagli intensi in fustaie chiuse o in specie maggiormente adattate a condizioni di illuminazione più ridotte (sciafile) possono anche produrre effetti negativi come stress da cambiamento di temperatura o fenomeni di fotoinibizione.

1.3.3 Umidità

Anche gli eventi piovosi sono fortemente influenzati dalla struttura forestale e dalla *canopy* delle piante, in relazione all'intercettazione dell'acqua in caduta e la sua distribuzione al suolo (Aussenac, 2000). Una fustaia con una copertura continua da parte delle chiome, può arrivare ad intercettare il 30 - 45% delle precipitazioni annuali, in particolare quando gli eventi di precipitazione non sono rilevanti. Gli interventi selvicolturali, riducendo la copertura, vanno ad aumentare la quantità di acqua che arriva al suolo. Ma il ciclo dell'acqua negli ecosistemi forestali è legato a molti altri fattori, non solo all'ingresso di acqua sul terreno. Andando a guardare l'equazione del bilancio idrologico vediamo che:

$$D = P - (It + Evt + \Delta s)$$

dove

D è il deflusso idrico,

P le precipitazioni, cioè il parametro che quantifica le immissioni idriche nell'ecosistema. Per questo parametro sono importanti sia la quantità di acqua, sia la sua distribuzione sul terreno.

It è l'acqua intercettata dalle chiome ed rievaporata

E_{vt} è l'evapotraspirazione. Questo parametro dipende da altri due fattori: l'evaporazione dal suolo e la traspirazione delle piante. Il peso che hanno questi due fattori sul totale dell'evapotraspirazione dipende dal tipo e dalla struttura della copertura che va ad influenzare la radiazione solare, la temperatura, la superficie evaporativa, l'umidità dell'aria e la velocità del vento.

In generale le fustaie possiedono alte quote evapotraspirative rispetto ad altri tipi di vegetazione; ogni apertura della copertura arborea coincide con una riduzione della quantità di acqua consumata da parte delle piante (Aussenac, 2000).

1.3.4 Contenuto di carbonio ed azoto

La gestione forestale ha effetti sul contenuto di azoto e carbonio del suolo in quanto, dopo i tagli, si hanno variazioni delle caratteristiche climatiche che regolano la decomposizione e disponibilità di elementi, ma soprattutto per il nuovo input dei due elementi dovuto all'apporto di materiale organico al suolo. Risulta quindi importante conoscere la quantità e la tipologia dei residui selvicolturali dopo i tagli, e quale possa essere il tasso di mineralizzazione della foresta.

Le operazioni selvicolturali hanno influenze anche sul pool di carbonio nel suolo (*SOC soil organic carbon*). Solitamente con le operazioni di esbosco si hanno dei movimenti e/o rimescolamenti del materiale organico e dello strato di lettiera nel suolo minerale (Yanai et al., 2003), una più o meno marcata erosione del suolo ed una liscivazione del carbonio organico disciolto nel suolo. Questi fattori, di solito, comportano una riduzione della SOC. Una buona organizzazione dei lavori forestali può ridurre questi processi, riducendo di conseguenza la perdita di SOC.

Riepilogando possiamo dire che un buon trattamento selvicolturale, generalmente porta ad un accrescimento delle piante rimaste come conseguenza di:

- aumento della luce nelle parti più basse della chioma delle piante, con conseguente incremento dell'attività fotosintetica
- aumento di disponibilità idrica del suolo e diminuzione del consumo di acqua con conseguente influenza positiva sulla fotosintesi, e quindi sulla crescita
- incremento dei composti azotati rilasciati attraverso la mineralizzazione (aumentata in conseguenza dell'aumento di luce e di temperatura sulla superficie del suolo)

1.4 La respirazione del suolo negli ecosistemi forestali

Con il termine "respirazione del suolo" viene definita quella serie di processi per cui il carbonio accumulato nel suolo e nelle radici, torna nell'atmosfera sotto forma di CO₂. Possiamo suddividere la respirazione del suolo in due componenti principali: la respirazione autotrofa, associata alla respirazione delle radici e delle micorrize associate, e la respirazione eterotrofa, associata alla decomposizione della lettiera (superficiale e sotterranea) e della sostanza organica del suolo ed ad altri fattori minori quali l'ossidazione dei carbonati del suolo e la respirazione della fauna del suolo (Raich & Schlesinger, 1992). Stime globali di respirazione del suolo che variano da 68-80 PgC a⁻¹ (Raich & Schlesinger, 1992) a 100 PgC a⁻¹ (Musselman & Fox, 1991), rendono l'emissione di CO₂ dal suolo il secondo flusso di carbonio fra ecosistema terrestre e atmosfera dopo la GPP (Raich & Schlesinger, 1992; Raich & Potter, 1995; Raich et al., 2002). Negli ecosistemi forestali, la respirazione del suolo oscilla tra i 180 e i 1510 gC m² a⁻¹ (Raich & Nadelhoffer, 1989) con le emissioni più elevate registrate nelle foreste di latifoglie sempreverdi tropicali e subtropicali che contribuiscono fino al 30% della respirazione planetaria annuale. Il contributo della respirazione del suolo alla respirazione totale

di ecosistema, può variare tra gli ecosistemi in dipendenza della biomassa presente nel sito (Longdoz et al. 2000), del tipo di copertura vegetale (Janssens et al., 1999), o età delle piante (Buchmann, 2000).

Da studi sui bilanci di carbonio di 15 foreste europee, è emerso che la respirazione del suolo rappresenta dal 60 all'80% della respirazione totale dell'ecosistema (Meir et al., 1996; Law et al., 1999; Janssens et al., 2000). Si può quindi dedurre che la respirazione del suolo può determinare il bilancio netto di carbonio degli ecosistemi forestali. Ciò sta ad indicare che anche variazioni minime di emissione di CO₂ dal suolo possono alterare significativamente il bilancio del carbonio degli ecosistemi terrestri e innescare un feedback positivo al riscaldamento globale del pianeta (Schleser, 1982; Jenkinson et al. 1991; Raich & Schlesinger, 1992; Kirschbaum, 1995; Trumbore et al., 1996; Cox et al. 2000). Lo studio delle emissioni di CO₂ dal suolo ha ricevuto negli ultimi anni un'attenzione crescente nell'ambito degli scambi del carbonio tra ecosistemi terrestri ed atmosfera, ma ancora sono molti gli aspetti che richiedono un ulteriore approfondimento (Trumbore, 2006). Molteplici studi evidenziano che l'emissione di CO₂ dal suolo è sensibile a diversi fattori ambientali che agiscono sia direttamente che indirettamente. La conoscenza di questi fattori e della loro interazione è di fondamentale importanza per la previsione degli effetti del cambiamento climatico. I principali fattori che regolano la respirazione del suolo sono:

- la temperatura del suolo
- l'umidità del suolo
- la vegetazione
- la qualità del substrato
- gestione forestale e uso del suolo

1.4.1 Effetto della temperatura del suolo

Tra le variabili microclimatiche la temperatura del suolo è quella più fortemente correlata con la respirazione del suolo. Molteplici studi hanno evidenziato come variazioni di temperatura, anche di modesta entità, possono avere grande influenza sui processi di decomposizione della sostanza organica e quindi sulla quantità di carbonio emessa dal suolo. Relazioni di tipo esponenziale sono comunemente utilizzate per mettere in relazione il tasso di respirazione del suolo con la temperatura, in particolare dove non sono presenti forti stress idrici nel suolo (Schlentner & van Cleve, 1985; Cropper & Gholz, 1991; Hanson et al., 1993; Peterjohn et al., 1994; Raich & Potter, 1995; Boone et al., 1998; Davidson et al., 1998; Epron et al., 1999; Buchmann, 2000; Moren & Lindroth, 2000). L'equazione più comune e più utilizzata per esprimere la respirazione del suolo in funzione della temperatura è quella del Q₁₀. Si definisce con il termine Q₁₀ l'aumento della respirazione (R) che corrisponde ad un aumento di 10°C della temperatura del suolo:

$$Q_{10} = R(T+10)/R(T)$$

Assumendo un modello esponenziale del tipo $R(T) = A \cdot \exp(K \cdot T)$, la variazione della respirazione al variare della temperatura può essere espressa come:

$$R(T) = R(T_{base}) \cdot Q_{10}^{((T-T_{base})/10)}$$

Dove T_{base} è una temperatura di riferimento a cui è stata misurata la respirazione R(T_{base}). Nel seguito noi useremo soprattutto la formulazione con l'esponenziale in cui il coefficiente K assume il ruolo di sensitività della respirazione alla temperatura. Ricordiamo comunque, che la relazione tra K e Q₁₀ è:

$$Q_{10} = \exp(10 \cdot K).$$

Raich e Schlesinger (1992) riportano delle stime di riferimento per i valori di Q_{10} , che per una vasta gamma di ecosistemi mondiali, risultano compresi tra 1.3 – 3.3, da cui deriva un valore medio di 2.4. Anche il Q_{10} non è certamente un valore stabile, ed è stato osservato che decresce con l'aumento di temperatura e con la diminuzione dell'umidità relativa del suolo (Kirschbaum, 1995; Rayment & Jarvis, 2000; Xu e Qi, 2001a; Reinchestein, 2002a, 2002b, 2003). Va ricordato anche che la temperatura ha un effetto positivo sulla produzione di biomassa radicale ed essudati. Ciò comporta sia una maggiore respirazione autotrofa degli organi ipogei, e sia una maggiore disponibilità di nutrienti per i microrganismi, con conseguente incremento della respirazione del suolo (Giardina et al. 2005).

1.4.2 Effetto dell'umidità del suolo

Anche la variazione del contenuto idrico del suolo ha un effetto sulla decomposizione e, di conseguenza, sulla respirazione del suolo. Si possono distinguere tre fasi nella risposta della respirazione del suolo al contenuto idrico. La prima fase è con suolo relativamente secco (5-10% della capacità di campo), dove al crescere del contenuto idrico del suolo, cresce l'attività metabolica. La seconda fase rappresenta l'intervallo di valori di umidità prossimi alla capacità di campo del suolo (40-70%), in questa fase variazioni del contenuto idrico non portano a sensibili variazioni della respirazione del suolo. La terza fase dove il contenuto idrico è tale da saturare i micropori, la respirazione è limitata dalla diminuzione del coefficiente di diffusione dell' O_2 e della CO_2 . L'effetto della limitazione dell'umidità sulla respirazione è evidente se vengono osservati i picchi di emissione di CO_2 dal suolo che si verificano quando dopo dei periodi secchi avviene un evento piovoso. Fenomeno che prende il nome di "Birch effect" e consiste nella stimolazione di breve periodo della decomposizione, dovuta alla rapida risposta della biomassa microbica all'aumento di umidità del suolo (Jarvis et al., 2007). Le disponibilità idriche sono in stretta correlazione con il regime delle precipitazioni, che in un quadro di cambiamenti climatici è previsto possa variare sia in intensità che in frequenza sia dei periodi siccitosi che di quelli piovosi (IPCCC, 2001).

1.4.3 Effetto della vegetazione

I tassi di respirazione del suolo variano significativamente tra i maggiori biomi (Schlesinger, 1977; Singh & Gupta, 1977; Raich & Schlesinger 1992) e fra diverse comunità vegetali. Tali scoperte indicano che i tipi vegetazionali influenzano la respirazione del suolo. La vegetazione esercita questa influenza sulla respirazione attraverso vari meccanismi:

- Quantità e qualità dei substrati organici
- La necromassa vegetale (Gillon et al., 1999) intesa sia come lettiera superficiale che sotterranea (radici fini, essudati radicali) che è la principale fonte di carbonio per i microrganismi decompositori del suolo.
- Influenze nel microclima: la copertura vegetale gioca un ruolo fondamentale nella determinazione del microclima del suolo. Attraverso l'intercettazione dell'energia radiante, la vegetazione cambia il bilancio energetico del suolo (Jones, 1996; Raich & Tufekcioglu, 2000). Tramite l'intercettazione delle precipitazioni e l'estrazione dell'acqua del suolo per traspirazione, va ad influenzare il regime idrico del suolo (Rutter & Morton, 1977). In alcuni casi l'influenza della vegetazione sul microclima del suolo è stata sufficiente per spiegare le differenze tra i tassi di respirazione del suolo in differenti tipi vegetazionali (Raich and Tufekcioglu, 2000).

1.4.4 Effetto della qualità del substrato

Il suolo può essere definito come un sistema complesso (una mescolanza di sostanze minerali ed organiche), derivato dall'interazione sia dei fattori biotici che abiotici (Susmel, 1990). Il carbonio può essere rinvenuto nel suolo nelle sue due forme, quella inorganica e quella organica. Il carbonio inorganico si trova sia sotto forma gassosa, come anidride carbonica presente nell'atmosfera tellurica in concentrazione

superiori a quella atmosferica, sia sotto forma solida come ione CO_3^- nei carbonati (Trumbore & Torn, 2003). Il carbonio organico o sostanza organica del suolo, viene definita da Sequi (2005) come una miscela eterogenea e complessa di tutti i materiali organici, viventi e non viventi, presenti in qualsiasi forma nel suolo. Pertanto la sostanza organica del suolo risulta costituita essenzialmente da carbonio (in percentuale variabile tra il 40 ed il 60%), ossigeno, idrogeno ed azoto. Il carbonio entra a far parte del suolo attraverso la lettiera sia epigea che ipogea. Con il termine lettiera epigea si indicano i residui organici (foglie, rametti, cortecce, escrementi, spoglie di animali, fiori, frutti, muschi, licheni, funghi e alghe) prevalentemente di origine vegetale, che intatti o poco trasformati si collocano sulla superficie del suolo. Per lettiera ipogea viene invece inteso tutto il carbonio trasferito al suolo dalle radici e dalle micorrize per essudazione, sostituzione di tessuti superficiali, mortalità, nutrizione da parte di organismi radicolari. Questa sostanza organica fresca apportata viene successivamente decomposta attraverso varie fasi in cui i numerosi macro, meso e micro organismi del suolo, svolgono un ruolo determinante (Sequi, 2005). Il processo di degradazione della sostanza organica da parte dei microrganismi prevede una fase iniziale di utilizzazione di composti facilmente degradabili (zuccheri semplici, aminoacidi, molte proteine, alcuni polisaccaridi ed altri composti labili), con conseguente rilascio di CO_2 , NH_4 , acidi organici ed altri composti intermedi parzialmente ossidati. Le macromolecole costituenti i residui vegetali sono invece decomposte in tempi diversi. Queste vengono inizialmente ridotte in unità strutturali più semplici tramite enzimi specializzati, ed i prodotti sono successivamente utilizzati dai microrganismi come fonte di energia per le sintesi cellulari (Sequi, 2005). La decomposizione chimica della sostanza organica presente nel suolo è principalmente attuata dalla microflora ed è quindi il risultato dell'attività collettiva delle comunità microbiche, essendo legata all'acquisizione dei nutrienti rilasciati dalla degradazione dei detriti (Moscatelli et al., 2005). Da ciò appare evidente che l'attacco enzimatico dei microrganismi decompositori alla lettiera e alla sostanza organica del suolo è influenzato dalla composizione chimica dei residui organici. La decomposizione avverrà quindi in tempi diversi, proporzionali alla qualità dei residui organici. Una lettiera di "alta qualità" contiene carbonio e nutrienti in forma subito disponibile per l'attività microbica che la utilizza in modo efficiente e ottimale, mentre nelle lettiere di "bassa qualità", l'attività microbica non si esprime al meglio, si allungano così i tempi di decomposizione. La "qualità" della lettiera è direttamente proporzionale alla concentrazione di N ed inversamente al contenuto di lignina e fenoli (Swift et al., 1979). Il tasso di decomposizione della sostanza organica del suolo è quindi dipendente dal rapporto C/N del substrato e dalla biomassa microbica. Con conseguenti differenze dei tassi di respirazione relativi alla decomposizione della sostanza organica di diversa qualità. Va comunque segnalato che la decomposizione non converte in CO_2 tutto il carbonio presente nella lettiera e nella sostanza organica: una parte viene trasferita al suolo, andandone ad aumentare lo stock di carbonio. Questa componente viene comunque in parte degradata in periodi successivi con tassi normalmente più lenti di quelli relativi alla lettiera di recente produzione.

1.4.5 Effetto della gestione forestale

La maggior parte della superficie forestale mondiale è sottoposta ad una qualche forma di controllo da parte dell'uomo; attività quali taglio di utilizzazione, il tipo di operazioni effettuate (modalità di esecuzione del taglio, quantità del residuo lasciato al suolo) e la programmazione degli interventi, il diradamento, la potatura e la rinnovazione assistita, la piantumazione anticipata dalla preparazione del sito ed il passaggio del fuoco possono alterare profondamente il bilancio del carbonio degli ecosistemi forestali ed, in questo senso, avere degli effetti significativi anche sulla respirazione del suolo (Tedeschi, 2003). Come già detto, a parità di altri fattori, la temperatura del suolo (direttamente correlata con la respirazione), è strettamente legata alla struttura forestale, in particolare alla densità di copertura. I diradamenti diminuiscono la densità delle piante, aumentano la luce in bosco, aumentano la disponibilità idrica e di nutrienti per le piante rimaste, cambiano le condizioni di temperatura ed umidità del suolo, e la quantità di radici vive nel suolo.

L'insieme di queste modificazioni porta a cambiamenti (aumenti o riduzioni) nella respirazione microbica e radicale. Come sappiamo, l'apparato radicale contribuisce ampiamente alla respirazione del suolo, attraverso la respirazione radicale, la decomposizione che avviene dal turnover delle radici fine e dagli essudati radicali. L'apparato radicale è strettamente correlato alla biomassa ipogea degli alberi, quindi possiamo affermare che la respirazione radicale è strettamente correlata alla struttura forestale (Katayama et al., 2009). In generale si può affermare che un diradamento, oltre a ridurre la competizione per l'acqua ed i nutrienti del suolo, stimola la produzione degli alberi rimasti con conseguente produzione di biomassa radicale, quindi di respirazione radicale (Ma et al., 2004)

CAPITOLO II: OBIETTIVI

Nei siti è stato effettuato uno studio sulla respirazione del suolo, cercando di:

Verificare se le diverse tipologie di gestione forestale, applicate nei plot analizzati, abbiano influenzato, ed eventualmente in che modo, i processi di respirazione del suolo.

Cercare di spiegare quali fossero i principali driver della respirazione del suolo nei plot indagati.

Effettuare una stima del carbonio rilasciato dal suolo tramite la respirazione e cercare di effettuare un bilancio del carbonio a livello ecosistemico.

CAPITOLO III: MATERIALI E METODI

3.1 Siti di studio

Le aree sperimentali sono tre faggete ad alto fusto poste una a Nord (Provincia di Belluno), una al centro (L'Aquila) ed una al Sud Italia (Vibo Valentia). I tre siti appartengono ad aree di studio del progetto LIFE+ Manfor C.BD.-. Tale progetto studia in sette foreste campione in Italia (e tre in Slovenia), disposte lungo un transetto che va da nord a sud e da est a ovest, l'efficacia delle opzioni di gestione forestale multifunzionale (capacità di immagazzinamento del carbonio delle foreste, biodiversità, produzione, protezione) fornendo dati e linee guida. Per fare ciò si mettono a confronto, in ogni sito di studio, sistemi di gestione forestale tradizionali con opzioni di gestione innovative che mirino alla multifunzionalità del bosco.

3.1.1 Design sperimentale applicato ai siti

Nei siti, ove possibile, è stato applicato lo stesso schema sperimentale, cioè una variante dello schema a blocchi randomizzati. Ciascuna area di studio (30 ha circa) è stata suddivisa in 9 settori (plot) attraverso la sovrapposizione di una griglia regolare a maglie quadrangolari di circa 3 ha ciascuna. Ai 9 settori sono state attribuite casualmente 3 differenti tesi di gestione, replicate 3 volte, che consistono in una gestione di tipo tradizionale, dove si opera il tipo di taglio da sempre applicato ai boschi dai selvicoltori locali, e due tagli innovativi proposti dallo staff scientifico. L'assegnazione casuale dei trattamenti è stata parzialmente dalla condizione che un medesimo trattamento non venisse assegnato a plot contigui. Dal centroide del settore è stato generato un cluster di 3 aree di saggio circolari equidistanti dal centroide e disposte ai vertici di un triangolo equilatero (Figura 5). Il raggio delle aree di saggio circolari (fisso per la stessa area di studio) è stato determinato in funzione della struttura del bosco e della densità delle piante, (in modo da includere un numero di piante non superiore a 100-120 per ciascuna area di saggio), e comunque non inferiore a 13 m. Questo disegno inventariale è vantaggioso quando si ha un'alta variabilità tra le aree di saggio e una bassa variabilità tra i cluster. Dove possibile, infatti, le aree di studio sono state scelte in modo da essere il più omogenee possibile sotto l'aspetto stazionale e strutturale, mentre il campionamento per cluster assicura una bassa distorsione degli stimatori del valore medio tra le aree di saggio dello stesso cluster.

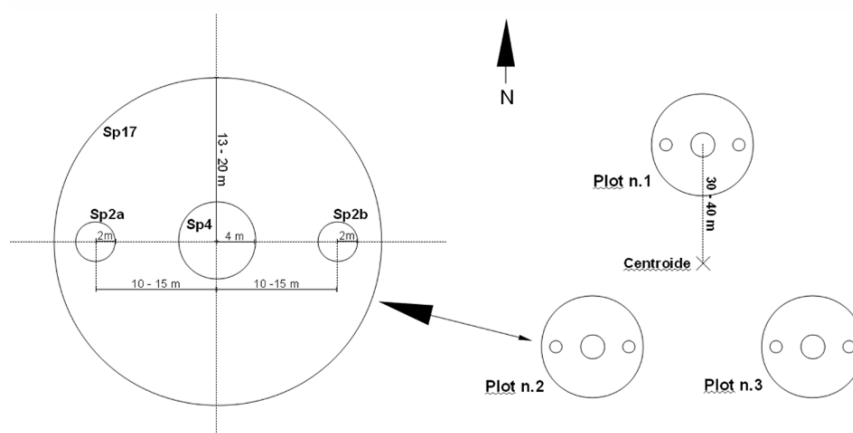


Figura 5. Schema della disposizione dei sub-plot all'interno dei plot.

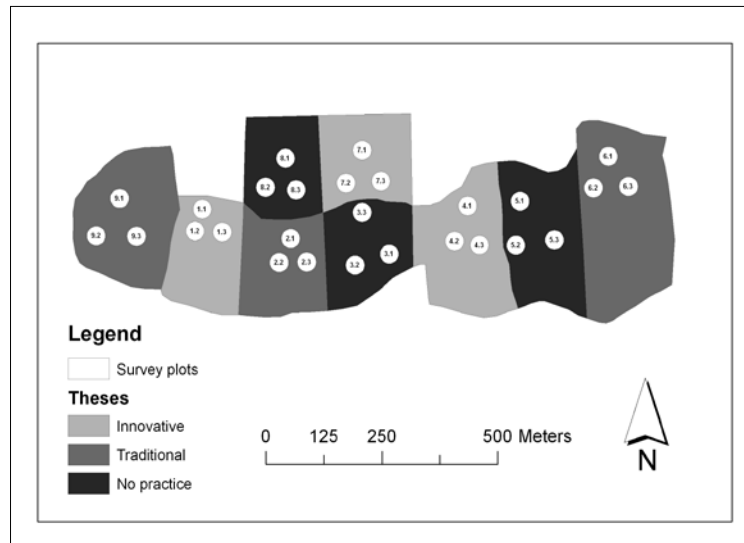


Figura 6. Applicazione del design sperimentale alla foresta del Cansiglio.

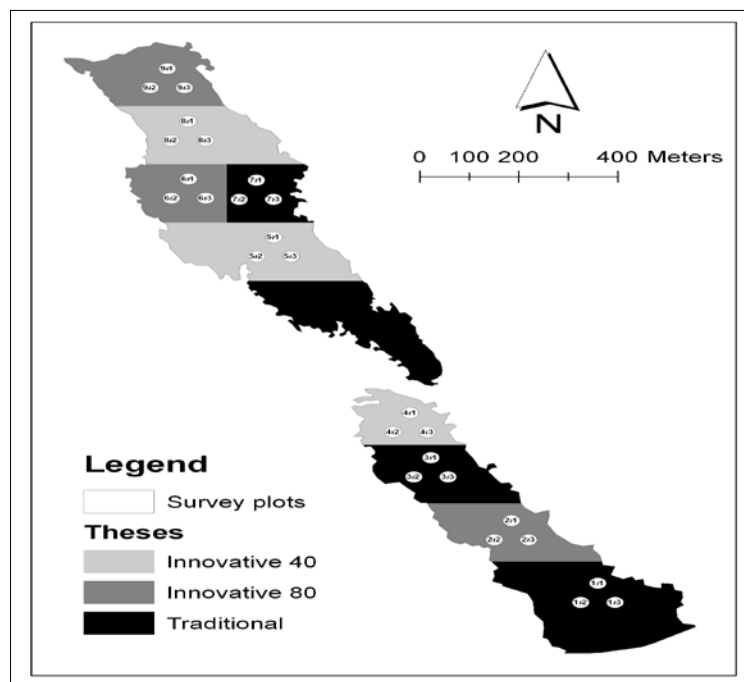


Figura 7. Applicazione del design sperimentale alla foresta di Chiarano-Sparvera.

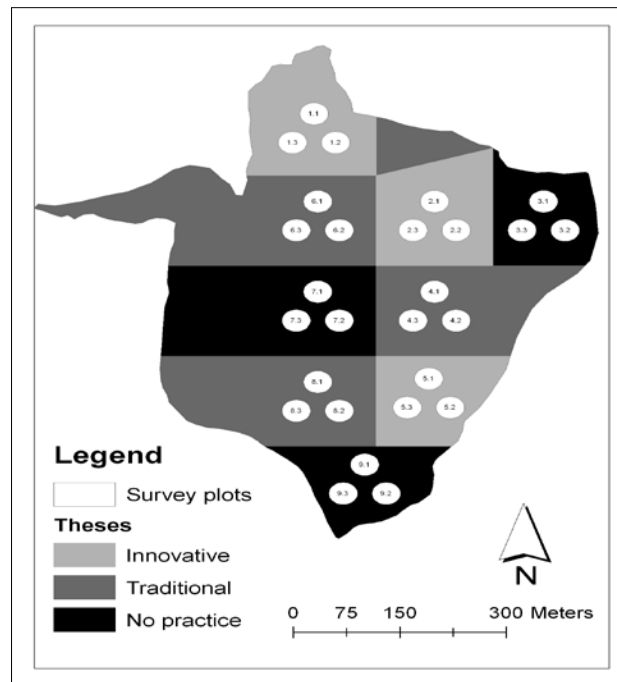


Figura 8. Applicazione del design sperimentale alla foresta di Mongiana.

3.1.2 Area test Chiarano-Sparvera

Inquadramento stazionale

La foresta demaniale regionale di Chiarano-Sparvera è sita nella regione Abruzzo, in provincia dell'Aquila (41°51' N 13°57' E) e si estende su un territorio di 766 ha, compreso nella zona di protezione esterna del Parco Nazionale d'Abruzzo, Lazio e Molise e parzialmente nei siti di Natura 2000. La gestione di tale foresta è affidata al Corpo Forestale dello Stato e all' UTB di Castel di Sangro (AQ). La superficie di foresta interessata al progetto, e dove sono stati studiati i flussi di CO₂ del suolo, è di circa 30 ha ed è formata da due corpi di forma irregolare separati da una chiaraia. Il bosco in questione si trova ad un'altitudine compresa tra i 1700 ed i 1830 msl, ed ha un'esposizione prevalente verso N-NE. Il suolo, caratterizzato da una pendenza media del 25%, è di tipo calcareo, profondo, con scarsa rocciosità superficiale e forestalmente buono.



Figura 9. Cartografia del sito Chiarano-Sparvera



Figura 10. Foto aerea del sito di Chiarano-Sparvera

Geologia e pedologia

Il substrato geologico è costituito prevalentemente da una massa calcarea del cretaceo (Cretaceous limestone). Si tratta di calcari, calcareniti, conglomerati bioclastici silicizzati con frammenti di rudisti e radiolari della Facies Umbra del Cenomaniano-Barremiano. I suoli presenti nell'area di studio mostrano generalmente profili sottili o mediamente profondi (70-80 cm) sono di tipo carbonatico, con profilo ABwC caratterizzati da un sottile epipedon con struttura grumosa-granulare e con elevato contenuto in sostanza organica (10%-20%) e da orizzonte B di tipo Cambico, con struttura grumosa-granulare, spesso contenente scheletro calcareo, tale orizzonte s'inserisce gradualmente nell'orizzonte C. La maggior parte dei suoli sono debolmente acidi a neutri e poveri in carbonato di calcio

Inquadramento climatico

I dati termopluviometrici disponibili, validi per l'area di studio, sono quelli della vicina (3 Km) stazione meteorologica di Roccaraso (AQ). Una moderna stazione meteo, gestita dal CRA-CMA, è disponibile anche nel vicino comune di Castel di Sangro. In figura viene riportato il diagramma termopluviometrico della stazione di Roccaraso. Il clima dell'area è di tipo temperato, con precipitazioni annue superiori ai 1000 mm, con piogge primaverili ed autunnali abbondanti ed assenza di aridità estiva. La temperatura media annua è 8.5°C, ed inferiore ai 10°C per circa 6 mesi l'anno. La media delle minime del mese più freddo (Gennaio) è - 0.2°C, la media delle massime del mese più caldo (Luglio) è 17°C. Ci troviamo nella fascia fitoclimatica del *Fagetum*, dove, secondo Biondi et al. (2001), in base al calcolo degli indici fitoclimatici proposti da Rivas-Martinez (1995) e Rivas-Martinez et al. (1999), è possibile attribuire la stazione termopluviometrica di Roccaraso al termotipo Montano/Subalpino ed ombrotipo umido.

Inquadramento della vegetazione

L'area di studio ricade nella serie del faggio (*Polysticho-Fagetum*), ed il bosco risulta una giovane fustaia (circa 70 anni) coetanea di Faggio (*Fagus sylvatica*) derivata da una conversione di un ceduo matricinato invecchiato. Si presenta con una struttura monoplana pressoché monospecifica, fatta eccezione per alcuni esemplari di Salicone (*Salix caprea*) collocati prevalentemente presso le numerose aie carbonili presenti nell'area. Il sottobosco è quasi assente sia nella componente arbustiva che per quella erbacea. La conversione del ceduo di faggio all'alto fusto è stata avviata negli anni 80 tramite il metodo della matricinatura intensiva, con il rilascio di ca. 1000-1200 individui ad ettaro tra polloni e vecchie matricine. E' presente un'area basimetrica media di 39.88 m²/ha data da un'alta densità di piante (1377 piante/ha) di cui l'altezza dominante è di 16.44 m (Figura 11, Figura 12).

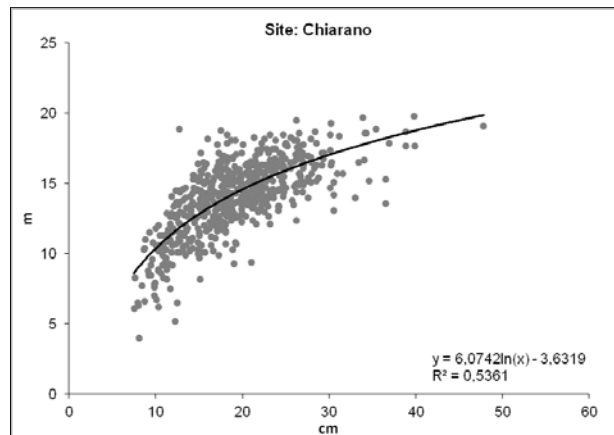


Figura 11. Curva ipsometrica del sito di Chiarano-Sparvera.

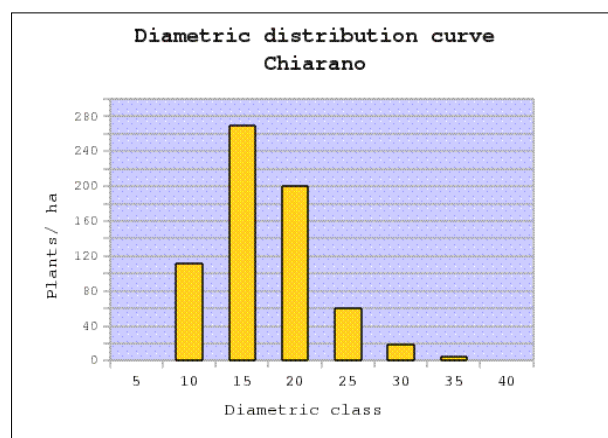


Figura 12. Distribuzione diametrica del sito di Chiarano-Sparvera.

Trattamenti selvicolturali

Trattamento tradizionale

Per questo tipo di foresta, i selvicoltori del luogo, applicano tradizionalmente una selezione massale (ogni 15-20 anni), con diradamenti di moderata intensità e di tipo tendenzialmente dal basso, a volte di tipo misto. Il criterio adottato rappresenta la modalità di trattamento tipica della fase di allevamento della fustaia da polloni fino alla rinnovazione da seme che conclude il ciclo di avviamento. L'intensità dei diradamenti è tale da non produrre soluzioni di continuità permanenti della copertura. Il soprassuolo così trattato presenta una semplificazione strutturale evidente sia in senso verticale che orizzontale, scarsa diversità e sviluppo degli strati arbustivo ed erbaceo, ridotta presenza di microhabitat, quantità limitata di necromassa.

Trattamenti innovativi

I trattamenti innovativi si propongono la selezione di un numero definito di soggetti vigorosi con chioma equilibrata e fusto di buona qualità. Per fare ciò si opera con il prelievo di tutti i concorrenti nell'intorno di piante prescelte (piante d'avvenire chiamate "candidate"). La restante superficie è o meno interessata da un diradamento di tipo basso solo se economicamente conveniente o necessario (esbosco); altrimenti può

rimanere intatta con i soggetti dominati e sottoposti che alimentano un'area di mortalità utile a costituire necromassa in piedi e poi al suolo.

Questo tipo di taglio prevede due varianti (tesi) a seconda del numero di candidate prescelte ad ettaro, quindi della densità:

- Tesi 1: rilascio di 40 candidate ad ettaro
- Tesi 2: rilascio di 80 candidate ad ettaro

In entrambe le tesi vi è l'individuazione di almeno 1 soggetto ad ettaro da cercinare con funzione di albero-habitat, scelto tra quelli di maggiore dimensione diametrica (matricine) e di un soggetto ad ettaro da abbattere e lasciare intero sul letto di caduta. Alberi troncati morti in piedi o a terra sono rilasciati o non esboscati per promuovere elementi di diversità nelle altre comunità biotiche del sistema. Per quanto riguarda le operazioni di taglio ed allestimento, sono effettuate da personale del Corpo Forestale dello Stato e della Regione Abruzzo, altamente qualificato, mentre l'esbosco è a carico della ditta che si aggiudica il materiale legnoso. L'esbosco generalmente è effettuato con bestie da soma o, più raramente, con canaline in polietilene. L'unico assortimento attualmente retraibile dai tagli e richiesto dal mercato è la legna da ardere.

Aree di studio

Sono presenti nel sito 9 plot, della superficie compresa tra 2.8 e 3 ha, a cui sono state attribuite 3 differenti tesi di gestione replicate 3 volte (Figura 7). In ogni plot sono presenti 3 aree di saggio circolari (sub-plot) di raggio 13 m. I plot scelti per lo studio della respirazione del suolo sono:

- Plot 2, in cui è applicato il trattamento innovativo con il rilascio di 80 candidate ad ha (i80)
- Plot 3, in cui è applicato il trattamento tradizionale
- Plot 4, in cui è applicato il trattamento innovativo con il rilascio di 40 candidate ad ha (i40)

3.1.3 Area test Cansiglio

Inquadramento stazionale

L'area si trova nella Regione Veneto, nella provincia di Belluno, a confine con la provincia di Treviso. La foresta del Cansiglio (46°03' N, 12°23' E), dove sono stati effettuate le attività sperimentali, è inclusa nella Riserva Biogenetica di Pian Parrocchia-Campo di Mezzo. La Riserva, dalla superficie totale di 667 ettari, è gestito direttamente dal Corpo Forestale dello Stato – Ufficio per la Biodiversità di Vittorio Veneto. La foresta è inclusa in una Zona di Protezione Speciale (ZPS, 79/409 / CEE) e in Siti di Importanza Comunitaria (SIC, 92/43 / CEE). Il Cansiglio è un altopiano che orograficamente appartiene alle Prealpi Carniche, e rappresenta l'ultimo contatto con la pianura. E' formato, prevalentemente, da una matrice calcarea o marno-calcarea, e si trova ad un'altezza media di 1000 m s.l.m.. La foresta, in cui la specie dominante è il faggio, è stata da sempre gestita con grande cura e devozione. Nel 1548, sotto la Repubblica di Venezia, il bosco venne proclamato *Gran bosco da Reme di San Marco* in quanto i fusti di faggio, da sempre e tuttora prelevati con il taglio a scelta, erano prevalentemente destinati alla produzione di remi per le galee. La



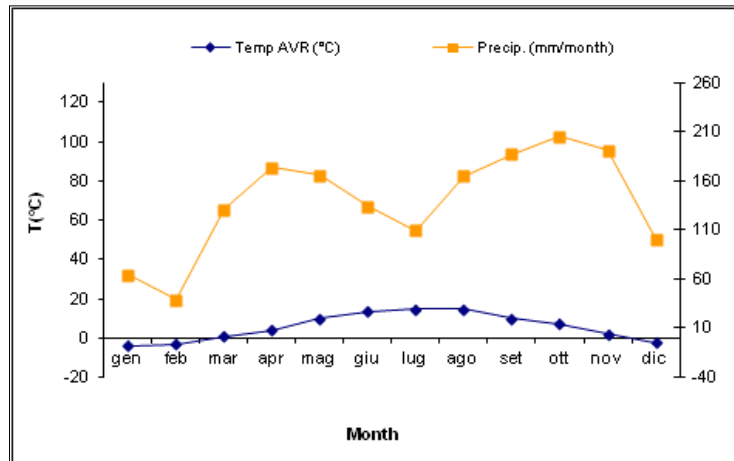


Figura 14. Diagramma climatico di Bagnouls-Gaussen per il Cansiglio (VEN-1 CONECOFOR)(media di 5 anni)

Il pedoclima (Carta dei suoli della provincia di Treviso, Soil Taxonomy) del bosco del cansiglio è classificato come UDICO, essendo la sezione di riferimento umida per 90 giorni o più, cumulativi, per almeno 6 anni su 10, e secca per meno di 45 giorni consecutivi nei 4 mesi che seguono il solstizio d'estate. Il regime di temperatura è classificabile come FRIGIDO con una temperatura media annua del suolo (ad una profondità di 50 cm) inferiori agli 8°C.

Inquadramento della vegetazione

Il bosco risulta una fustaia matura (circa 120-145 anni) di faggio (*Fagus sylvatica*), con copertura piena ed articolata su soggetti dominanti e codominanti. I dendrotipi prevalenti hanno chiome profonde e sviluppate con compressione laterale nei punti di maggiore densità. E' presente una densità media di 320 piante/ha, un area basimetrica media di 46,67 m²/ha con una predominanza delle classi diametriche di 35-40 cm (Figura 15). Nel bosco sono presenti anche piccoli nuclei di rinnovazione di abete rosso (*Picea abies*) e sporadici individui di abete bianco (*Abies alba*). La copertura continua delle chiome ostacola o impedisce la presenza di un sottobosco arbustivo, mentre molto presente risulta la componente erbacea nelle sue forme caratteristiche della faggeta pre-alpina (*Asperulo-fagetum*).

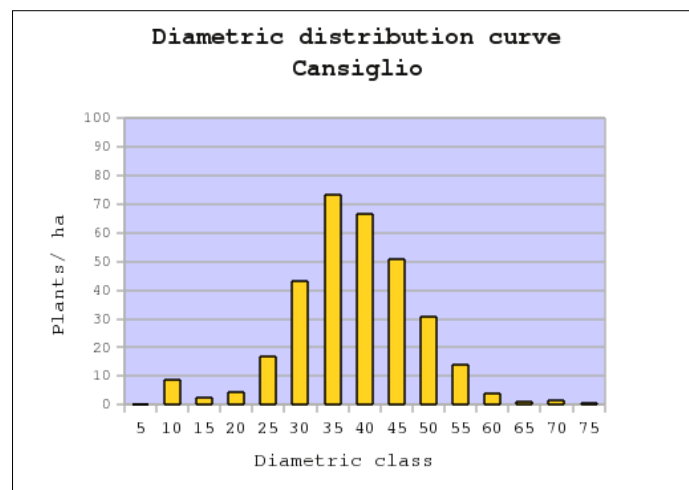


Figura 15. Distribuzione diametrica nel sito del Cansiglio.

Descrizione trattamenti

Trattamento tradizionale

Consiste in una serie di diradamenti dal basso a intervalli di 20 anni che solo occasionalmente interrompono la continuità della copertura. Il criterio prevalente è quello della ottimizzazione della distribuzione spaziale dei fusti a partire dall'abbattimento dei soggetti dominati e intermedi fino ai codominanti. La struttura principale e il livello della copertura prima e dopo l'intervento rimangono molto simili. I soggetti difettosi sono eliminati.

Trattamento innovativo

Consiste in un diradamento di tipo alto per eliminare i concorrenti dei soggetti migliori, indipendentemente dalla posizione sul terreno. Sono aperti vuoti nella copertura che saranno progressivamente rioccupati dalle chiome dei soggetti dominanti o rimarranno tali con penetrazione durevole della luce al suolo e creazione di microclimi differenziati per insediamento di flora vascolare e migliorare le condizioni per le catene trofiche attualmente ridotte o assenti. Il criterio di rilascio è mirato a ottimizzare il rapporto fusto-chioma dei candidati e a sostenere il loro accrescimento. L'insediamento eventuale di rinnovazione naturale può essere agevolato o il fenomeno essere considerato pre-rinnovazione, per tratti diversi di foresta. Lo sviluppo della gestione colturale nella fase attuale può essere sia quello del governo di una fase matura ma ancora dinamica, sia quello della messa in rinnovazione per gruppi. La coesistenza di queste fasi appare possibile nelle situazioni descritte (pendenza ridotta e buona accessibilità). Alberi morti in piedi interi o troncati sono rilasciati come alberi-habitat (1-2 per ettaro).

Intervento ritardato

In tre dei settori non è stata messa in atto nessuna tipologia di taglio, prendendo come opzione di gestione la posticipazione dell'intervento. Questo in relazione alle condizioni stazionali e strutturali del bosco che permettevano questo tipo di scelta.

Aree di studio

Sono presenti nel sito 9 plot, della superficie compresa tra 2.8 e 3 ha, a cui sono state attribuite 3 differenti tesi di gestione replicate 3 volte (Figura 6). In ogni plot sono presenti 3 aree di saggio circolari (sub-plot) di raggio 20 m. Per lo studio della respirazione del suolo sono stati scelti in maniera casuale, due sub-plot di ogni plot (Tabella 1).

Sito	Plot di studio	Sub-plot	Numero di misurazioni
Cansiglio	Tutti (9)	1.1, 1.3, 2.1, 2.3, 3.2, 3.3, 4.2, 4.3, 5.2, 5.3, 6.1, 6.2, 7.2, 7.3, 8.2, 8.3, 9.1, 9.3	90

Tabella 1. Sub-plot in cui sono state effettuate le misurazioni di respirazione del suolo nel sito del Cansiglio. In ogni sub-plot erano presenti 5 collari per la respirazione, per cui nel sito del Cansiglio sono state effettuate 90 misure per campionamento (9*2*5).

3.1.4 Area test Mongiana

Inquadramento stazionale

Mongiana si trova nella parte più alta delle Serre calabresi, in provincia di Vibo Valentia. L'area di studio , (38° 30' N, 16° 14'E) è localizzata nella regione Calabria nella riserva biogenetica di Marchesale, uno dei siti Natura 2000..L'intera riserva occupa una superficie di 1.257 ettari, ad un'altitudine compresa tra 750 e 1170 m s.l.m. ed è gestita dall'Ufficio Territoriale per la Biodiversità del Corpo Forestale dello Stato.

Geologia e pedologia

Geologicamente, la zona è caratterizzata da rocce granitiche del paleozoico profondamente fratturate. Il paesaggio ha una morfologia tipicamente montana, ed è caratterizzato da un'alternanza di piccole colline (con pendenza anche intorno al 40%), valli e pianure. I suoli più frequenti (USDA 2010) sono inceptisol ed entisol moderatamente profondi, con tessitura grossolana e ph acido (3.7-5.8).

Inquadramento climatico

Il regime termopluviometrico evidenzia la notevole piovosità dell'area (Figura 16), caratterizzata da circa 116 giorni di pioggia distribuiti nell'arco dell'anno per un totale di circa 1800 mm di pioggia l'anno. La temperatura media annua è di 10.1°C, la temperatura massima del mese più caldo (luglio) è 18.4°C, temperatura minima del mese più freddo (febbraio) è 2.2°C. I valori di umidità atmosferica sono sempre piuttosto elevati, e comunque in genere superiori al 60%.

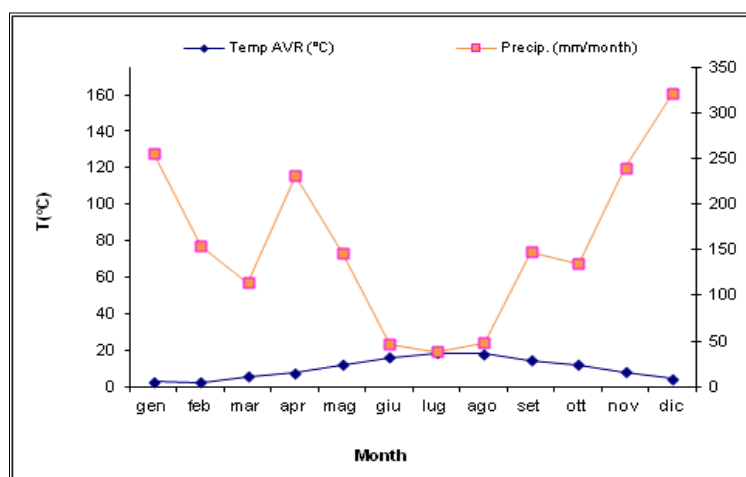


Figura 16. Diagramma climatico di Bagnouls-Gausson per Mongiana (stazione CAL-1 CONECOFOR) (media di 5 anni)

Inquadramento della vegetazione

Il sito ricade nella sottozona calda del *Fagetum*, mentre il relativo bioclimate risulta di tipo *Temperato-Oceanico* secondo la classificazione bioclimatica di Riva-Martinez (1997). Il sito di studio è caratterizzato da una densità media di 510 piante/ha, e da un'area basimetrica media di m²/ha.

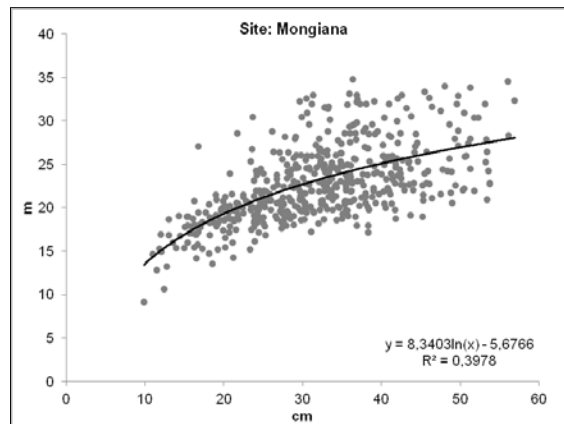


Figura 17. Curva ipsometrica del sito di Mongiana

Descrizione dei trattamenti selvicolturali

Trattamento tradizionale

Il sistema ordinario di gestione colturale della faggeta prevede di allevare un bosco formato da soggetti simili in cui le chiome sono contenute in un unico piano (altezze simili) fino ad età comprese tra i 90-100 ed i 120-130 anni. Questo si ottiene con diradamenti periodici che percorrono tutta la superficie del bosco, rimuovono i soggetti rimasti indietro o deperienti e riducono progressivamente e in modo pressoché uniforme la densità. Risultato di questo tipo di coltivazione è un bosco con struttura molto omogenea, estremamente utile per produrre legname delle stesse dimensioni e quindi esboscabile e lavorabile in un modo standard. Questo sistema era perfettamente aderente agli obiettivi prevalenti di produzione di legname di faggio, una delle poche specie adatte allo scopo negli ambienti mediterraneo-montani. Oggi, accanto alla funzione produttiva sempre presente e necessaria al mantenimento del lavoro in montagna, alla creazione di reddito di impresa e comunque collegata all'utilizzo di una risorsa rinnovabile, si configurano altre funzioni di tipo ambientale che spostano in avanti le età di utilizzazione finale del bosco e che prevedono quindi di mantenere in piedi lo stesso sistema biologico per un tempo più lungo che in passato.

Trattamento innovativo

La considerazione che l'attuale bosco, ancora giovane, avrà una vita ancora molto lunga, ha portato a selezionare un numero minimo di alberi per unità di superficie (45-50 ad ettaro) capaci di crescere sani e vitali e liberi dalla competizione dei soggetti circostanti, di formare chiome ampie, di produrre seme abbondante a maturità ed assicurare così la futura rinnovazione del bosco. Il criterio di diradamento realizzato si sposta quindi dall'intervento omogeneo tradizionale su tutta la superficie a un diradamento localizzato intorno ai soggetti scelti. Ne risulta una minore omogeneità della struttura che si renderà sempre più evidente nel tempo con soggetti di dimensioni superiori sparsi nell'insieme del soprassuolo. L'intervento, ripetuto a distanza di 15-20 anni, andrà a diradare i tratti di bosco non toccati ora secondo il criterio adattativo giudicato ottimale, piuttosto che secondo una regola prescrittiva. I punti naturalmente più radi perché formati da alberi rilasciati dal vecchio ciclo non sono stati diradati, mentre è stato aumentato lo spazio intorno ai nuclei di rinnovazione di abete, elemento di diversità specifica, strutturale e scenica nella faggeta. Il rilascio di legno morto in piedi e a terra è parte integrante del criterio innovativo perché la sua quantità nelle foreste coltivate è bassa rispetto a quella ritenuta ottimale

No practice

In tre dei settori non è stata messa in atto nessuna tipologia di taglio, prendendo come opzione di gestione la posticipazione dell' intervento. Questo in relazione alle condizioni stazionali e strutturali del bosco che permettevano questo tipo di scelta.

3.2 Design di campionamento della respirazione del suolo

Per le tre foreste di studio sono stati elaborate due differenti tipologie di design di campionamento: a Chiarano-Sparvera e Mongiana sono state svolte delle misurazioni di tipo "intensivo" (ad intervalli tra 15-20 giorni e 30-40 giorni circa), mentre per il Cansiglio sono state effettuate delle misure di tipo "stagionale", andando a misurare i flussi di CO_2 nel periodo di massima attività respiratoria (luglio) e in quello di chiusura della stagione vegetativa (Ottobre) prima della fase tardo-autunnale e invernale.

3.2.1 Design sperimentale applicato a Chiarano-Sparvera e Mongiana

Sono stati scelti 3 dei nove plot presenti nell'area di studio, uno per tipologia di trattamento. Si è cercato di scegliere plot contigui o vicini in modo di cercare di ridurre la variabilità spaziale della struttura forestale interessata dalle misure. In ognuno dei tre sub-plot (aree di saggio, Figura 7, Figura 8), presenti in ogni plot, sono stati inizialmente installati sei collari, sui quali effettuare le misure di respirazione, posizionandoli nel seguente modo: il primo è stato posizionato in maniera casuale nei pressi del centro del sub-plot, il secondo ad una distanza di 3 metri dal centro lungo la linea di massima pendenza, mentre gli altri quattro sono stati rispettivamente posizionati ad una distanza dal centro di 6, 9, 12, 12 metri sfalsati di 90° l'uno dall'altro partendo dal secondo. Con questa collocazione si è ottenuto un posizionamento "a spirale" che ha permesso di coprire spazialmente una grande parte dell'area del sub-plot, cercando di coprire l'eventuale variabilità locale. Nel posizionare i collari si è avuta l'attenzione di non collocarli ad una distanza inferiore di un metro dalle piante, in modo di non avere troppa influenza diretta nelle misure di respirazione da parte delle radici delle piante.

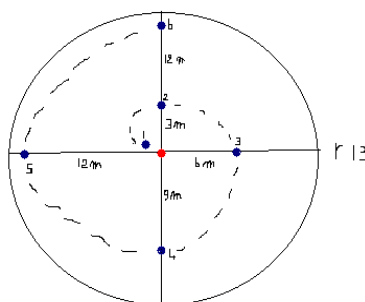


Figura 18. Disposizione dei collari per le misure di respirazione del suolo nei sub-plot

I collari, dopo essere stati così posizionati, sono stati ricoperti dalla lettiera originaria. Accanto ai collari descritti, che indicheremo come *litter* (L), sono stati posti altrettanti collari, nei quali si è avuto cura, grazie all'apposizione al di sopra di essi di una retina, che non vi fosse al loro interno e non entrasse lettiera di derivazione epigea. Tali collari sono stati chiamati *no litter* (NL). Se nei primi collari (L) si è andato a misurare il flusso totale della CO_2 proveniente dal suolo, in questi ultimi (NL) si è cercato di misurare la

respirazione al netto dell'input di carbonio derivato dalla degradazione della lettiera epigea da parte dei microorganismi. Questo per cercare di stimare l'influenza della lettiera sui processi respirativi. La stretta vicinanza tra i collari L e NL ha permesso di effettuare le misurazioni nel sub-plot nello stesso momento e nelle stesse condizioni di umidità e temperatura del suolo. Con tale design sono presenti per ogni sito 108 collari per le misure di respirazione (6 collari x 2 condizioni x 3 sub-plot x 3 plot).

Per il sito di Mongiana è presente un trattamento che non prevede il taglio del bosco (*no practice*), quindi si è potuto usare tale plot come controllo rispetto ai plot dove sono avvenuti i tagli (tradizionale ed innovativo). Per il sito di Chiarano-Sparvera sono stati posizionati ulteriori 6 collari per le misure di respirazione in una parte di foresta che non è ricaduta al taglio (zona di rispetto), e che aveva caratteristiche strutturali simili a quelle degli altri tre plot indagati prima del taglio. In tali collari sono state effettuate delle misure di controllo per un confronto con le misure effettuate nei plot dove sono stati effettuati i tagli.

3.2.2 Design sperimentale per la foresta del Cansiglio

Nella foresta del Cansiglio, dove sono state previste delle "misurazioni stagionali", i collari per la misurazione della respirazione del suolo sono stati posizionati in maniera differente dagli altri due siti di studio. Sono stati posizionati 5 collari in due sub-plot di ogni plot. In questo modo si hanno 90 collari distribuiti in tutta l'area di studio. I sub-plot dove sono stati posizionati i collari sono stati scelti in maniera casuale, e la disposizione dei collari è stata la seguente: il primo posizionato vicino al centro del sub-plot, e gli altri 4 seguendo i punti cardinali e rispettivamente ad una distanza di 3, 6, 9, 12 metri dal centro.

Siti	Numero di plot studiati	Sub-plot studiati	Numero di misure	Frequenza di campionamento
Chiarano-Sparvera	3	2.1, 2.2, 2.3, 3.1, 3.2, 3.3, 4.1, 4.2, 4.3, controllo	108 + 6 (plot controllo)	Ogni 15-20 giorni
Mongiana	3	2.1, 2.2, 2.3, 3.1, 3.2, 3.3 6.1, 6.2, 6.3	108	Ogni 15-20 giorni
Cansiglio	9	1.1, 1.3, 2.1, 2.3, 3.2, 3.3, 4.2, 4.3, 5.2, 5.3, 6.1, 6.2, 7.2, 7.3, 8.2, 8.3, 9.1, 9.3	90	Due volte l'anno

Tabella 2. Tabella riassuntiva dei plot studiati nei vari siti. Sono riportati i sub-plot in cui sono state effettuate sia le misure di respirazione del suolo che il rilievo dei parametri strutturali, il numero delle misure di respirazione effettuate in ogni sito durante ogni campagna di campionamento e la frequenza di campionamenti

3.3 Dati strutturali

Il protocollo sperimentale applicato ha previsto 2 momenti temporalmente distinti di rilievo: dei rilievi pre-intervento (*ante*) e dei rilievi post intervento (*post*). I rilievi *ante* hanno avuto l'obiettivo di raccogliere informazioni circa la struttura dei popolamenti forestali ricadenti nelle aree di studio e di analizzarne l'eterogeneità attraverso un rilievo campionario di tipo inventariale; mentre i rilievi effettuati *post* sono serviti per il monitoraggio delle variabili oggetto di osservazione in risposta ai trattamenti applicati come tesi sperimentali.

Attributo	Tipo di attributo	Livello di informazione	Plot	Sub-plot
DBH	Misurato	Albero	Tutti	Tutti
Specie	Classificato	Albero	Tutti	Tutti
Posizione sociale	Classificato	Albero	Tutti	Tutti
Coordinate	Misurato	Albero	Tutti	Tutti
Stato di salute	Classificato	Albero	Tutti	Tutti
Dendrotipo	Classificato	Albero	Tutti	Tutti
Altezza totale	Misurato	Sottocampione di alberi	1 casuale	
Altezza di inserzione chioma	Misurato	Albero	1 casuale	
Carota radiale	Campione raccolto	Sottocampione di alberi	Tutti	
Dimensioni necromassa	Misurato	Elemento	Tutti	Tutti
Decomposizione della necromassa	Stimato	Elemento	Tutti	Tutti
Novellame e arbusti (specie)	Classificato	Pianta	Tutti	Tutti
Novellame e arbusti (origine)	Classificato	Pianta	Tutti	Tutti
Novellame e arbusti (danni)	Stimato	Pianta	Tutti	Tutti
Novellame e arbusti (dimensione)	Classificato	Pianta	Tutti	Tutti
Copertura arborea	Misurato (Stimato)	Plot	Tutti	Tutti
Proiezione delle chiome	Misurato	Albero	1 casuale	
Sovrapposizione delle chiome	Derivato	Plot	1 casuale	
LAI	Misurato	Plot	Tutti	Tutti
Altitudine, esposizione e pendenza	Misurato	Plot	Tutti	Tutti

Tabella 3. Dati rilevati nei plot e sub-plot di studio

3.4 Misure del clima e del microclima

Per ogni misurazione di respirazione del suolo effettuata in campo, è stato raccolto puntualmente anche un dato di temperatura del suolo e di umidità. La temperatura del suolo è stata misurata e registrata tramite un'apposita sonda collegata all'EGM4. Accanto alle misure di temperatura, sempre per ogni misura di respirazione è stato misurato e registrato il contenuto volumetrico di acqua nel suolo (VWC%), con il TDR100 (Soil Moisture Meter, *Fieldscout*, Spectrum Technologies, USA).

Inoltre, nella foresta di Chiarano-Sparvera, sono state installati tre centraline permanenti (ECH₂O-TE/EC-TM, *Decagon Devices*, USA) per le misurazioni di temperatura ed umidità del suolo e dell'aria. Ogni centralina possiede un sensore, posto ad un'altezza di 1,80 m, per la misura della temperatura e dell'umidità relativa dell'aria, e 4 sensori per la misura della temperatura ed umidità (Volumetric Water Content) del suolo (i sensori del suolo sono stati posti due ad una profondità di 5 cm e due a 10 cm). I dati acquisiti dai sensori sono registrati in un datalogger con una frequenza di 30 minuti. Le centraline meteo sono posizionate nei sub-plot 2.3, 3.3 e 4.3 (Tabella 4).

Sub-plot		Sensore	Altezza (cm)
2.3	port 1	T/RH aria	180
	port 2	T/VWC suolo	-5
	port 3	T/VWC suolo	-10
	port 4	T/VWC suolo	-5
	port 5	T/VWC suolo	-10
3.3	port 1	T/RH aria	180
	port 2	T/VWC suolo	-5
	port 3	T/VWC suolo	-10
	port 4	T/VWC suolo	-5
	port 5	T/VWC suolo	-10
4.3	port 1	T/RH aria	180
	port 2	T/VWC suolo	-5
	port 3	T/VWC suolo	-10
	port 4	T/VWC suolo	-5
	port 5	T/VWC suolo	-10

Tabella 4. Disposizione delle centraline meteo nei sub-plot della foresta di Chiarano-Sparvera e relativo posizionamento dei sensori per il monitoraggio in continuo di temperatura ed umidità del suolo e dell'aria.

Inoltre, sempre nella foresta di Chiarano-Sparvera, è stata installata un'ulteriore centralina all'esterno del bosco; quest'ultima, oltre ai dati di umidità e temperatura dell'aria, è dotata di un pluviometro e di un misuratore di PAR (*photosynthetically active radiation*).

3.5 Misure di respirazione del suolo nei siti

Esistono diverse tecniche e strumenti di misura per quantificare i flussi di CO₂ dal suolo. Per il nostro studio è stata utilizzata la misura diretta della emissione costituito da uno strumento analizzatore di gas ad infrarossi (*IRGA*) dotato di una cuvetta per le misure di respirazione del suolo (*SRC-1*, PP Systems, UK) e di una sonda per la misura della temperatura del suolo. Il sistema utilizzato è stato l'EGM4 (*PP Systems, UK*), un analizzatore compatto, leggero, alimentato da batterie ricaricabili a 12V a lunga durata (circa 6 ore di misure). L'EGM4 è uno strumento che misura i flussi di CO₂ dal suolo per mezzo di una camera chiusa (cuvetta) di tipo dinamico (con sistema di circolazione d'aria all'interno della cuvetta). Al suo interno viene misurata il tasso della variazione di concentrazione di CO₂ in un breve intervallo di tempo. Questo avviene poiché i flussi sono principalmente governati da due gradienti: il gradiente di concentrazione ed il gradiente di pressione. La concentrazione di CO₂ nel terreno è generalmente molto maggiore rispetto a quella esterna, per cui il trasporto della CO₂ dagli strati profondi del suolo, alla superficie, avviene grazie al forte gradiente di concentrazione, mentre a livello superficiale l'emissione è guidata da variazioni di pressione, che possono essere indotte da raffiche di vento e/o variazioni di pressione atmosferica. Nella cuvetta l'aria è soggetta ad una circolazione forzata tra la cuvetta stessa e l'analizzatore ad infrarossi, che misura la concentrazione di CO₂ nel tempo. Come detto in precedenza, nei siti sono stati posizionati dei collari per le misure di respirazione del suolo. Tali collari sono dei semplici cilindri in PVC del diametro di 10 cm, a cui sono state applicate due staffe in metallo (lunghe circa 10 cm) allo scopo di ancorarli al meglio al suolo. I collari, alti 5 cm, sono stati interrati per 2 cm circa, lasciando fuoriuscire i restanti 3 cm dal suolo. Lo scopo dei collari così disposti è quello di inserire al loro interno la cuvetta (*SRC 1*), collegata allo strumento, che analizza i flussi di CO₂ dal suolo. Una volta che la cuvetta è posizionata sul collare, la concentrazione di CO₂ al suo interno comincia ad aumentare a causa del rilascio di CO₂ dalla porzione di terreno sottostante: l'intensità dell'aumento di concentrazione è quindi proporzionale al flusso, i quale viene calcolato secondo l'equazione:

$$F = (C_f - C_i) * V / (A * \Delta t)$$

dove

F= valore del flusso

C_f= concentrazione finale

C_i= concentrazione iniziale

V= volume del sistema

Δt= intervallo di tempo di durata della misurazione

A= area di suolo coperto dalla camera (che coincide con l'area del collare)

L'utilizzo di una camera chiusa permette di:

- minimizzare i cambiamenti del microclima all'interno della camera
- minimizzare i disturbi del suolo
- limitare le variazioni di pressione all'interno della camera
- limitare le variazioni del gradiente di concentrazione di CO₂ non dovute alle emissioni dal suolo
- assicurare l'assenza di perdite d'aria.

I vantaggi principali dati dall'utilizzo dell'EGM4 sono:

- Rapida misurazione dei flussi di CO₂. Questo comporta, oltre ad una velocizzazione delle operazioni in campo, una minimizzazione degli errori di misurazione dovuti all'alterazione del gradiente di concentrazione di CO₂ al momento della copertura del suolo con l'apposita cuvetta per la misurazione.
- Registrazione di numerosi dati di concentrazione di CO₂ al minuto. In questo modo si produce un controllo pressoché continuo delle concentrazioni di CO₂, e tali dati possono essere impiegati nella costruzione di funzioni di regressione.

In seguito sono riportati in tabella le date di campionamento effettuate nei siti (Tabella 5)

Chiarano-Sparvera			Mongiana		Cansiglio		
2012	2013	2014	2014	2015	2012	2013	2014
luglio	(luglio)*	giugno	maggio	marzo**	luglio	(luglio)*	luglio
agosto	agosto	luglio	giugno	aprile**	ottobre	ottobre	ottobre
settembre	settembre	agosto	luglio				
	ottobre	settembre	agosto				
		ottobre	settembre				
			ottobre				
			novembre				
			dicembre				

Tabella 5. Periodi di campionamento nei tre siti di studio. * i dati sono andati persi durante la fase di scaricamento dei dati.
** i dati non sono stati utilizzati per la stesura della tesi.

3.5.1 Misure di respirazione in camera termostata (water bath)

La sostanza organica del suolo (SOM) risulta la più grande riserva terrestre di carbonio. La capacità dei microorganismi presenti nel terreno di decomporre la sostanza organica, e quindi di stoccare carbonio nel suolo è detta mineralizzazione. La mineralizzazione della sostanza organica costituisce la componente eterotrofa della respirazione del suolo. Questa è influenzata da vari fattori, ma i più importanti che ne regolano i processi sono: la temperatura e l'umidità del suolo. Vista la stretta correlazione tra temperatura e respirazione eterotrofa del suolo, si è voluto indagare questa componente della respirazione del suolo andando a verificare le sue risposte a diverse temperature. Per fare ciò sono stati analizzati in laboratorio per mezzo di una camera termostata. Lo studio si è concentrato nella foresta di Chiarano-Sparvera perchè tale sito ha presentato una intensità di rilievi superiori ad altri siti (Tabella 5).

Raccolta e preparazione dei campioni di suolo

I campioni di suolo per le misurazioni di respirazione da effettuare in laboratorio in camera termostata, sono stati raccolti il 11/06/2013 e subito posti in cella frigorifera alla temperatura di 4°C fino alla loro preparazione per le operazioni di misurazione. Sono stati prelevati 9 campioni di terreno da ogni plot, 3 per ogni sub-plot, per un totale di 27 campioni. Ogni campione è composto da una carota di suolo presa fino a

15 cm di profondità. Dopo essere stato omogeneizzato, da ogni campione di suolo sono stati prelevati 30 g per determinare la capacità di campo del campione (WHC, *water hold capacity*). I 30 g di terreno fresco sono stati messi su della carta da filtro, ed in seguito posizionati su un imbuto di 10 cm di diametro posto al di sopra di un matraccio. Il terreno è stato bagnato fino a saturazione, cioè fino a quando l'acqua non sgocciolava più dalla carta filtro. A questo punto si è pesato il campione (continuandolo ad idratare) fino a quando non ha raggiunto una massa costante. Una volta stabilizzata la massa, si è pesato il campione e successivamente è stato posto in stufa (105°C) ad essiccare. La WHC è stata determinata come percentuale di peso umido sul peso secco del campione. La conoscenza della WHC è servita per portare i campioni di suolo durante le misurazioni di respirazione ad un'umidità del 60% (optimum per la respirazione). La rimanente parte del campione è stata suddivisa in due parti (sub-campioni); ad ogni parte è stato tolto il materiale roccioso e ligneo (campioni *roots*), mentre solamente ad un sub-campione sono state tolte anche le radici (campioni *no roots*). Ogni sub-campione (80 g) è stato posto in dei matracci da 250 ml.

Incubazione dei campioni

I campioni sono stati incubati in una camera termostata alle temperature di 5, 10, 15, 20, 30°C. Per ogni temperatura è stato misurato e registrato il tasso di respirazione con lo stesso strumento utilizzato per le misurazioni in campo (EGM4), solamente che in questo caso non è stata utilizzata la cuvetta, ma sono stati collegati i tubi (*gas in, gas out*) dello strumento ad un tappo di silicone con due fori posto sulla bocca del matraccio con il campione immerso nella camera termostata. In questo modo si è misurata la concentrazione iniziale e finale di CO₂ del campione, e tramite un'equazione, che ha preso in considerazione il volume del matraccio e l'area della sua bocca (considerando quindi il tutto come una camera chiusa di tipo statico), è stato calcolato il flusso di CO₂.

3.6 Studio della lettiera fogliare: litter bags e trappole per la lettiera

Raccolta della lettiera fogliare

La lettiera rappresenta uno dei cinque pool che, insieme a biomassa epigea, ipogea, legno morto e sostanza organica nel suolo, compongono lo stock di carbonio degli ecosistemi forestali.

Per l'analisi della lettiera, in ogni sito è stata effettuata una raccolta per mezzo di trappole. Sono state posizionate in un sub-plot per ognuno dei 9 plot di ogni sito 5 trappole (Figura 19) ad imbuto (45 per ogni sito) della superficie di 0.385 m². Le trappole sono fatte di materiale del tipo “rete ombreggiante”, che consente all'acqua di scolare via ma non perde componenti della lettiera che cade dalla copertura forestale. Le trappole state collocate nel seguente modo: la prima più vicino possibile al centro del sub-plot, e le altre 4 a 3, 6, 9, 12 metri dal centro in direzione N, E, S ed W (vedi figura). Il loro contenuto veniva raccolto alla fine della stagione vegetativa, e portato in laboratorio, una volta diviso nelle sue componenti principali (foglie, cupule, semi, altro), veniva pesato fresco, successivamente seccato in stufa (36°C), pesato poi secco, e sottoposto alle analisi chimiche (carbonio ed azoto).

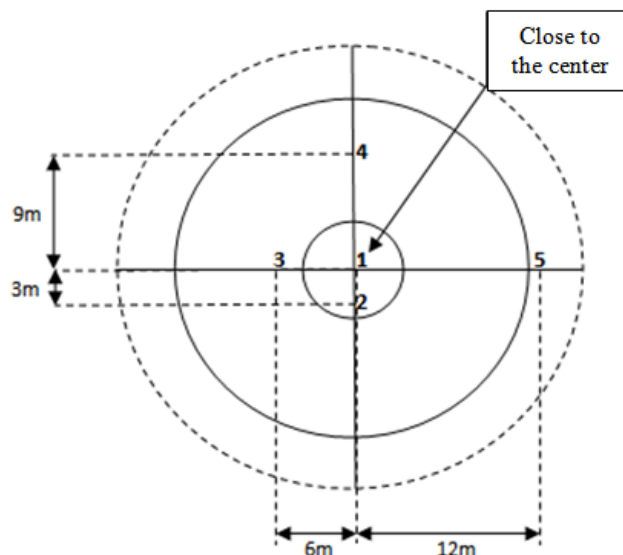


Figura 19. Posizionamento delle trappole per la raccolta della lettiera

Analisi della decomposizione fogliare con le litterbags

Una volta al suolo, la lettiera fogliare comincia la sua fase di degradazione ad opera della micro e meso-fauna del suolo, la quale forma la classe dei decompositori. Per organismi decompositori intendiamo quella serie di organismi che trasformano la sostanza organica in forma minerale rendendo disponibili i nutrienti per l'ecosistema (ciclo dei nutrienti); essi traggono energia e nutrienti dall'ossidazione dei composti organici rompendo i legami chimici formati nel corso della "costruzione" dei tessuti vegetali. La velocità di questi processi varia tra gli ecosistemi ed anche tra un sito e l'altro e dipende da vari fattori, come:

- natura del substrato vegetale
- caratteristiche chimico-fisiche del suolo
- clima e microclima

Il metodo più comune per studiare il processo di decomposizione della sostanza organica del suolo è l'utilizzo delle *litterbags* (buste di lettiera). Tale metodologia è stata applicata nella foresta di Chiarano-Sparvera. Dopo aver prelevato del materiale fogliare dalle trappole di lettiera installate nei plot di studio, si è portato in laboratorio dove è stato fatto seccare in stufa (36°) e successivamente posto in bustine (*litterbags*) di materiale plastico traforato con maglie di 2.5 mm. Il materiale posto in ogni *litterbag* è stato precedentemente pesato con una bilancia dalla precisione al decimo di grammo. In ogni plot sono state così posizionate 10 *litterbags* (il 23/10/2013).

Dopo circa 4 mesi (il 23/10/2013) sono state prelevate 3 *litterbags*, portate in laboratorio, seccato il contenuto e poi pesato per valutare la perdita di peso del materiale fogliare al suo interno.

La perdita di peso del materiale fogliare è dovuta alla degradazione della sostanza organica ad opera dei microorganismi decompositori. Tramite l'analisi delle *litterbags* si può valutare la velocità di decomposizione della sostanza organica e stimare la perdita di carbonio dovuta all'azione dei microorganismi decompositori.

Le restanti litterbags sono state prelevate: 4 dopo circa 12 mesi (il 01/07/2014), e le rimanenti 3 dopo circa 16 mesi (il 27/10/2014).

3.7 Stock di carbonio nel suolo

In ogni sito è stato effettuato un campionamento del suolo atto a quantificare lo stock di carbonio presente nel terreno. Sono stati quindi raccolti, in ogni sito, 9 campioni di suolo per ogni plot (3 campioni per subplot), per un totale di 81 campioni per sito. Tale operazione di campionamento è stata effettuata prima dei tagli (*ante*) e successivamente (*post*) per avere un confronto e valutare i cambiamenti di carbonio nel suolo apportati dalla gestione forestale.

Metodologia di rilievo

I punti di rilievo sono stati scelti a partire dal punto centrale di ciascun subplot. All'interno dell'area circolare si è individuato il primo punto sulla linea di massima pendenza (esposizione del versante) che non avesse segni di disturbo antropico o di erosione visibili e distante almeno 2 m dagli alberi. Con lo stesso criterio sono stati scelti gli altri due punti sulle linee formanti un angolo di 120° al centro dell'area rispetto a quella di partenza. Il punto di rilievo è stato accuratamente annotato al fine di poter eseguire il campionamento *post* il più vicino possibile, seguendo i criteri di scelta adottati per quello *ante*. Il prelievo di suolo indisturbato è stato effettuato con carotatore a tubo spaccato con profondità operativa di 40 cm e diametro di 53 mm (Eijkelkamp – Agrisearch Equipment, Paesi Bassi): l'elemento campionatore è costituito da un tubo in acciaio diviso in due guance facilmente apribili per l'estrazione del campione. Di ciascuna carota estratta sono stati determinati gli orizzonti diagnostici seguendo il metodo (classico) e annotati i limiti. I campioni, costituiti dalla massa di suolo di ciascun orizzonte, sono stati separati, inseriti in buste distinte avendo cura di evitare contaminazioni, contrassegnati con un codice univoco e portati in laboratorio dove sono stati conservati in cella frigorifera a 4°C

Operazioni di laboratorio

La preparazione dei campioni per le analisi chimiche ha seguito il Metodo Ufficiale II.1 (ISO11464, ISO/DIS 11273):

- essiccazione in stufa ventilata a 36°C;
- frantumazione con mortaio degli aggregati più duri con l'ausilio di un mortaio, al fine di rendere il campione il più omogeneo possibile;
- setacciatura con vaglio a 2 mm e separazione della frazione di terra fine <2mm dallo scheletro > 2 mm;
- le due frazioni sono state pesate con bilancia di precisione al centesimo di grammo;

- i campioni essiccati sono stati omogeneizzati e un sottocampione rappresentativo è stato posto in capsula di stagno o argento per i suoli carbonatici (Cansiglio e Chiarano) e pesato con una bilancia di precisione al decimillesimo di grammo;
- trattamento dei campioni provenienti da Chiarano e Cansiglio con HCl per la rimozione del calcio carbonato;
- per ciascun campione sono stati determinati il contenuto di Carbonio totale (SOC) e Azoto totale (N) espressi in % in peso e riferiti al peso secco “tal quale”;
- Azoto totale e Carbonio sono stati determinati con un analizzatore elementare CHNS (Carlo Erba 1108, Milano, Italia), seguendo il Metodo Ufficiale VII.1 (MIPAF - Metodi di Analisi Chimica del Suolo 2010) ISO 10694L' espressione dei risultati è la percentuale in peso di Carbonio organico e Azoto totale (g / 10² g di terra fine)

3.8 Analisi statistiche

Le analisi statistiche qui di seguito riportate sono state effettuate utilizzando il software per l'analisi dei dati R (*R Development Core Team, 2013*).

3.8.1 Relazione tra respirazione del suolo e temperatura

Basandoci sulla relazione che lega respirazione (SR) e temperatura (T) del suolo, si è usata una funzione, di tipo esponenziale (bibliografia):

$$SR = A * e^{K * T}$$

dove

A è l'intercetta con l'asse y, ($\mu\text{molCO}_2/\text{m}^2\text{sec}$)

K è la sensitività della respirazione del suolo alla temperatura ($1/^\circ\text{C}$)

T è la temperatura del suolo ($^\circ\text{C}$).

I parametri A e K si stimano dalla regressione lineare secondo il seguente modello:

$$\log(SR) = \log(A) + KT + \epsilon \quad [1]$$

Dove ϵ indica l'errore casuale. ϵ è distribuito normalmente con media = 0 e varianza = σ^2

Si è poi verificato se i parametri dell'equazione [1] cambiano sia da un plot all'altro che da un sub-plot all'altro. Per tale verifica si è utilizzato l'analisi della covarianza (ANCOVA).

3.8.2 Relazione tra la sensitività della respirazione alla temperatura e la struttura forestale

Per ogni sito, l'equazione [1] è stata applicata separatamente ad ognuno dei 9 sub-plot, dei quali sono noti i parametri strutturali (biomassa, area basimetrica, numero di piante...). Il parametro K nell'equazione [1] rappresenta la sensitività della respirazione alla temperatura. Per verificare l'esistenza di una relazione tra K ed i parametri strutturali dei sub-plot, si è proceduto nel seguente modo: 1) tramite l'analisi della covarianza (ANCOVA), si è verificato la differenza tra i K dei sub-plot; 2) tramite regressione lineare si è verificata la relazione tra i K ed i parametri strutturali.

3.8.3 Relazione tra le temperature del suolo e il taglio

Per verificare l'esistenza di differenze di temperatura tra i sub-plot ed in seguito associarle alle operazioni selvicolturali applicate, sono stati utilizzati due metodi: 1) Poiché le misurazioni delle temperature sono state effettuate in diversi periodi dell'anno, esiste una variabilità legata alla data della misura. Per controllare questa variabilità, si è usata un'analisi della varianza a blocchi, in cui il fattore d'interesse è il sub-plot ed il blocco è la data di campionamento (Gotelli & Ellison, 2004). 2) Sempre per controllare e rendere confrontabili le misure di temperatura prese in diverse sessioni di campionamento, per ogni data, è stata calcolata la temperatura media dell'intero sito (T_m) e gli scostamenti delle temperature registrate per ogni misura da quella media ($dT = T - T_m$). Infine i valori di dT, mediati per ogni sub-plot, sono stati messi in relazione con un parametro strutturale indicativo dell'intervento selvicolturale.

3.8.4 Relazione tra respirazione e presenza di lettiera

Per verificare l'esistenza di differenze di respirazione tra i collari con lettiera ed i collari senza lettiera nei plot, è stato utilizzato il seguente metodo: poiché le misurazioni di respirazione sono state effettuate in diversi periodi dell'anno, esiste una variabilità legata alla data della misura. Per controllare questa variabilità, le misure di respirazione con e senza lettiera sono state confrontate tramite un t test per dati appaiati, ovvero si è testato se la differenza $SR_{litter} - SR_{no\ litter}$ era significativamente diversa da zero. Questa analisi è stata ripetuta per ogni plot.

3.8.5 Calcolo della respirazione cumulativa per il sito di Chiarano-Sparvera

Per il sito di Chiarano-Sparvera, usando i dati di temperatura del suolo registrati in continuo nei tre plot di studio, insieme alla relazione tra respirazione e temperatura (vedi equazione [1]), si è ricostruito l'andamento della respirazione del suolo nel tempo e si è calcolata la respirazione cumulativa nella stagione vegetativa del 2013 (giugno-ottobre). Si è proceduto come segue:

1. Usando le misure congiunte di respirazione e temperatura, si sono determinati i parametri A, K dell'equazione [1] per ogni plot. Insieme ai parametri A e K è stata calcolata anche la *standard deviation dei residui* σ (vedi equazione [1]).
2. Una volta determinati i parametri A, K e σ per ogni plot, tramite i dati di temperatura, registrati ogni 30 minuti dalle centraline, si calcolano i valori di $\log(SR)$ nel tempo. Si noti che σ è una misura dell'incertezza associata ad ogni valore del logaritmo della respirazione ($\log(SR) \pm \sigma$).

3. Per passare dai valori logaritmi a semplici valori di respirazione, è stata effettuata una trasformazione utilizzando l'operazione inversa del logaritmo (esponenziale). A questo punto ho i valori di respirazione del suolo per ogni mezz'ora nel periodo giugno-ottobre 2013 per ogni plot.
4. Quindi, facendo una media giornaliera, si è passati a valori di respirazione giornalieri.
5. I dati di respirazione, espressi in $\mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2 \text{ sec}$, sono stati trasformati in $\mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2 \text{ day}$ tramite moltiplicazione per una costante ($60*60*24$).
6. Avendo tutti i valori di respirazione del suolo giornalieri per il periodo indicato, è bastato fare una sommatoria per ottenere, per ogni plot, il valore cumulativo della respirazione.

Nei punti dal 3 al 6, anche l'errore legato alla grandezza in questione, subisce delle trasformazioni secondo le regole della *propagazione dell'errore* (Taylor, 1997).

CAPITOLO IV: RISULTATI

4.1 Chiarano-Sparvera

4.1.1 Analisi strutturale

Dalle analisi strutturali sono stati ricavati i principali parametri dendrometrici caratteristici del popolamento. Ai fini dello studio della respirazione del suolo, si è rivelata di grande importanza la conoscenza dell'area basimetrica (G) e del numero di piante (N).

site	Plot (tratt)	plot	subplot	Gante	Gpost	Nante	Npost	dG	dG _{sp} %	dG _p %	dN	dN _{sp} %	dN _p %
Chiarano	2 (i80)	2	1	37.8	23.6	1450	772	14.2	-37.6		678	47	
Chiarano	2 (i80)	2	2	40.9	27.6	1883	1055	13.3	-32.6		829	44	
Chiarano	2 (i80)	2	3	36.2	24.1	1300	735	12.1	-33.4	-34.5	565	43	45
Chiarano	3 (T)	3	1	40.2	29.7	1639	998	10.5	-26.1		640	39	
Chiarano	3 (T)	3	2	39.5	28.5	2109	1149	11	-27.9		961	46	
Chiarano	3 (T)	3	3	40.1	27.8	1224	697	12.4	-30.8	-28.3	527	43	43
Chiarano	4 ((i40)	4	1	37.8	21.7	1563	603	16.1	-42.7		961	61	
Chiarano	4 ((i40)	4	2	35.2	21.8	1657	810	13.4	-38.0		848	51	
Chiarano	4 ((i40)	4	3	41.2	28.1	1657	885	13.1	-31.8	-37.5	772	47	53

Tabella 6. Tabella riassuntiva delle misure di area basimetrica (G) e numero di piante. Per ogni sub-plot è indicato: area basimetrica prima del taglio (Gante), area basimetrica dopo il taglio (Gpost), numero di piante prima del taglio (Nante), numero di piante dopo il taglio (Npost), l'area basimetrica asportata (dG), percentuale di area basimetrica asportata sia a livello di subplot (dG_{sp}%) che di plot (dG_p%), il numero di piante asportato (dN), la percentuale di piante asportate sia a livello di sub-plot (dN_{sp}%) che a livello di plot (dN_p%). L'area basimetrica è espressa in m² ha⁻¹, ed N in numero piante ad ettaro. In colonna 2 sono riportate anche le tipologie di trattamento applicate (T: tradizionale; i40: innovativo, 40 candidate; i80: innovativo, 80 candidate).

Come possiamo osservare il plot 3, dove è stato applicato il trattamento di tipo tradizionale, era quello che aveva un'area basimetrica media prima del taglio (Gante), maggiore rispetto agli altri 2 plot. Anche dopo il taglio, nel plot 3 si è riscontrata un'area basimetrica media maggiore.

Plot	Gante	Gpost	Nante	Npost
2 (i80)	38.31	25.09	1544	853
3 (trad.)	39.94	28.65	1657	948
4 (i40)	38.08	23.87	1626	765

Tabella 7. Sintesi dei dati di area basimetrica e numero di piante nei plot, prima del taglio (Gante e Nante) che dopo il taglio (Gpost e Npost). Accanto al numero dei plot sono indicati, tra parentesi, i trattamenti selvicolturali applicati ai plot stessi.

4.1.2 Relazione tra la respirazione del suolo e la temperatura

Ad ogni campagna di campionamento, per ogni punto in cui è stata misurata la respirazione del suolo (sia nei collari con lettiera, sia in quelli senza lettiera), è stato registrato un dato puntuale di temperatura del suolo ed uno di umidità (VWC, *volumetric water content* %). Per le analisi che sono presentate di seguito

sono stati utilizzati solamente i dati di respirazione presi dai collari con lettiera, cioè nella situazione “standard”. Nella Figura 20, si possono notare gli andamenti della respirazione del suolo (SR), temperatura e contenuto idrico del suolo durante il periodo di campionamento da luglio 2012 ad ottobre 2014. Si può notare che gli andamenti di SR e temperatura risultano molto ben correlati, con massimi estivi e minimi autunnali. due anni di campionamento. All'aumentare dei valori di temperatura del suolo (per ogni plot è stata fatta la media delle temperature registrate nei sub-plot), si osserva un incremento della respirazione. Tale relazione è stata sempre osservata, tranne per le misure effettuate nel 2012, quando, ad alti valori di temperatura, non corrispondevano valori di respirazione in accordo con una relazione diretta tra le due variabili. E' probabile che a fine estate 2012, l'umidità del suolo, in un periodo immediatamente successivo ai tagli, abbia costituito un fattore limitante per i processi respirativi.

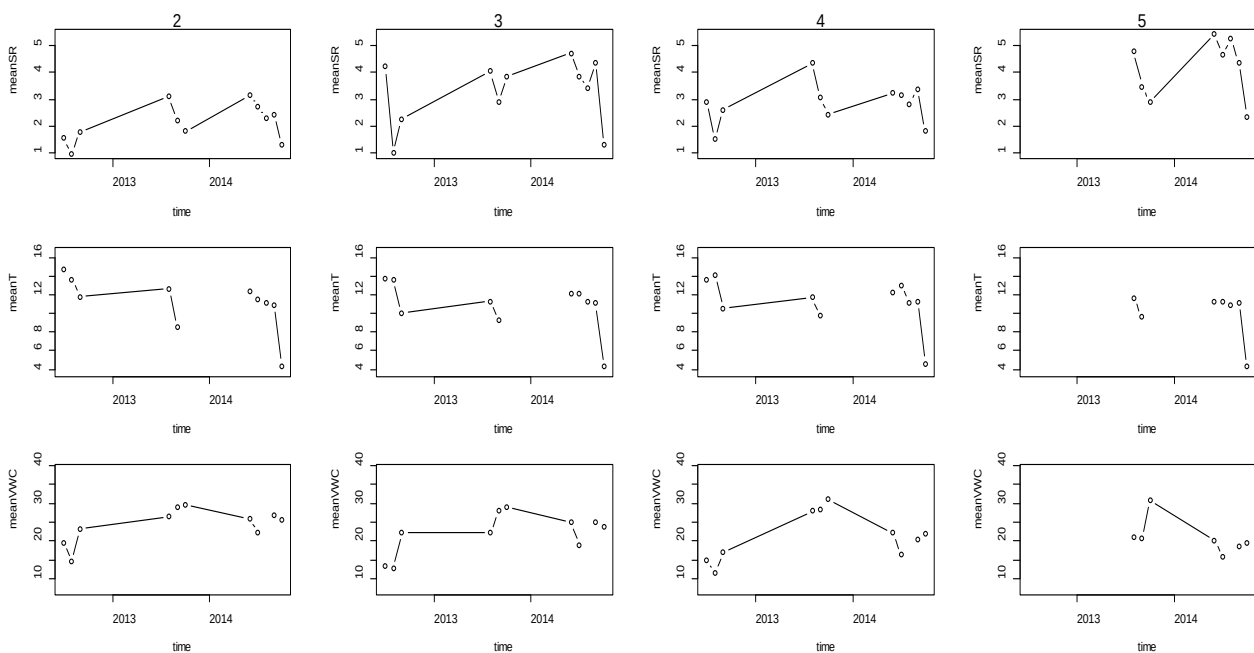


Figura 20. Valori di respirazione (SR), temperatura (T), umidità (VWC) misurati in 11 campionamenti nel periodo luglio 2012 - ottobre 2014. Ogni valore è il risultato della media per ogni data e plot. Il numero dei plot è indicato in alto. Le unità di misura per SR, T, VWC sono, rispettivamente, $\mu\text{molCO}_2/\text{m}^2 \text{ sec}$, $^{\circ}\text{C}$, %.

Per tale motivo, le misure di respirazione del 2012 non saranno utilizzare per le successive analisi delle relazioni tra SR e temperatura.

La dipendenza della respirazione dalla temperatura viene classicamente modellizzata dalla funzione esponenziale

$$SR = Ae^{KT}.$$

Questa dipendenza è stata studiata separatamente per i 3 plot trattati e per il plot di controllo (plot 2 = trattamento i80, plot 3 = trattamento tradizionale, plot 4 = trattamento i40, plot 5 = controllo). Gli andamenti delle 4 regressioni sono espressi in Figura 21.

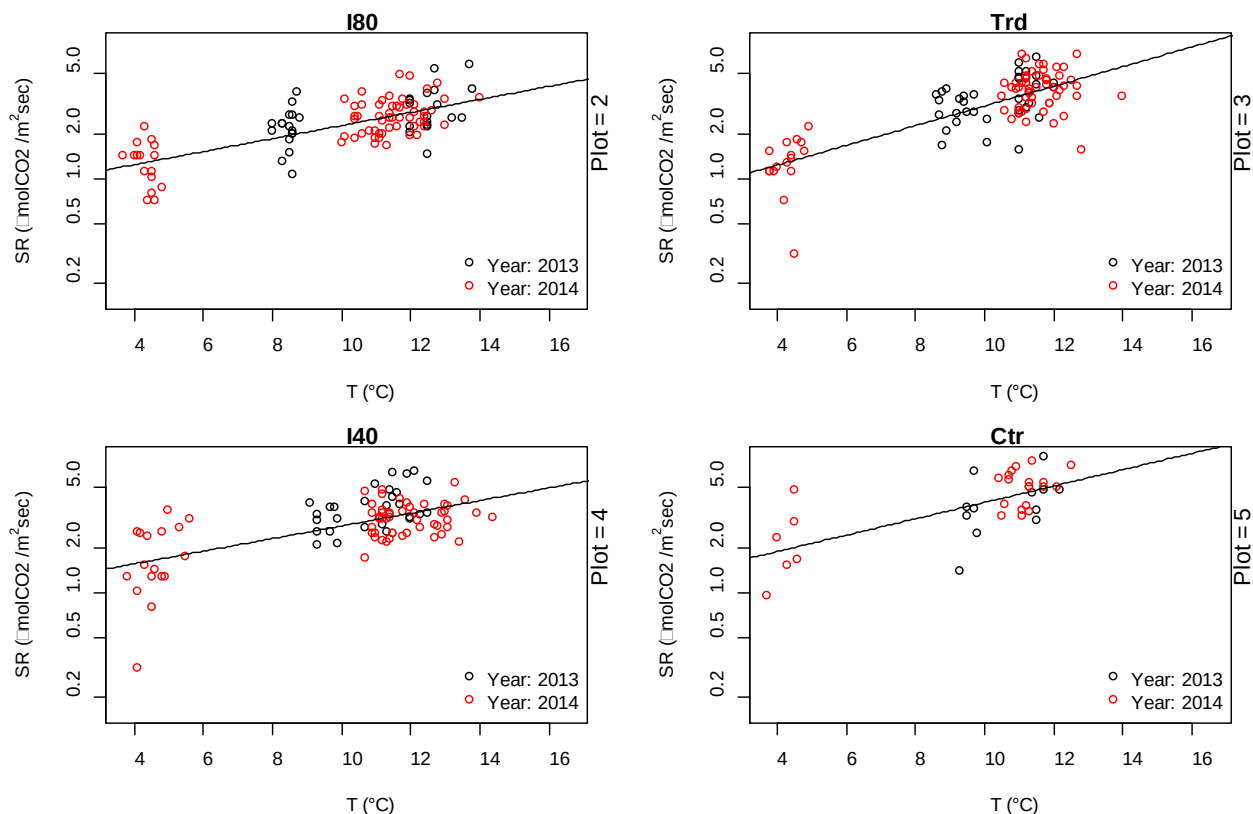


Figura 21. Risposta della respirazione alla temperatura. I punti in nero ed in rosso rappresentano rispettivamente le misure del 2013 e 2014. L'asse delle ordinate è in scala logaritmica.

Attraverso lo studio dell'analisi della covarianza (ANCOVA) è stata determinata una differenza significativa tra le pendenze (K) delle 4 rette come mostrato nella tabella sottostante.

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
T	1	33.963	33.963	307.4085	2.20E-16	***
Plot	3	10.323	3.441	31.1462	2.20E-16	***
interazione	3	1.414	0.471	4.2659	0.005651	**

Tabella 8. Analisi della covarianza. Si mostra la significatività dell'effetto della temperatura (T), del fattore Plot e della loro interazione sul logaritmo della respirazione.

Essendo le 4 rette significativamente diverse, ha senso calcolare i valori dei coefficienti A, K e l'incertezza σ separatamente per i 4 plot. Ricordiamo che σ rappresenta l'incertezza attribuita a $\log(\text{SR})$ quando è calcolato in funzione della temperatura secondo il modello $\log(\text{SR}) = \log(A) + K \cdot T$. Quindi σ è il punto di partenza per il calcolo dell'incertezza sulla respirazione cumulata che verrà discusso nel prossimo paragrafo. Le pendenze maggiori sono quelle che si ritrovano nei plot 3 (trattamento tradizionale) e 5 (controllo). L'interpretazione di questo risultato verrà in seguito analizzata in funzione della struttura forestale.

4.1.3 Calcolo della respirazione cumulativa

Basandoci sulle differenze delle pendenze delle rette precedentemente descritte, ha senso usare i dati di temperatura registrati in continuo nei plot 2, 3, 4 per calcolare gli andamenti della respirazione nel tempo separatamente per i 3 plot. I risultati sono mostrati in Figura 22.

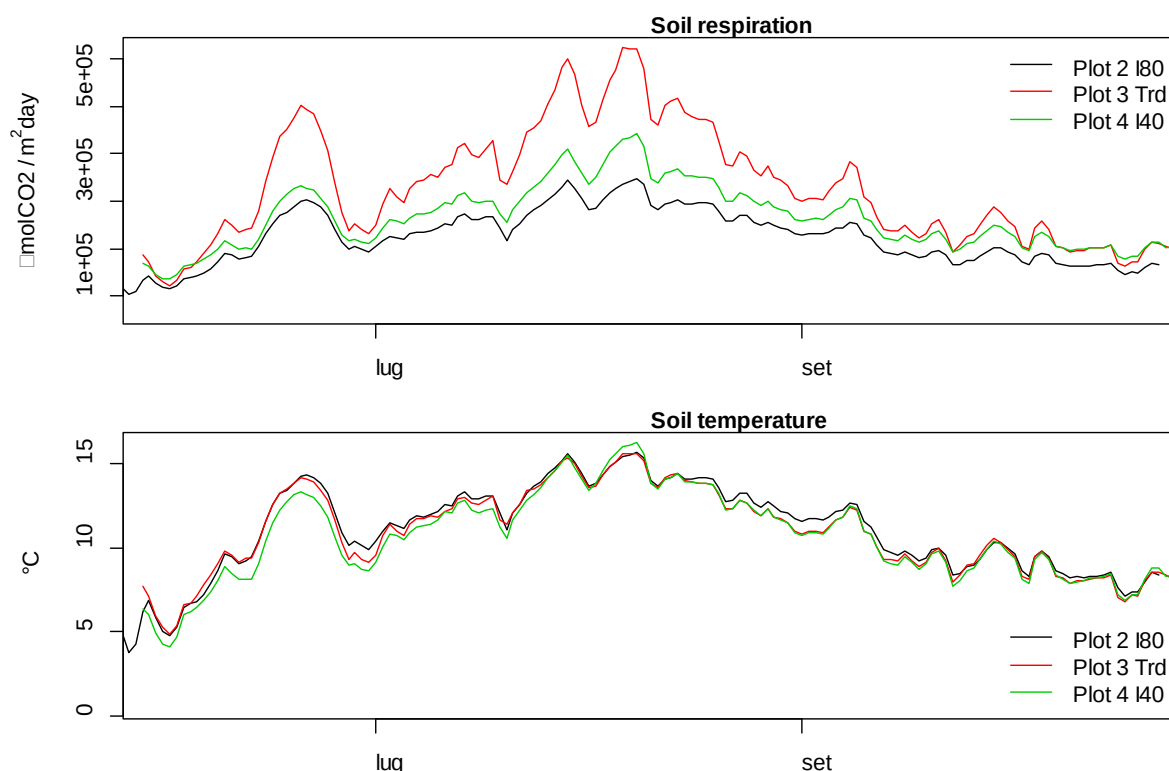


Figura 22. Andamento nel tempo (01 giugno - 20 ottobre 2013) della temperatura del suolo e della respirazione.

Osservando i grafici, possiamo notare che, piccole differenze di temperatura tra i plot, comportano sostanziali differenze tra gli andamenti della respirazione. La maggiore respirazione del plot 3, rispetto agli altri due, è dovuta alla maggiore pendenza K della retta relativa a questo plot (Figura 21). E' interessante notare che il plot 3 è quello con la maggiore respirazione nonostante il plot 2 abbia temperature tendenzialmente più alte. Le differenze tra plot sia in termini di temperatura che di respirazione sono tutte altamente significative (Tabella 3).

Sommando i valori di respirazione del periodo analizzato (01 giugno - 20 ottobre 2013) abbiamo ottenuto la quantità di CO₂ rilasciata in ogni plot durante la stagione vegetativa. A conferma di quanto osservato dall'andamento della respirazione, la quantità di carbonio rilasciata in atmosfera è stata maggiore nel plot 3 (trattamento tradizionale) (Tabella 10).

Plot	T (°C)	K (1/°C)	Q ₁₀	SR (molCO ₂ m ⁻²)	SR gC m ⁻²
2 (i80)	11.33 ± 0.03	0.10 ± 0.01	2.7 ± 0.3	32.8 ± 0.1	393.6 ± 1.2
3 (trad)	11.12 ± 0.03	0.15 ± 0.01	4.5 ± 0.4	48.0 ± 0.2	576 ± 2-4
4 (i40)	10.86 ± 0.03	0.09 ± 0.01	2.5 ± 0.2	38.5 ± 0.2	462 ± 2.4

Tabella 9 Temperatura media, pendenza K, e quantità di CO₂ e C emessa nei plot durante la stagione vegetativa 2013 (giugno - ottobre) con relativo errore. Per completezza è stato aggiunto il relativo Q₁₀ secondo la formula $Q_{10} = \exp(10 \cdot K)$.

4.1.4 Relazione tra la sensitività della respirazione alla temperatura e la struttura forestale

Come visto in precedenza nel capitolo III, i rilievi di tutti i parametri strutturali del sito, sia *ante* che *post*, sono stati effettuati nei tre sub-plot di ogni plot di studio. Quindi per i nostri 3 plot (plot 2, 3, 4) abbiamo a disposizione i dati strutturali dei nove sub-plot (sub-plot 2.1, 2.2, ..., 4.3).

Avendo per i dati strutturali informazioni a livello di sub-plot, anche per quanto riguarda la sensitività della respirazione alla temperatura si è proceduto ad un'indagine a livello di sub-plot. Quindi, separatamente, per ogni sub-plot è stata modellizzata la respirazione in funzione della temperatura analogamente a quanto fatto in precedenza (vd. Figura 21). Abbiamo ottenuto in questo modo nove rette, le cui pendenze (K) esprimono la sensitività della respirazione alla temperatura per ognuno dei nove sub-plot (Figura 23).

Effettuando un'analisi della covarianza (ANCOVA), abbiamo verificato una differenza significativa tra le nove pendenze (Tabella 9). Ricordiamo che l'interazione significativa tra il "fattore sub-plot" e la temperatura, implica che le pendenze delle rette in Figura 23 sono significativamente differenti. Quindi è presente anche una variabilità delle pendenze tra i sub-plot dello stesso plot.

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	
Temp	1	33.963	33.963	324.6493	2.20E-16	***
sub-plot	9	11.112	1.235	11.8023	4.75E-16	***
interazione	9	3.822	0.425	4.0597	6.04E-05	***

Tabella 10. Significatività della temperatura, del fattore sub-plot e della loro interazione sulla respirazione.

Per valutare il legame della sensitività della respirazione alla temperatura con parametri strutturali, sono stati messi in relazione i valori K di ogni sub-plot con diversi parametri di struttura misurati negli stessi sub-plot. Tra i vari parametri considerati, l'area basimetrica è quella che è risultata spiegare meglio la variabilità della sensitività della respirazione alla temperatura (Figura 24, pannello disinistra). Dal grafico si nota una forte relazione tra l'area basimetrica rimasta dopo i tagli e la sensitività della respirazione alla temperatura; nei sub-plot in cui tale area basimetrica è più alta, la sensitività della respirazione alla temperatura è maggiore.

Al fine di caratterizzare ulteriormente la relazione della sensitività della respirazione con i parametri forestali, abbiamo messo in relazione i residui della regressione tra K e G_{post} con dei parametri indicativi dell'intensità dei tagli avvenuti nei sub-plot. Tra questi, il numero di piante asportate è risultato quello con la maggiore correlazione ($p = 0.049$) con i residui (Figura 24, pannello di destra).

Quindi, nel sito di Chiarano, la sensitività della respirazione alla temperatura è fortemente legata all'area basimetrica presente localmente, e, in maniera minore, anche al numero di piante asportate. All'aumentare dell'area basimetrica la sensitività della respirazione alla temperatura aumenta, inoltre il suo incremento risulta maggiore laddove è stato riscontrato un più elevato numero di piante tagliate.

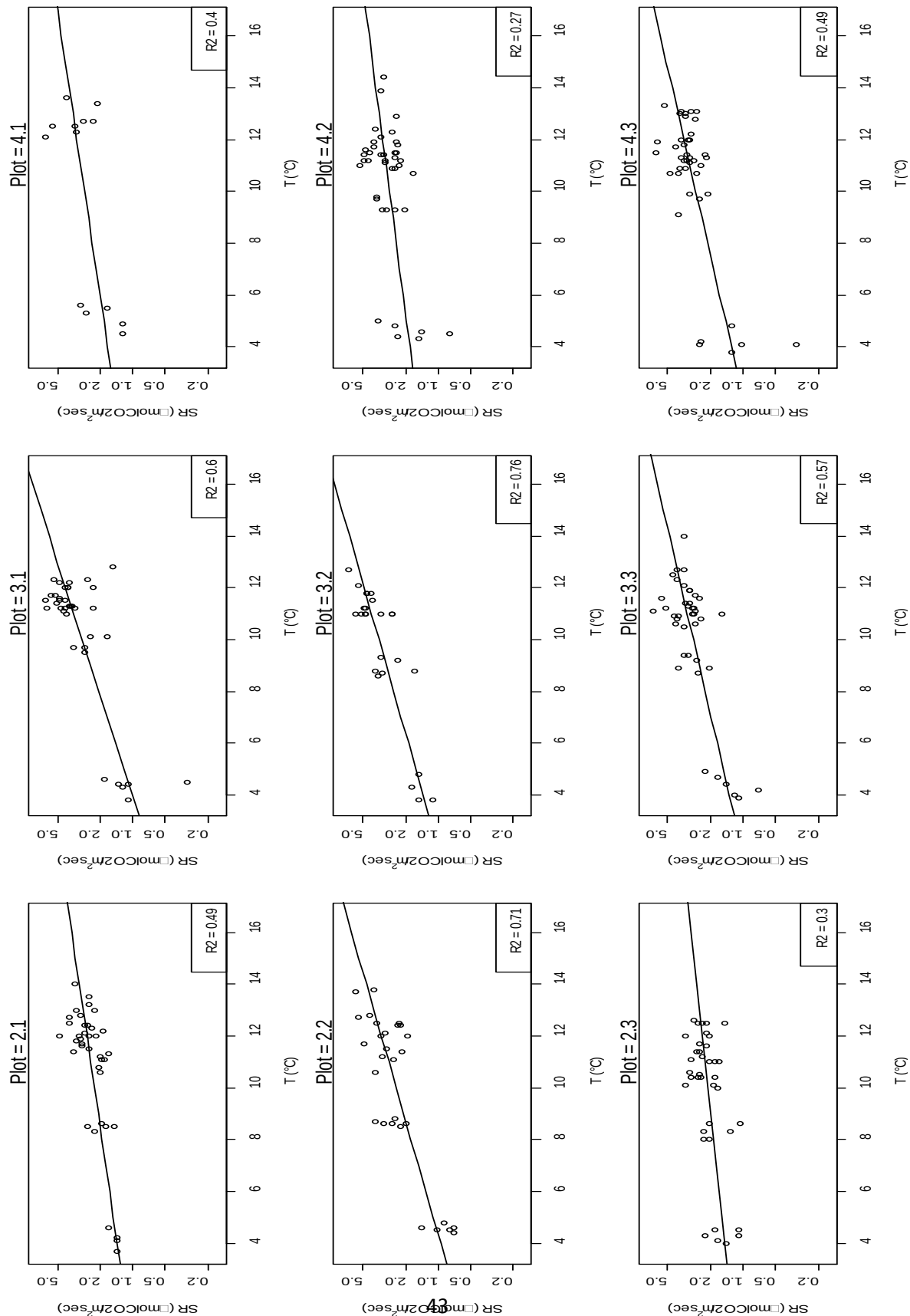


Figura 23. Relazione tra la respirazione e la temperatura in ognuno dei nove sub-plot. Gli assi verticali sono espressi in scala logaritmica.

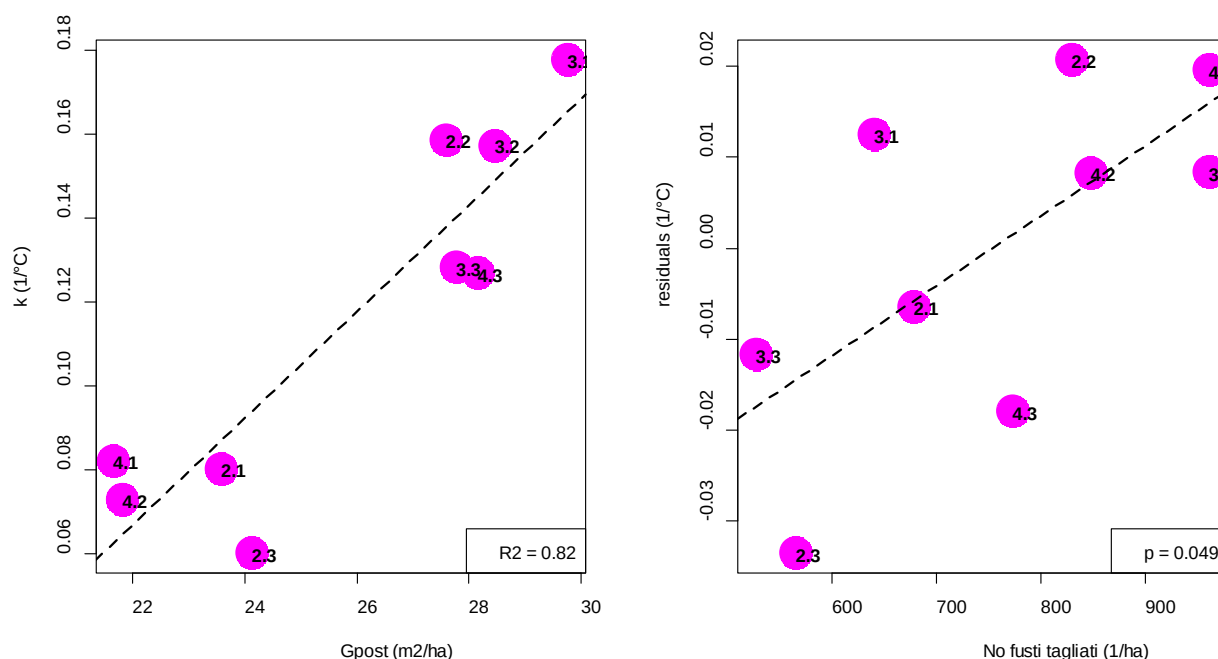


Figura 24. Sinistra: relazione tra la sensibilità della respirazione alla temperatura (K) e l'area basimetrica rimasta sul soprassuolo dopo i tagli (G_{post}). Ogni punto indica un sub-plot (di raggio 13 m). La retta tratteggiata rappresenta la retta di regressione ($R^2=0.82$). Destra: sull'asse y sono rappresentati i residui derivanti dalla regressione lineare tra K e G_{post} , sull'asse x è rappresentato il numero dei fusti tagliati in ogni sub-plot. La retta tratteggiata indica la regressione lineare tra i residui e il numero di fusti tagliati ($p = 0.049$).

4.1.5 Relazione tra le temperature del suolo e il taglio

Per verificare se le temperature del suolo, registrate nei sub-plot, fossero tra loro significativamente differenti, come conseguenza dei tagli effettuati, è stata fatta un'analisi della varianza a blocchi in cui il fattore d'interesse è il sub-plot ed il blocco è la data di campionamento (Gotelli & Ellison, 2004). Il test effettuato è risultato non significativo. Tuttavia un lieve effetto positivo dei tagli sulla temperatura del suolo può essere identificato analizzando la variabilità delle temperature legate alla data di misura, dato che le misurazioni delle temperature sono state effettuate in diversi periodi dell'anno. Per controllare e rendere confrontabili le misure di temperatura prese in diverse sessioni di campionamento, per ogni data è stata calcolata la temperatura media dell'intero sito (T_m) durante la sessione di campionamento e gli scostamenti delle temperature registrate per ogni misura da quella media ($dT = T - T_m$). Infine i valori di dT , mediati per ogni sub-plot, sono stati messi in relazione con l'area basimetrica asportata in ogni sub-plot (vedi Tabella 7). Dal grafico (Figura 25) si nota che i sub-plot in cui è stata asportata una maggiore area basimetrica, hanno una temperatura del suolo mediamente più alta. Tuttavia l'effetto non risulta significativo poiché le differenze in temperatura sono lievi ($\leq 1^\circ\text{C}$).

Va sottolineato che tale analisi ha dei fattori di debolezza in quanto le misurazioni di temperatura del suolo (che erano associate alle misure di respirazione) sono state effettuate tra i vari plot con una certa distanza temporale (circa un'ora per completare le misure di un plot e passare al successivo). Ed in questo intervallo di tempo le normali variazioni termiche (circa $1^\circ\text{C}/4$ ore) sono confrontabili con le differenze termiche trovate tra sub-plot, esercitando così un potenziale elemento di confondimento (Figura 26). Vale comunque la pena di notare che l'ordinamento dei subplot per temperature crescenti mostrato in Figura 6 non ricalca la sequenza seguita durante il campionamento, indicando che il fattore di confondimento è solo parziale.

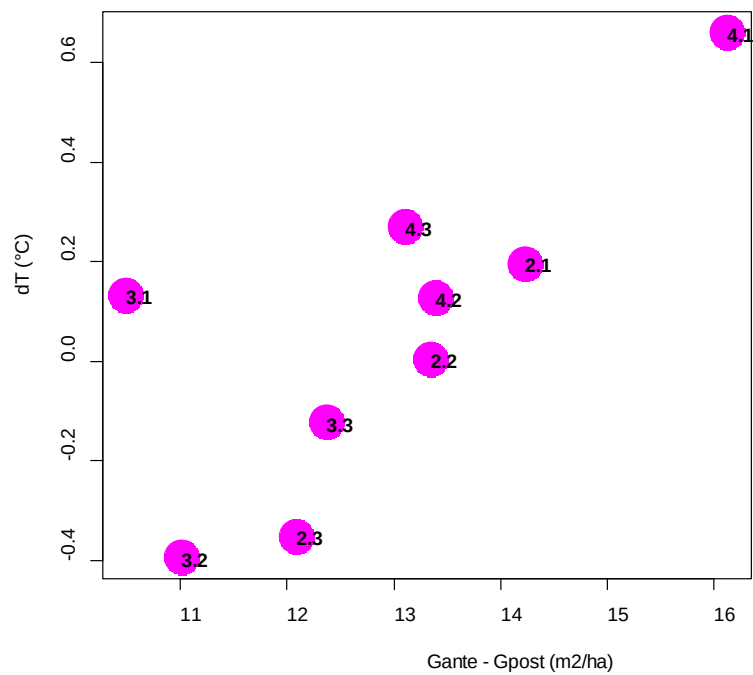


Figura 25. Relazione tra l'area basimentrica asportata (Gante - Gpost) nei sub-plot e gli scostamenti delle temperature registrate in ogni campionamento con la media delle temperature della stessa giornata calcolata su tutti i nove sub-plot. Ogni punto rappresenta un sub-plot.

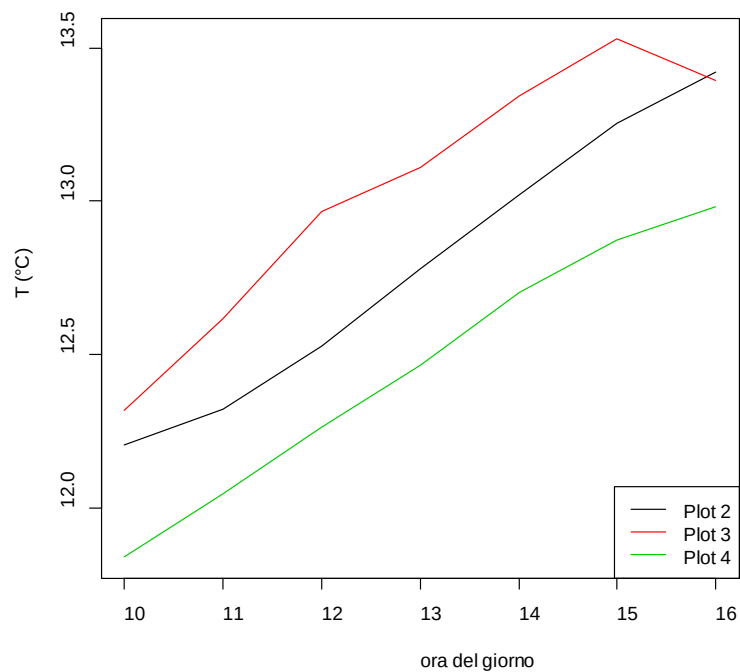


Figura 26. Andamento giornaliero medio della temperatura relativo al mese di luglio del 2013. Le tre curve sono relative ai dati di temperatura del suolo misurate dalle centraline poste all'interno dei plot 2, 3, 4.

4.1.6 Relazione tra respirazione e presenza di lettiera

Per verificare l'esistenza di differenze di respirazione tra i collari con lettiera ed i collari senza lettiera nei plot, si è usato il t test per dati appaiati. Il test è stato ripetuto per ogni plot. Nei plot 2 e 4 la respirazione nei collari con lettiera è risultata significativamente più alta che in quelli senza lettiera. I risultati sono riassunti nella Tabella 12.

Plot	Trattamento	SR _{litter}	SR _{no litter}	P value
2	i80	2.16	2.00	0.02
3	Tradizionale	3.42	3.62	0.25
4	i40	2.80	2.70	0.03

Tabella 11. Respirazione con e senza lettiera. Valori medi nei plot durante le varie sessioni di campionamento. Le unità di misura per la respirazione sono $\mu\text{molCO}_2/\text{m}^2\text{sec}$. Il P-value è relativo al t test per dati appaiati.

4.2 Mongiana

Anche per il sito di Mongiana, dalle analisi strutturali sono stati ricavati i principali parametri dendrometrici caratteristici del popolamento. Anche per Mongiana, l'area basimetrica (G) e il numero di piante (N) sono risultati i parametri strutturali di maggior rilievo per la respirazione del suolo (Tabella 13).

site	plot	subplot	Gante	Gpost	Nante	Npost	dG	dG%	dG%	dN	dN%	dN%
Mongiana	2 (inn)	1	36.4	28.6	645	462	7.7	-21.3	-17	183	-28	-20
Mongiana	2 (inn)	2	33.2	27.4	724	597	5.8	-17.5		127	-18	
Mongiana	2 (inn)	3	32.3	28.4	525	454	3.9	-12.1		72	-14	
Mongiana	3 (no pract)	1	36.9	36.9	406	406	0	0	0	0	0	0
Mongiana	3 (no pract)	2	48.8	48.8	573	573	0	0		0	0	
Mongiana	3 (no pract)	3	39.9	39.9	342	342	0	0		0	0	
Mongiana	6 (trad)	1	35.3	30.3	462	390	5	-14.2	-13.5	72	-16	-12
Mongiana	6 (trad)	2	33.1	28.7	493	430	4.5	-13.5		64	-13	
Mongiana	6 (trad)	3	33.6	29.3	716	653	4.3	-12.7		64	-9	

Tabella 12. Tabella riassuntiva delle misure di area basimetrica (G) e numero di piante. Per ogni sub-plot è indicato: area basimetrica prima del taglio (Gante), area basimetrica dopo il taglio (Gpost), numero di piante prima del taglio (Nante), numero di piante dopo il taglio (Npost), l'area basimetrica asportata (dG), percentuale di area basimetrica asportata sia a livello di subplot (dGsp%) che di plot (dGp%), il numero di piante asportato (dN), la percentuale di piante asportate sia a livello di sub-plot (dNsp%) che a livello di plot (dNp%). L'area basimetrica è espressa in $\text{m}^2 \text{ha}^{-1}$, ed N in numero piante ad ettaro. In colonna 2 sono riportate anche le tipologie di trattamento applicate (Trad: tradizionale; inn: innovativo; no pract: trattamento ritardato).

Possiamo vedere che, a livello di plot, il trattamento tradizionale (Tabella 14) ha inciso in maniera minore sulla biomassa, intesa come area basimetrica, rispetto al trattamento innovativo.

Plot	Gante	Gpost	Nante	Npost
2 (inn)	34	28	631	504
3 (no pract)	42	42	440	440
6 (trad)	34	29	557	491

Tabella 13. Sintesi dei dati di area basimetrica e numero di piante nei plot, prima del taglio (Gante e Nante) e dopo il taglio (Gpost e Npost). Accanto al numero dei plot sono indicati, tra parentesi, i trattamenti selvicolturali applicati ai plot stessi.

4.2.2 Relazione tra la respirazione del suolo e la temperatura

Ad ogni campagna, per ogni punto in cui è stata misurata la respirazione del suolo, è stato registrato un dato puntuale di temperatura del suolo ed uno di umidità (VWC, *volumetric water content* %). La respirazione è stata misurata in 12 punti per ogni sub-plot, di cui 6 in collari con lettiera e 6 in collari senza lettiera. In tutte le analisi relative alla relazione tra respirazione e temperatura solo i collari con lettiera sono stati presi in considerazione mentre il confronto lettiera non-lettiera verrà discusso più avanti. Utilizzando tali dati abbiamo ottenuto gli andamenti, per il periodo di campionamento (maggio - dicembre 2014), della respirazione, della temperatura e dell'umidità del suolo (i dati dell'umidità del suolo sono presenti a partire da luglio 2014) (Figura 27). In Figura 27, sono riportati gli andamenti della respirazione del suolo, della temperatura e del contenuto idrico del suolo. Si può notare che, all'aumentare dei valori medi di temperatura del suolo, si osserva un incremento della respirazione media. Vediamo altresì come, nei campionamenti in cui l'umidità del suolo era bassa (luglio, settembre), la respirazione abbia subito dei decrementi nonostante gli alti valori di temperatura. Probabilmente tale situazione è dovuta all'effetto dell'umidità del suolo sulla respirazione; in questo sito, l'umidità può diventare un fattore limitante nei periodi in cui le temperature sono relativamente elevate ma il contenuto idrico del suolo è relativamente basso.

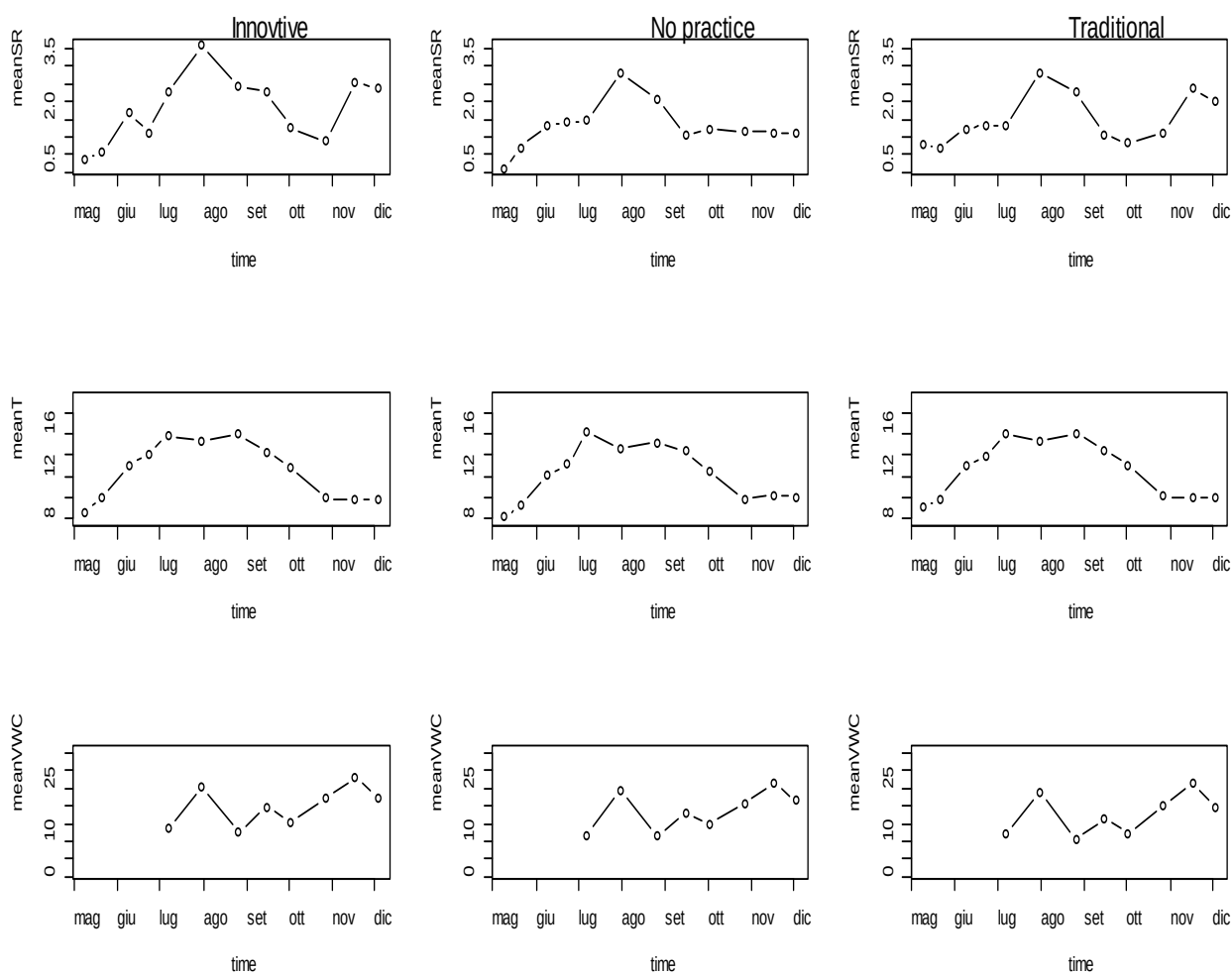


Figura 27. Valori di respirazione (SR), temperatura (T), umidità (VWC) misurati in 12 campionamenti nel periodo maggio - dicembre 2014. Ogni valore è il risultato della media per ogni data e plot. Da sinistra a destra sono rappresentati i plot 2, 3 e 6; il relativo tipo di trattamento è riportato in alto. Le unità di misura per SR, T, VWC sono, rispettivamente, $\mu\text{molCO}_2/\text{m}^2 \text{ sec}$, $^{\circ}\text{C}$, %. Il taglio innovativo è stato applicato al plot 2, l'opzione di non gestione (no practice) al plot 3 ed il taglio tradizionale al plot 6.

4.2.3 Relazione tra la sensitività della respirazione alla temperatura e la struttura forestale

Come abbiamo fatto per il sito di Chiarano, anche per Mongiana abbiamo calcolato la sensitività della respirazione alla temperatura per ogni sub-plot. Per questo sito, le pendenze K (cioè le sensitività) risultano diverse ma non significativamente (ANCOVA). Questo è probabilmente dovuto ad una maggiore variabilità nei valori misurati di respirazione, in particolare nel plot 6.

In ogni caso, in analogia con quanto fatto a Chiarano, presentiamo le relazioni tra respirazione e temperatura per i 9 sub plot (Figura 28).

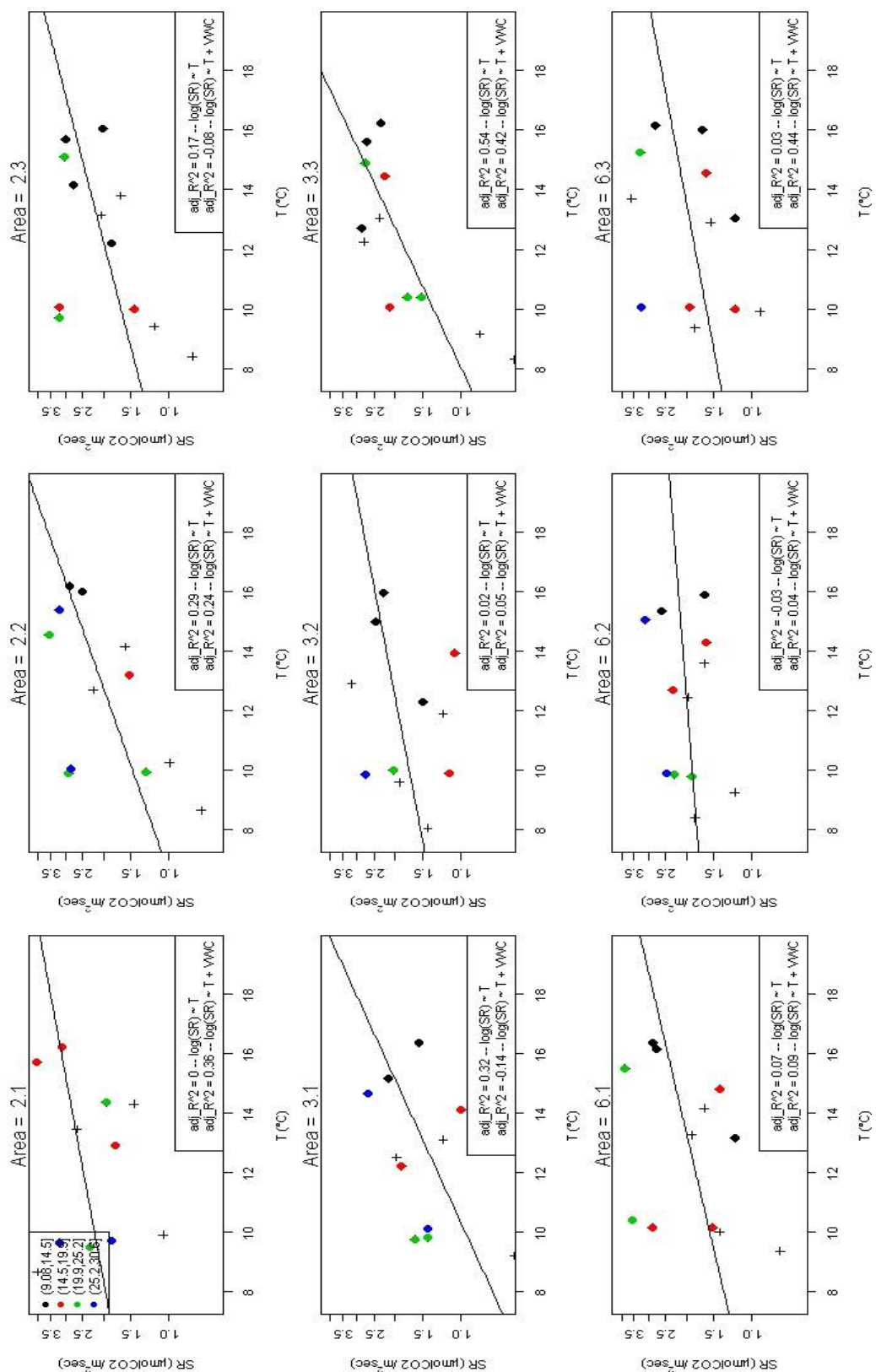


Figura 28. Relazione tra la respirazione e la temperatura in ognuno dei nove sub-plot. Gli assi verticali sono espressi in scala logaritmica. Il colore dei punti indica l'umidità (VWC) laddove questa è stata misurata, altrimenti il punto è rappresentato da una crocetta. La leggenda in basso a destra mostra i valori di R^2 (adjusted) relativo ai modelli $\log(\text{SR}) = a + b \cdot T$ e $\log(\text{SR}) = a + b_1 \cdot T + b_2 \cdot \text{VWC}$.

La relazione tra respirazione e temperatura è meno forte rispetto a quanto trovato a Chiarano, come evidenziato dai bassi valori di R^2 . Estendere il modello in modo da comprendere anche l'umidità, cioè passare da $\log(SR) = a + b \cdot T$ a $\log(SR) = a + b_1 \cdot T + b_2 \cdot VWC$, non ne migliora sostanzialmente il potere esplicativo (vedi i valori di adjusted R^2 in Figura 28). Per analogia con il sito di Chiarano, analizzeremo quindi la temperatura come variabile esplicativa per la respirazione.

Per valutare il legame della sensitività della respirazione alla temperatura con l'area basimetrica rimasta dopo il taglio (Gpost) ed il numero di piante asportate ad ettaro (dN), abbiamo esaminato il seguente modello:

$$K = a + b_1 \cdot \text{Gpost} + b_2 \cdot \text{dN}.$$

Entrambi i coefficienti b_1 e b_2 risultano positivi e significativamente diversi da zero (Tabella 15) indicando un effetto positivo sia di Gpost che di dN sulla sensitività K (vedi Tabella 15).

	Estimate	Std.Error	t value	Pr(> t)	
(Intercept)	-0.1693	0.083229	-2.034	0.0882	
Gpost	0.005977	0.002116	2.825	0.0302	*
dN	0.000864	0.000249	3.464	0.0134	*

Tabella 14. Risultato della regressione multipla di K su Gpost e dN ($K = a + b_1 \cdot \text{Gpost} + b_2 \cdot \text{dN}$).

Graficamente, questo risultato è rappresentato in Figura 29. Ogni punto è relativo ad un sub-plot; sugli assi x e y abbiamo, rispettivamente, i valori di Gpost e K mentre la dimensione dei punti indica il numero di piante asportate ad ettaro. La retta tratteggiata è $K = a + b_1 \cdot \text{Gpost} + b_2 \cdot 0$, cioè la sensitività attesa in assenza di taglio. I punti relativi al plot 3 (non tagliato) giacciono sulla retta mentre i punti relativi ai plot 2 e 6 si allontanano dalla retta proporzionalmente all'intensità del taglio.

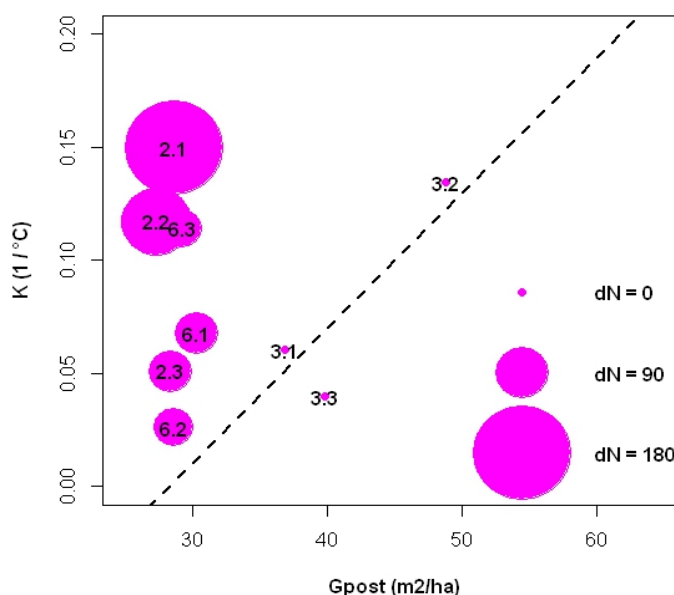


Figura 29. Relazione tra la sensibilità della respirazione alla temperatura (K) e l'area basimetrica rimasta sul soprassuolo dopo i tagli (Gpost) ed il numero delle piante asportate ad ettaro durante i tagli. Quest'ultimo valore viene indicato per ogni sub-plot dall'ampiezza della circonferenza dei punti.

4.2.4 Relazione tra respirazione e presenza di lettiera

Per verificare l'esistenza di differenze di respirazione tra i collari con lettiera ed i collari senza lettiera nei plot, si è usato il t test per dati appaiati. Il test è stato ripetuto per ogni plot. Nei plot 2 e 3 la respirazione nei collari con lettiera è risultata significativamente più alta che in quelli senza lettiera. Nel plot 6 si nota la stessa tendenza che, tuttavia, non è significativa. I risultati sono riassunti nella Tabella 16.

Plot	Trattamento	SR _{litter}	SR _{no litter}	P value
2	Innovativo	2.57	2.16	0.0006
3	No practice	2.02	1.74	0.01
6	Tradizionale	2.53	2.08	0.3

Tabella 15. Respirazione con e senza lettiera. Valori medi nei plot durante le varie sessioni di campionamento. Le unità di misura per la respirazione sono $\mu\text{molCO}_2/\text{m}^2\text{sec}$. Il P-value è relativo al t test per dati appaiati.

4.3 Cansiglio

Purtroppo la presenza di una scarsa quantità di dati, ed il diverso approccio sperimentale al sito (misure di tipo stagionale), non ci ha permesso di effettuare lo stesso approfondimento di analisi che si è avuto per i siti di Chiarano -Sparvera e Mongiana. Verranno in seguito mostrati (Tabella 16) i valori medi di respirazione riscontrati nei plot dove è avvenuto il taglio tradizionale (2, 6, 9), l'innovativo (1, 4, 7) e per i plot non sottoposti a taglio (3, 5, 8).

		tradizionale		innovativo		no practice	
		SR ($\mu\text{molCO}_2/\text{m}^2\text{sec}$)	T (°C)	SR ($\mu\text{molCO}_2/\text{m}^2\text{sec}$)	T (°C)	SR ($\mu\text{molCO}_2/\text{m}^2\text{sec}$)	T (°C)
2012	lug	1.29	11.76	1.98	12.16	1.79	12.30
	ott	0.99	10.78	1.31	10.83	1.25	10.83
2014	lug	2.40	13.70	3.34	13.98	3.44	12.92
	ott	1.66	9.69	2.04	9.75	2.11	9.36

Tabella 16. Valori medi di respirazione e di temperatura del suolo nei plot di studio nella foresta del Cansiglio.

Le misurazioni del 2012 sono state effettuate prima dei tagli, i quali sono avvenuti nel 2013. Possiamo notare che, sia prima che dopo i tagli, i valori di respirazione in ogni trattamento erano più alti nel mese di luglio, quando si riscontravano valori più elevati di temperatura del suolo. Negli stessi plot, dopo i tagli si sono riscontrati valori più elevati di respirazione, ma anche di temperatura del suolo, probabilmente come effetto dei tagli. Un incremento nella respirazione è stato osservato anche nei plot *no practice*.

CAPITOLO V: DISCUSSIONE DEI RISULTATI

Relazione tra la respirazione del suolo e la temperatura

In tutte e due i siti indagati, Chiarano-sparvera e Mongiana, l'andamento della respirazione del suolo è risultato positivamente legato alla temperatura del suolo, tranne in condizione di basso contenuto idrico, quando il fattore limitante dei processi respirativi diviene l'umidità del suolo. Mettendo in relazione la temperatura del suolo con la respirazione abbiamo calcolato per ogni plot la sensitività della respirazione del suolo alla temperatura. Questo ci ha permesso di confrontare valori di respirazione in condizioni di differente temperatura del suolo. L'equazione che rappresenta la relazione tra respirazione e temperatura del suolo è di tipo esponenziale, per cui una maggiore sensitività alla temperatura comporta un effetto rilevante in risposta a variazioni anche limitate di temperatura del suolo.. In particolare, per il sito di Chiarano-Sparvera si è verificato che per la respirazione cumulata (calcolata per i diversi plot) il plot 3, che aveva una maggiore sensitività della respirazione alla temperatura, è risultato quello con la respirazione maggiore pur non essendo il plot con la temperatura del suolo maggiore.

Relazione tra la sensitività della respirazione alla temperatura e la struttura forestale

In tutte e due i siti la sensitività della respirazione alla temperatura è risultata differente tra i sub-plot studiati, ed è risultata maggiore nei sub-plot con più alta area basimetrica rimasta sul soprassuolo dopo i tagli. Questo elemento ci porta a pensare ad una predominanza della componente autotrofa della respirazione. Inoltre, la relazione positiva trovata tra la sensitività della respirazione alla temperatura ed il numero di piante tagliate, sembra indicare che le piante rimaste, in risposta agli interventi di gestione, vengono a trovarsi in condizioni più favorevoli per la loro crescita: i tagli hanno ridotto la competizione per la luce, per lo spazio, per i nutrienti, per l'acqua. In questo modo le piante rimaste possono incrementare il loro metabolismo (crescita d'espansione) aumentando sia la fotosintesi che la respirazione. Infatti molti studi (Raich e Schlesinger, 1992) dimostrano che esiste una forte correlazione tra la produzione primaria netta e la respirazione del suolo: la respirazione radicale dipende dalla ripartizione del carbonio alla componente ipogea che può essere messa in relazione alle risposte delle piante a modificazioni della struttura forestale.

I trattamenti hanno influenzato l'area basimetrica. Tutte le tipologie di trattamento, sebbene diversificate, hanno determinato che le piante rimaste siano tendenzialmente tra quelle più grandi presenti. Si può ipotizzare, con ragionevole approssimazione, che queste piante siano quelle che danno un contributo maggiore alla respirazione. Quindi, togliendo più piante di piccole dimensioni, si tende a favorire la respirazione radicale delle piante rimaste.

Va inoltre segnalato che l'apertura della copertura, anche se parziale, modifica le condizioni al suolo (aumento di luce, minore intercettazione della pioggia, input di nutrienti e residui organici). Tali condizioni possono anche influenzare la componente eterotrofa della respirazione, aumentandone la sensitività alla temperatura. Non si può quindi escludere che anche questa componente abbia risposto allo stesso modo di quella autotrofa. Vale la pena considerare che, essendo la respirazione del suolo strettamente correlata con l'attività fotosintetica, un aumento di CO₂ emessa dal suolo, dovuto all'azione del taglio, può essere ampiamente compensato con quella fissata dalle piante con la fotosintesi in tempi relativamente brevi dal taglio.

Relazione tra le temperature del suolo e il taglio

Per il sito di Chiarano, è emerso anche che nei sub-plot in cui è stata asportata più biomassa, la temperatura del suolo risulta mediamente più alta, sebbene non a livello significativo. Questo probabilmente in risposta alla maggiore apertura di buche e alla conseguente entrata di radiazione solare. Questa variazione di temperatura ha sicuramente influenzato la respirazione dei plot, data la relazione esponenziale tra le due variabili. Tuttavia, questo risultato non ha sempre causato una maggiore respirazione complessiva (su base stagionale) dato che è la sensibilità alla temperatura più che la temperatura assoluta che determina la respirazione totale.

Relazione tra respirazione e presenza di lettiera

Le misure di respirazione in collari con lettiera e senza lettiera sono state fatte per valutare quanto l'apporto di carbonio dovuto all'input di lettiera, potesse influire sulla respirazione. Dall'analisi dei dati è emerso che delle differenze significative sono state trovate nei plot con i trattamenti i80 ed i40 per Chiarano, e per i trattamenti *innovativo* e *no practice* per Mongiana. In tali plot il flusso di CO₂ nei collari con lettiera è risultato maggiore che in quelli senza lettiera.

Per il sito di Chiarano, possiamo ipotizzare che ad accentuare la differenza tra le misurazioni con la lettiera e senza lettiera possano influire le condizioni che si trovano nei plot 2 e 4 dopo il taglio. Tali plot infatti risultano essere quelli in cui è rimasta minore area basimetrica sulla superficie rispetto al plot 3. Una minore presenza di area basimetrica, quindi di copertura fogliare, può aver permesso un'entrata maggiore di luce al suolo, andando ad aumentare e velocizzare i processi di decomposizione della sostanza organica (lettiera). Di contro nel plot 3, dove non si sono riscontrate differenze significative tra respirazione con lettiera e senza lettiera, ci trovavamo in una condizione in cui l'area basimetrica era maggiore, quindi la copertura del suolo era più alta (infatti la temperatura media del suolo di questo plot era più bassa degli altri due), quindi probabilmente i processi di decomposizione erano più lenti, risultando in una differenza non significativa tra i collari con e senza lettiera.

CAPITOLO VI: CONCLUSIONI

Concludendo possiamo dire che:

- la temperatura del suolo è il driver principale nei processi di respirazione del suolo in ambienti montani
- ogni plot possiede una propria sensibilità della respirazione alla temperatura. Tale sensibilità dipende dalle caratteristiche intrinseche del plot, e può venire modificata da cambiamenti strutturali a livello locale
- la consistenza della biomassa presente influenza fortemente la risposta della respirazione alla temperatura. Risulta quindi di fondamentale importanza inserire la sua considerazione nei modelli di respirazione, specie quando si vogliano confrontare diversi trattamenti nelle stesse condizioni. A tal proposito, l'area basimetrica appare una variabile promettente
- i trattamenti, influenzando l'area basimetrica, possono influenzare la risposta alla temperatura, anche nel lungo termine
- è importante proseguire i rilievi nel medio-lungo termine per verificare se le risposte trovate in risposta al taglio si mantengano nel tempo, mentre ci si può aspettare che il ruolo dell'area basimetrica presente si mantenga nel tempo
- bisognerebbe, nelle operazioni selvicolturali, minimizzare le fonti di disturbo che possono incrementare la perdita di CO₂ dal suolo mediante la respirazione

BIBLIOGRAFIA

- Allen et al., 1998. Drought - induced shift of a forest - woodland ecotone: rapid landscape response to climate variation. Edited by Margaret Bryan Davis, University of Minnesota.
- Aussenac G., 2000. Interaction between forest stands and microclimate: Ecophysiological aspects and consequences for silviculture. DOI: 10.1051/forest: 2000119.
- Boisvenue C., Running S.W. (2006). Impacts of climate change on natural forest productivity – evidence since the middle of the 20th century. *Global Change Biology* 12, 862–882,
- 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. doi 10.1038/25119.
- Buchmann N (2000) Biotic and abiotic factors regulating soil respiration rates in *Picea abies* stands. *Soil Biology and Biochemistry*, 32, 1625–1635.
- Canadell, J.G., Le Quéré, C., Raupach, M.R., Field, C.B., Buitenhuis, E.T., Ciais, P., Conway, T.J., Gillett, N.P., Houghton, R.A., Marland, G. (2007) “Contributions to accelerating atmospheric CO₂ growth from economic activity, carbon intensity, and efficiency of natural sinks.” *PNAS*:0702737104
- Cox P.M., Betts R.A., Jones C.D., Spall S.A. and Totterdell I.J., Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model, *Nature* 408 (2000), pp. 184–187.
- Cropper WP, Gholz HL (1991) In situ needle and fine root respiration in mature slash pine (*Pinus elliotii*) trees. *Canadian Journal of Forest Research*, 21, 1589–1595.
- Davidson EA, Belk E, Boone RD (1998) Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest. *Global Change Biology*, 4, 217–227.
- Davidson EA, Belk E, Boone RD (1998) Soil water content and temperature as independent or confounded factors controlling soil respiration in a temperate mixed hardwood forest. *Global Change Biology*, 4, 217–227.
- De Angelis P. & De Luca A. (1998). Andamento stagionale della fotosintesi lungo il profilo verticale delle chiome in una faggeta dell’Appennino Centro Meridionale. In: Giannini R., (Ed) Atti del seminario Funzionalità dell’ecosistema faggeta, Firenze, 16-17/11/1995. CNR-RAISA, Roma pp. 203-208.
- Epron D, Farque L, Lucot E et al. (1999) Soil CO₂ efflux in a beech forest: dependence on soil temperature and soil water content. *Annals of Forest Science*, 56, 221–226.
- Giardina P.C., Coleman M.D., Binkley D., Hancock J.E., King J.S., Lilleskov E.A., Loya, W.M., Pregitzer K.S., Ryan M.G. and Trettin C.C. The response of belowground carbon allocation in forests to global change. In: D. Binkley and O. Menyailo, Editors, *Tree Species Effects on Soils: Implications for Global Change*, Kluwer Academic Publishers, London (2005), pp. 119–154
- Gillon D., R. Joffre and P. Dardenne, Predicting the stage of decay of decomposing leaves by near-infrared spectroscopy, *Canadian Journal of Forest Research* 23 (1993), pp. 2552– 2559.

- Gotelli N.J., Ellison A.M., 2004. A primer of ecological statistics. Sinauer Associates, Inc Publisher Sunderland, Massachusetts U.S.A.
- Hanson PJ, Wullschlegel SD, Bohlman SA et al. (1993) Seasonal and topographic patterns of forest floor CO₂ efflux from upland oak forest. *Tree Physiology*, 13, 1–15.
- Janssens I.A., S. Dore, D. Epron, H. Lankreijer, N. Buchmann, B. Longdoz, J. Brossaud, and L. Montagnani. (2000a). Climatic influences on seasonal and spatial differences in soil CO₂ efflux. In: Valentini R. (Ed.) *Canopy Fluxes of Energy, Water and Carbon Dioxide of European Forests*, Springer-Verlag, Berlin, Germany, p. 235-256.
- Janssens IA, Sampson DA, Cermak J et al. (1999) Above- and below-ground phytomass and carbon storage in a Belgian Scots pine stand. *Annals of Forest Science*, 56, 81–90
- Jarvis PG, Rey A, Petsikos C et al. (2007) Drying and wetting of soils stimulates decomposition and carbon dioxide emission: the "Birch Effect". *Tree Physiology*, 27, 929–940.
- Jenkinson DS, Adams DE and Wild A (1991) Model estimates of CO₂ emissions from soil in response to global warming. *Nature*, 351(6322), 304-306.
- Johnson D.W. & Curtis P.S. (2001) Effects of forest management on soil C and N storage: meta analysis. *Forest Ecology and Management* 140: 227-238.
- Jones RL (1996). *Handbook of tests and measurements for Black populations*. (2 Vols). Hampton, VA : Cobb & Henry Publishers.
- Kalbitz et al. Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soil: a review. *Soil Science*. April 2000 - Volume 165 - issue 4 - pp 277 - 304.
- Kirschbaum, M.U.F., 1995. The temperature dependence of soil organic matter decomposition and the effect of global warming on soil organic carbon storage. *Soil Biology and Biochemistry* 27, 753-760.
- Landsberg J.J. and Gower S.T., *Applications of Physiological Ecology to Forest Management*, Academic Press, San Diego (1997).
- Law, B.E., M.G. Ryan and P.M. Anthoni. 1999. Seasonal and annual respiration of a *Ponderosa pine* ecosystem. *Global Change Biol.* 5: 169–182.
- Longdoz B., Yernaux M. and Aubinet M. 2000. Soil CO₂ efflux measurements in a mixed forest: impact of chamber disturbances, spatial variability and seasonal evolution, *Glob. Change Biol.* 6 , pp. 907–917.
- Malhi Y., Baldocchi D., & Jarvis P. The carbon balance of tropical, temperate and boreal forest. *Plant, Cell and Environment* (1999), 22 715 - 740.
- Matteucci G., De Angelis P., Dore S., Masci A., Valentini R., Scarascia Mugnozza G. (1999). Il bilancio del carbonio delle faggete: dall'albero all'ecosistema. In: Scarascia Mugnozza G. (edit.) *Ecologia strutturale e funzionale di faggete italiane*. Edagricole, pp. 133-183.
- More'n A-S, Lindroth A (2000) CO₂ exchange at the floor of a mixed boreal pine and spruce forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 101, 1–14.

- Moscatelli MC, Lagomarsino A, Marinari S, De Angelis P, Grego S. Soil microbial indices as bioindicators of environmental changes in a poplar plantation. *Ecol Ind* 2005b;5:171–9.
- Musselman RC, Fox DG (1991). A review of role of temperate forests in the global CO₂ balance. *Journal of Air Waste Management Association* 41: 798-807.
- Nemani R.R., Keeling C.D., Hashimoto H., Jolly W.M., Piper S.C., Tucker C.J., Myneni R.B., Running S.W. (2003). Climate-Driven Increases in Global Terrestrial Net Primary Production from 1982 to 1999. *Science* 300: 1560-1563
- Peterjohn WT, Melillo JM, Steudler PA et al. (1994) Responses of trace gas fluxes and N availability to experimentally elevated soil temperatures. *Ecological Applications*, 4, 617– 625.
- Raich J.W. and Nadelhoffer K.J., Belowground carbon allocation in forest ecosystems: global trends. *Ecology* 70 (1989), pp. 1346–1354.
- Raich, J. W. and A. Tufekcioglu. 2000. Vegetation and soil respiration: Correlations and controls. *Biogeochemistry* 48: 71-90.
- Raich, J.W. and C.S. Potter. 1995. Global patterns of carbon dioxide emissions from soils. *Global Biogeochem. Cycles* 9:23–36.
- Raich, J.W. and W.H. Schlesinger. 1992. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus* 44B:81–99.
- Raich, J.W. and W.H. Schlesinger. 1992. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate. *Tellus* 44B:81–99.
- Raich, J.W., C. S. Potter, and D. Bhagawati, Interannual variability in global soil respiration, 1980–94, *Global Change Biol.*, 8, 800– 812, 2002.
- Rayment M.B. and Jarvis P.G., Temporal and spatial variation of soil CO₂ efflux in a Canadian boreal forest, *Soil Biol. Biochem.* 32 (2000), pp. 35–45
- Reichstein M, Rey A, Freibauer A et al. (2003) Modelling temporal and large-scale spatial variability of soil respiration from soil water availability, temperature and vegetation productivity indices. *Global Biogeochemical Cycles*, 17, 15/11–15/15.
- Reichstein M, Tenhunen J D., Roupsard O., Ourcival J., Rambal S., Miglietta F., Peressotti A., Pecchiari M., Tirone G., Valentini R. (2002) Severe drought effects on ecosystem CO₂ and H₂O fluxes at three Mediterranean evergreen sites: revision of current hypotheses? *Global Change Biology* 8 (10), 999–1017.
- Reichstein M, Tenhunen J. D, Roupsard O, Ourcival J.-M, Rambal S, Dore S, Valentini R (2002) Ecosystem respiration in two Mediterranean evergreen Holm Oak forests: drought effects and decomposition dynamics. *Functional Ecology* 16 (1) , 27–39.
- Riva-Martinez S., (1997). *Clasificación bioclimática de la Tierra. Itinera Geobot.* , 10.
- Rutter A.J. and A.J. Morton, A predictive model of rainfall interception in forests, III. Sensitivity of the model to stand parameters and meteorological variables, *Journal of Applied Ecology* 14 (1977), pp. 567–588.

- Schlentner RE, van Cleve K (1985) Relationships between soil CO₂ evolution from soil, substrate temperature, and substrate moisture in four mature forest types in interior Alaska. *Canadian Journal of Forest Research*, 15, 97–106.
- Schleser, G.H., 1982. The response of CO₂ evolution from soils to global temperature changes. *Zeitschrift für Naturforschung* 37a, pp. 287–291.
- Schlesinger, W. H. 1977. Carbon balance in terrestrial detritus. *Annual Review of Ecology and Systematics* 8:51-81.
- Sequi P. 2005. *Fondamenti di Chimica del Suolo*. Patron, Bologna
- Singh & Gupta, 1977. Plant decomposition and soil respiration in terrestrial ecosystem. *The Botanical review* vol 43 N° 4.
- Speicker, H., Mielikaäinen, K., Koehl, M. & Skovsgaard, J.P. 1996. *Growth Trends in European Forests*. Springer, Berlin.
- Susmel L., *Principi di Ecologia*, Cleup Editore, Padova, Italy (1990).
- Swift M.J., O.W. Heal and J.M. Anderson, *Decomposition in terrestrial ecosystems*, University of California Press, Berkeley.
- Swift M.J., O.W. Heal and J.M. Anderson, *Decomposition in terrestrial ecosystems*, University of California Press, Meir, P., Grace, J., Miranda, A. and Lloyd, J., 1996. Soil respiration in a rainforest in Amazonia and in cerrado in central Brazil. In: Gash, J.H.C., Nobre, C.A., Roberts, J.M. and Victoria, R.L., Editors, 1996. *Amazonian Deforestation and Climate*, Wiley, New York, pp. 319– 329. Berkeley.
- Tedeschi V. (2003) Variabilità temporale e spaziale della respirazione del suolo in una cronosequenza di *Quercus cerris* L. dell'Italia centrale. Tesi di Dottorato, Università della Tuscia (Viterbo).
- Trumbore S., 2006. Carbon respired by terrestrial ecosystem - recent progress and challenges. *Global Change Biology* 12, 141 - 153.
- Trumbore SE, Torn MS. 2004. Soils and the global carbon cycle. In: Holland EA, Eds., *Notes from Underground: Soils and Global Change*. NATO Advanced Study Institute.
- Trumbore, S. E., O. A. Chadwick, and R. Amundson. 1996. Rapid exchange between soil carbon and atmospheric CO₂ driven by temperature changes. *Science* 272:393–396
- Waring, R.H., Schlesinger, W.H., 1985. *Forest Ecosystem*. Academic Press, New York, 339 pp.
- Waring, R.H., Schlesinger, W.H., 1985. *Forest Ecosystem*. Academic Press, New York, 339 pp.
- Waring, R.H., Schlesinger, W.H., 1985. *Forest Ecosystem*. Academic Press, New York, 339 pp.
- Xu M, Qi Y (2001a) Soil-surface CO₂ efflux and its spatial and temporal variations in a young ponderosa pine plantation in northern California. *Global Change Biology*, 7, 667–677.
- Yanai, Currie, Goodale, 2003. Soil Carbon Dynamics after Forest Harvest: an Ecosystem Paradigm Reconsidered. *Ecosystems* (2003) 6: 197 - 212.

Zhao M., Running S.W. (2010). Drought-Induced Reduction in Global Terrestrial Net Primary Production from 2000 Through 2009. *Science* 329: 940-943