

INDICE

INTRODUZIONE.....	1
<i>La dendroclimatologia.....</i>	<i>7</i>
<i>La discriminazione isotopica del carbonio</i>	<i>10</i>
 MATERIALI E METODI.....	 12
<i>La Rete Dendroecologica Nazionale.....</i>	<i>12</i>
<i>Il campionamento.....</i>	<i>13</i>
<i>La costruzione delle serie individuali e l'interdatazione.....</i>	<i>15</i>
<i>Lo studio dendroclimatico.....</i>	<i>17</i>
<i>Lo studio di discriminazione isotopica del carbonio.....</i>	<i>19</i>
 RISULTATI.....	 23
 DISCUSSIONE.....	 43
 CONCLUSIONI.....	 47
 BIBLIOGRAFIA.....	 49
 RINGRAZIAMENTI.....	 52

INTRODUZIONE

Il presente progetto di ricerca nasce dall'evidenza che il cambiamento climatico in atto si riflette sulle dinamiche delle biocenosi forestali sotto forma di disturbo ecologico. Ad oggi infatti si registra, accanto all'aumento della temperatura, l'aumento della frequenza e durata dei periodi siccitosi. Negli ultimi decenni molte evidenze testimoniano un cambiamento climatico in atto in cui l'innalzamento delle temperature appare diffuso su molte aree del pianeta (Osborn & Briffa, 2006; IPCC, 2007). Tra le regioni europee, il bacino del Mediterraneo è tra quelle più sensibili agli effetti del riscaldamento globale (Schröter *et al.*, 2005).

A tal proposito in Italia recenti studi climatici hanno segnalato, a fianco dell'innalzamento termico, un aumento dell'intensità dei fenomeni piovosi (Brunetti *et al.*, 2006). Parallelamente, a partire dagli anni '70, sono aumentate la frequenza e la durata della eventi siccitosi nelle regioni mediterranee (McCabe & Palecki, 2006).

Tali turbative climatiche hanno determinato una varietà di impatti sugli ecosistemi, tra cui si ricorda l'ampliamento della stagione vegetativa, soprattutto in relazione all'anticipazione del risveglio primaverile (Schwartz *et al.*, 2006), o la migrazione ed il "rear edge bioclimatic shift" (Jump *et al.*, 2005). Questa occorrenza può determinare forti pressioni selettive sulle formazioni forestali, potendone determinare, in casi estremi la disgregazione. Un quadro pessimistico potrebbe addirittura prevedere la scomparsa di intere popolazioni negli areali meridionali o alle quote più basse, laddove la capacità di resilienza alla siccità delle specie forestali si rivelasse inadeguata alle mutate condizioni.

Le caratteristiche della vegetazione sul nostro pianeta sono determinate primariamente dal clima che, interagendo con la fisiologia delle specie e con la funzionalità degli ecosistemi, ne influenza la struttura e le dinamiche (p.e. Walter 1985; Woodward, 1987). A tal proposito, va segnalato che casi di un progressivo deperimento o di morie a macchia di leopardo costituiscono ormai dinamiche preoccupanti in diverse biocenosi forestali dell'arco alpino. Nel bacino del Mediterraneo, molti autori hanno riportato come, soprattutto per le cenosi forestali montane, si stia assistendo ad una

riduzione della produttività, e in taluni casi ad un arretramento del limite superiore della vegetazione (Piovesan *et al.*, 2008; Di Filippo *et al.*, 2010; Penuelas *et al.*, 2008).

Sebbene diversi studi, basati principalmente su osservazioni satellitari (NDVI), abbiano mostrato un aumento della produttività della vegetazione a livello globale nelle ultime due decadi (Nemani *et al.*, 2003; Xiao & Moody, 2005) e recenti analisi abbiano segnalato come la risposta di foreste gestite ai cambiamenti climatici sia generalmente positiva (Boisvenue and Running 2006), è stato altresì dimostrato come ondate di caldo anomale, come quella dell'estate 2003, possano deprimere considerevolmente la produttività primaria.

Dati sperimentali recenti sembrerebbero infatti indicare un declino della produttività sia a scala locale (Jump *et al.*, 2006) che nazionale (Piovesan & Schirone 2000) da mettere in relazione con l'incremento della frequenza e durata degli eventi siccitosi.

Sulla base di tali evidenze si capisce allora come la necessità di conservare le risorse forestali al fine di perpetuare nel tempo la loro utilizzazione, insieme al bisogno di tutelare la biodiversità vegetale ed animale legata all'ambiente forestale, abbia spinto ad aprire nuove strade nella gestione forestale. Tra i modelli proposti, quello della selvicoltura "naturalistica" (o meglio "a basso impatto ambientale") è considerato l'approccio più promettente proponendo di ottenere un ragionevole profitto minimizzando la modificazione delle foreste rispetto alle condizioni naturali (Di Filippo *et al.*, 2010).

Per far ciò occorre, ovviamente, tentare di comprendere le dinamiche delle foreste dove l'azione antropica è intervenuta poco o niente e per farlo è necessario trovare un modello da cui trarre questo genere di informazione.

Il modello ritenuto più adatto è quello dei cosiddetti "boschi vetusti", o "ad elevata naturalità". Le foreste vetuste rappresentano infatti il modello di naturalità su cui valutare la resistenza degli ecosistemi forestali ai cambiamenti climatici e la sostenibilità delle correnti pratiche selvicolturali (Frelich e Reich), che possiedono qualità assenti nei boschi gestiti, perché l'assenza o l'abbandono

delle attività selvicolturali per periodi molto lunghi fanno sì che i processi naturali possano riacquistare la dominanza nel guidare le dinamiche ecosistemiche.

Per questo motivo esse rappresentano il massimo esempio di naturalità nei nostri ambienti ed è evidente, quindi, l'importanza di studiarle approfonditamente e monitorarle sistematicamente non solo per comprendere i processi naturali che interessano gli ecosistemi forestali, ma anche perché esse costituiscono il controllo in base a cui valutare l'impatto delle attività umane sugli ecosistemi naturali e, nella fattispecie, la sostenibilità delle attuali tecniche selvicolturali.

Generalmente nella scelta degli indicatori descrittivi delle condizioni di naturalità dei popolamenti forestali si tiene conto di quattro parametri fondamentali: la distribuzione del numero di piante ad ettaro secondo le classe diametriche; la distribuzione percentuale di area basimetrica e volume secondo gruppi di classi dimensionali; gli attributi quali-quantitativi della necromassa; la struttura orizzontale del popolamento e cioè presenza di una struttura multi coorte, con piante di diverse classi di età contemporaneamente presenti sul soprassuolo e la presenza di un mosaico ben articolato.

Insieme alla verifica dei parametri precedentemente elencati la caratterizzazione di un popolamento vetusto necessita di un'analisi qualitativa della struttura, attraverso l'analisi dei quattro principali stadi di sviluppo delle foreste definiti da Frelich (2002):

- stadio di rinnovazione
- stadio di autodiradamento
- stadio di transizione demografica
- stadio multicoorte (stadio strutturale old-growth)

Per le foreste vetuste la loro struttura è ascrivibile agli ultimi due stadi anche se la transizione demografica è un processo di quei popolamenti definiti vetusti secondari (Piovesan *et al.*, 2008).

Al loro interno la biomassa, invece di essere asportata dall'ecosistema mediante le utilizzazioni forestali, viene restituita al suolo sotto forma di legno morto contribuendo alla conservazione della

fertilità stagionale, all'integrità dei cicli biogeochimici e del ciclo idrologico, permettendo così l'espressione di catene trofiche alquanto complesse.

Dal punto di vista della conservazione della natura, questi ecosistemi sono dotati di habitat assenti nei boschi gestiti, fondamentali alla conservazione di specie animali e vegetali rare e minacciate. Ad esempio, la presenza di alberi con cavità di varie dimensioni (alla base o lungo il fusto) e di alberi morti in piedi offre siti utili per il rifugio, la nutrizione e la riproduzione di varie specie di micro- e macromammiferi o di uccelli, come picchi e gufi; la necromassa a terra è fondamentale per roditori, anfibi e rettili; nel complesso, la presenza di alberi deperienti e morti costituisce un habitat per molte specie di insetti e funghi .

Le foreste vetuste rappresentano un modello unico a cui fare riferimento nel definire i fondamenti di una selvicoltura a basso impatto ambientale, che cerchi di disturbare al minimo gli ecosistemi naturali, conservandone quanto più possibile la biodiversità e la stabilità.

Allo stesso tempo, nei lavori di ricostituzione boschiva, le foreste vetuste potrebbero costituire quel punto di arrivo nel progettare e sviluppare adeguate tecniche per il ripristino della naturalità in popolamenti gestiti e modificati più o meno profondamente dall'uomo, nel tentativo di accelerare i lunghi tempi previsti dall'evoluzione naturale.

A tal proposito in Italia le foreste di faggio, grazie all'ampia distribuzione geografica (dal clima temperato-freddo a quello mediterraneo con siccità estiva), ed ai diversi tipi di gestione a cui sono sottoposte, rappresentano un caso di studio particolarmente interessante e promettente per approfondire il rapporto variazioni climatiche/risposte adattative delle foreste lungo un gradiente latitudinale e longitudinale.

Il faggio (*Fagus sylvatica* L.) ha infatti dimostrato notevole versatilità in questo tipo di studi grazie alla fedeltà con cui registra le variazioni del clima (Schirone et al., 2002), ma anche alla notevole longevità che gli consente di raggiungere i 400-500 anni (Piovesan et al., 2005b). In particolare tale specie viste le proprietà sopra elencate è da anni oggetto di studi di tipo dendroecologico ad opera di diversi autori (Piovesan et al. 2008, Di Filippo et al 2010) .

La dendroecologia, ormai da diversi anni, si è affermata come scienza fondamentale nello studio delle dinamiche ambientali passate di ecosistemi forestali. Tale branca della dendrocronologia permette, attraverso lo studio delle ampiezze annuali di crescita, di raccontare la storia dell'albero e della foresta in cui esso vive.

In particolare l'informazione anulare contenuta nelle serie dendrocronologiche viene impiegata in studi ecologici in diverse modalità, come ad esempio la datazione di eventi specifici, testimoniati da anomalie o caratteristiche particolari presenti nella struttura dell'anello; nello studio del regime di disturbo degli ecosistemi forestali associato a variazioni nei tassi di crescita; nella ricostruzione del clima o del regime idrologico mediante la variabilità delle ampiezze anulari; nello studio di dinamiche di popolazioni animali le cui fluttuazioni sono associate al clima (Fritts e Swetnam, 1989).

Recentemente è stato proposto un nuovo metodo, basato su un approccio dendroecologico, per la classificazione fitoclimatica delle faggete italiane basato sui fattori climatici limitanti la crescita radiale degli alberi. Questa classificazione attuata mediante l'Analisi Gerarchica Agglomerativa (HCA dall'inglese Hierarchical Cluster Analysis) e l'Analisi delle Componenti Principali (PCA dall'inglese Principal Component Analysis) ha finora consentito di organizzare parte delle faggete italiane in distinte unità fitoclimatiche caratterizzate da una diversa sensitività alle variazioni climatiche (Piovesan *et al.*, 2005; Di Filippo *et al.*, 2006). I gruppi identificati sulla base dell'omogeneità del segnale possono quindi essere utilizzati per dividere il territorio studiato in aree fitoclimaticamente omogenee (Feliksik e Wilczynski, 2004; Piovesan *et al.*, 2005a) e studiarne i relativi rapporti spaziali ed altitudinali (Fig.1).

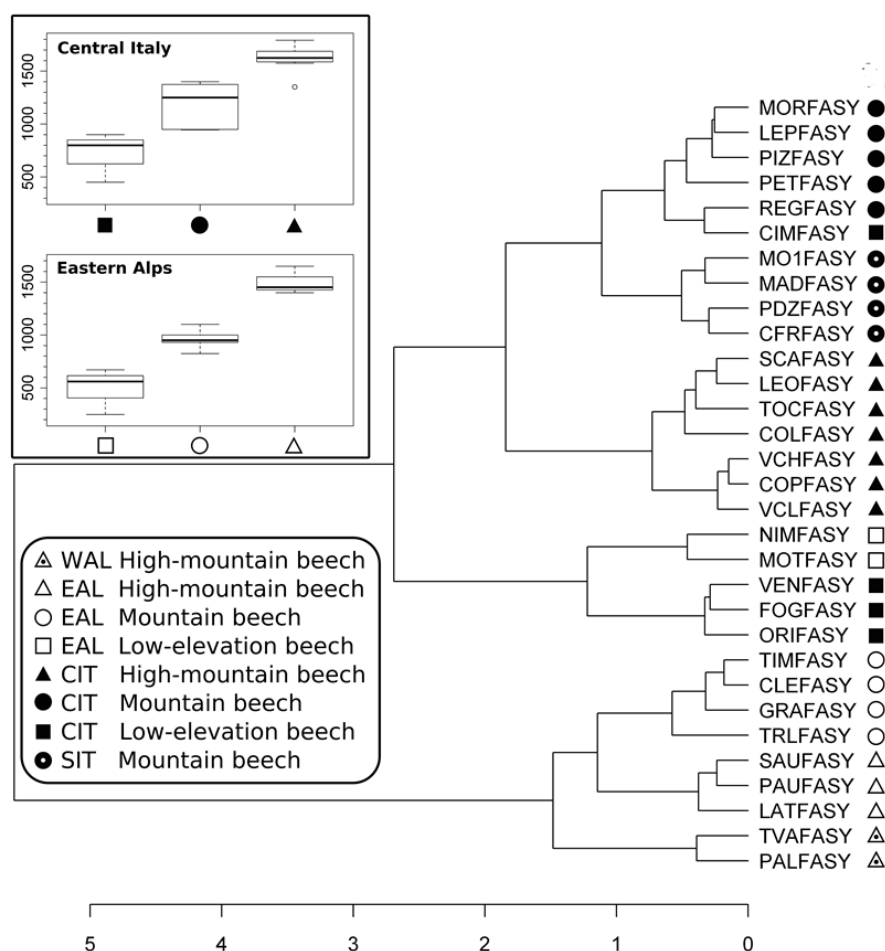


Figura 1. Dendrogramma dell'Analisi Gerarchica Agglomerativa (HCA)

Questo inquadramento ha costituito la base di partenza del progetto di ricerca da me sviluppato ai fini dello studio dendroecologico dell'impatto dei cambiamenti climatici sulla crescita e la produttività delle faggete presenti sul territorio nazionale.

Lo scopo del presente studio è stato dunque quello di comprendere, attraverso l'applicazione di metodologie dendroecologiche, gli effetti del cambiamento climatico sulla crescita e la produttività del faggio di breve, medio e lungo periodo tenendo conto della localizzazione geografica e del tipo di gestione applicata.

In particolare le analisi condotte durante il triennio di studi si sono andate ad inserire nel contesto della Rete Dendroecologica Nazionale (Schirone *et al.*, 2002), sviluppata dal Laboratorio di Dendroecologia del Dipartimento di scienze e Tecnologie per l'Agricoltura, le Foreste, la Natura e

l'Energia (DAFNE) dell'Università degli Studi della Tuscia. Tale rete è costituita dalla specie faggio e, soltanto in misura minore, da altri taxa.

Inoltre al fine di definire le risposte in termini di efficienza di uso idrico (WUE), di alcune delle faggete presenti all'interno della Rete, si è attuata l'analisi della discriminazione isotopica del carbonio ($\Delta^{13}\text{C}$).

La ben comprovata relazione inversa esistente tra WUE e $\Delta^{13}\text{C}$ (Brugnoli e Farquhar, 2000) fa di quest'ultimo parametro un importante indicatore fisiologico di stress idrico per lo studio delle dinamiche di tali faggete, sempre più condizionate dall'aumentata aridità climatica registrata negli ultimi anni.

La dendroclimatologia

Una branca della dendroecologia è la dendroclimatologia, scienza che utilizza la variabilità contenuta nelle serie dendrocronologiche per studiare il clima e le sue fluttuazioni temporali.

In particolare l'albero è uno strumento capace di registrare le variazioni del clima attraverso la formazione di anelli più o meno grandi. L'ampiezza (R) realizzata da un anello legnoso nell'anno t è considerata, in forma semplificata, come combinazione lineare degli effetti di diverse componenti (Cook e Kairiukstis, 1990):

$$R_t = G_t + C_t + aD1_t + aD2_t + E_t$$

dove G rappresenta il trend di crescita legato all'aumento dell'età dell'albero e delle dimensioni del fusto; C il clima con la sua variabilità di breve, medio e lungo periodo; D1 disturbi endogeni o localizzati, interessanti uno o pochi alberi; D2 disturbi esogeni o diffusi, estesi a gran parte del popolamento; infine E la variabilità interannuale non spiegata dai precedenti fattori.

Le a associate a D1 e D2 sono indicatori binari della presenza ($a = 1$) o assenza ($a = 0$) nell'anello formato nell'anno t delle componenti a cui sono riferite.

Poiché il clima costituisce uno dei fattori più importanti nell'influenzare la crescita dell'albero, l'estrazione del segnale climatico (C), contenuto all'interno delle serie dendrocronologiche, può fornire importanti informazioni per comprendere quali siano i fattori climatici maggiormente responsabili della crescita.

In questo studio sono stati analizzati la variabilità della crescita anulare degli alberi ed il segnale climatico che ne è responsabile come metodo alternativo per lo studio fitoclimatico della vegetazione forestale.

In particolare, si è voluto identificare le principali modalità di crescita arborea che accomunano popolamenti posti distanti geograficamente ed a quote diverse, per metterle in relazione al segnale climatico che le condiziona; così popolamenti forestali distinti sono stati raggruppati in zone e fasce dendroclimatiche, ossia unità fitoclimatiche rilevate in base al segnale climatico che domina la crescita arborea.

I gruppi identificati sulla base dell'omogeneità del segnale possono quindi essere utilizzati per dividere il territorio studiato in aree fitoclimaticamente omogenee (Feliksik e Wilczynski, 2004; Piovesan *et al.*, 2005a) e studiarne i relativi rapporti spaziali ed altitudinali.

Nella metodologia convenzionale le osservazioni vegetazionali rimangono separate da quelle climatiche ed è il ricercatore che mette in relazione le variazioni osservate nella vegetazione a determinati indici bioclimatici (termici, pluviometrici, di evapotraspirazione, di continentalità/oceanicità). Nell'approccio dendroclimatico, altresì, è l'albero che registra direttamente il clima nella variabilità della propria serie anulare ed il ricercatore non deve far altro che affiancare per confronto le serie climatiche facendo emergere i fattori climatici responsabili della variabilità stessa.

Il rapporto clima-accrescimento diventa quindi il nodo centrale di questa classificazione fitoclimatica in cui l'albero costituisce, al tempo stesso, l'espressione climatica della vegetazione e lo strumento di misura del clima.

Le foreste vetuste rappresentano un caso di studio particolarmente promettente per studiare le dinamiche ecologiche ed analizzare l'effetto dei cambiamenti climatici di lungo periodo sugli ecosistemi forestali. Tali sistemi esprimono i maggiori livelli di naturalità nel nostro territorio, dettati dall'assenza o l'abbandono delle utilizzazioni forestali nel tempo e che hanno permesso ai processi naturali, altrimenti influenzati dalla selvicoltura, di riacquistare la dominanza nel guidarne le dinamiche (Di Filippo, 2005).

Rispetto ai boschi gestiti, infatti, in esse possono realizzarsi i livelli di longevità massima delle specie arboree (Di Filippo *et al.*, 2007), utili ai fini dendroecologici per lo studio delle caratteristiche ambientali passate.

Va segnalato che, in generale, è ancora scarsa la conoscenza del ciclo del carbonio nelle foreste vetuste mediterranee (Piovesan *et al.*, 2005) e rimane fondamentale comprenderne la loro risposta di fronte ai cambiamenti climatici in atto.

Poiché questi ecosistemi possono costituire un riferimento sul quale valutare la sostenibilità della gestione forestale (Frelich e Reich, 2002) è di fondamentale importanza studiare approfonditamente la loro organizzazione, descrivendo gli attributi strutturali che le caratterizzano, lo stock di carbonio nelle varie componenti dell'ecosistema e la funzionalità ecofisiologica.

La discriminazione isotopica del carbonio

L'analisi degli isotopi stabili del carbonio fornisce la metodologia più innovativa, versatile e non invasiva per lo studio dell'efficienza di uso idrico (WUE) in ambienti naturali (Lauteri *et al.* 1997). Da un paio di decenni gli studi isotopici sul carbonio forniscono informazioni basilari sul processo fotosintetico e sulla sua efficienza (Farquhar *et al.*, 1989).

L'isotopo stabile pesante ^{13}C è discriminato durante il processo di fotosintesi (Farquhar *et al.*, 1989). Questo determina un generale alleggerimento del carbonio organico nelle piante rispetto al carbonio atmosferico, fenomeno definito discriminazione isotopica del carbonio ($\Delta^{13}\text{C}$).

Le piante terrestri C3 discriminano durante il processo fotosintetico nei confronti della CO₂ atmosferica avente ¹³C rispetto alla CO₂ avente ¹²C in quanto il ¹³C ha una più bassa velocità di diffusione attraverso gli stomi ed una minor velocità di reazione con l'enzima fotosintetico Rubisco (1.5- ribulosio-bisfosfato carbossilasi).

Tuttavia il grado di discriminazione isotopica è fortemente variabile in funzione di tutti quei fattori genetici, selvicolturali ed ambientali capaci di influenzare il punto operativo fotosintetico, ovvero il rapporto tra le pressioni parziali intercellulare ed atmosferica di CO₂ (p_i/p_a; Farquhar *et al.*, 1982).

L'analisi della discriminazione isotopica del carbonio consente di studiare le dinamiche di WUE su scale temporali variabili essendo il segnale isotopico registrato sia nei metaboliti che nel carbonio strutturale dei vari organi della pianta, garantendo accesso ad un'informazione fisiologica sia di breve che di lungo periodo (Brugnoli *et al.*, 1988; Lauteri *et al.*, 1993).

La composizione isotopica del carbonio strutturale di una foglia ad esempio può essere in relazione con le condizioni di alcune settimane o mesi precedenti il campionamento (Brugnoli *et al.*, 1988; Scartazza *et al.*, 2004).

L'analisi degli anelli legnosi diviene invece fondamentale per la raccolta di informazioni di lungo periodo (dalla stagione fino alle ricostruzioni del paleoclima).

E' stato chiaramente dimostrato in prove comparative che genotipi di *Castanea sativa* Mill. arido-adattati mostrano generalmente livelli di WUE più bassi relativamente a genotipi provenienti da pedo-climi umidi (Lauteri *et al.*, 1997; Lauteri *et al.*, 2004). Nei fatti, le piante arido-adattate mostrano la capacità di esplorare gli strati profondi del suolo, possiedono foglie e chiome meno esposte alla domanda evapotraspirativa atmosferica e, a parità di condizioni, sono meno suscettibili a stress da siccità, mostrando bassi livelli di WUE.

Ulteriori studi hanno confermato nel carattere "efficienza d'uso idrico" (WUE) un importante indicatore della capacità di adattamento a condizioni di siccità (Read e Farquhar, 1991; Guehl *et al.*, 1995). Inoltre studi effettuati in popolamenti di *Pinus sylvestris* L. e *Pinus uncinata* Mill. hanno

rilevato come l'interpretazione delle relazioni tra incremento di area basale (BAI) e discriminazione isotopica del carbonio ($\Delta^{13}\text{C}$) sia un ottimo strumento per la definizione dei dinamismi di acclimataimento ed adattamento delle popolazioni forestali, in relazione sia al cambiamento climatico che al tipo di gestione applicato (Gagen *et al.*, 2006).

MATERIALI E METODI

La Rete Dendroecologica Nazionale

Il presente studio è fondato su una rete di studio composta da popolamenti forestali contenenti faggio (*Fagus sylvatica* L.), allo stato puro o associato ad altre specie arboree (ma comunque dominante), che si estende dalle Alpi a Nord fino alla Sicilia Settentrionale a Sud, in un'area compresa tra i 37° 52' ed i 46° 34' N di latitudine e tra i 9° 19' ed i 16° 13' E di longitudine.

In ogni area interessata dai rilevamenti si è cercato di campionare popolamenti posti a quote diverse in modo da evidenziare la variazione di crescita della specie con l'altitudine.

I dati utilizzati sono il risultato di quasi trenta anni di studi dendrocronologici in Italia ad opera di diversi autori (Tabella 1): la maggior parte di essi fanno parte della Banca Dati del Laboratorio di Dendrologia (www.unitus.it/dendro) dell'Università degli Studi della Tuscia, mentre nove dei popolamenti riportati sono stati studiati da Franco Biondi della University of Nevada (Biondi, 1992) ed uno da Roberta Castorina dell'Università di Catania (Castorina, 2005).

L'area maggiormente campionata è localizzata in Italia Centrale (Lazio - Abruzzo), la quale rappresenta il nucleo originario della Rete e su cui sono stati effettuate in passato le prime indagini dendroclimatiche (Schirone et al., 2002).

I popolamenti indagati sono stati 34, distribuiti principalmente tra l'Appennino centrale e le Alpi orientali in modo da poter individuare le diverse risposte di crescita in funzione della bioregione di appartenenza (Fig. 2). I dati raccolti durante il triennio del Corso di Dottorato, per alcuni dei siti studiati, hanno contribuito ad intensificare ed aggiornare la banca dati preesistente (Oriolo Romano, Monte Venere, Valle Cervara alta, Monte Terminillo; , Monte Cimino, Fonte Regna, Coppo del Principe, Colle dei Galli, Pian della Gatta, Gracco, Lateis, Trelli), in modo da garantire una migliore copertura spaziale ed un più ampio spettro temporale.

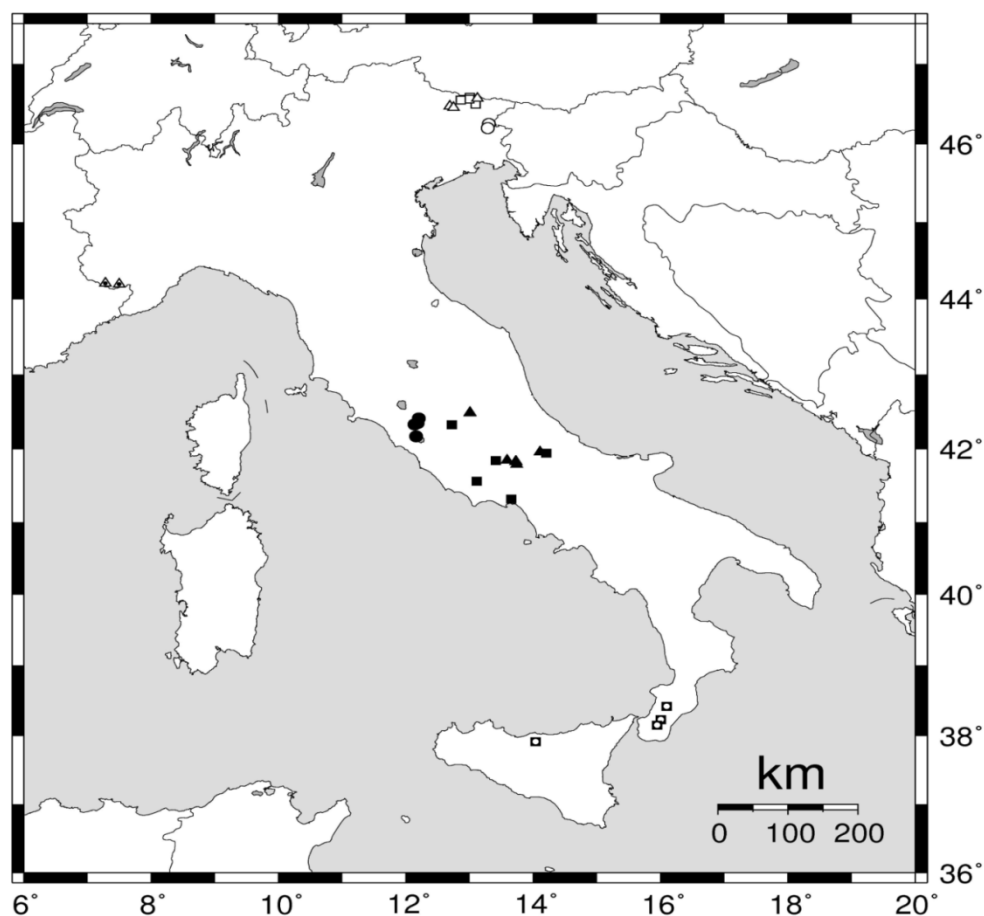


Figura 2. Localizzazione dei siti oggetto di studio.

Il campionamento

Il campionamento ha prediletto, per gli studi passati così come per il seguente studio, quelle foreste in cui fossero presenti alberi sufficientemente vecchi ed in cui fosse assente o minimo il disturbo legato all'attività umana, cercando di reperire sul territorio nazionale il maggior numero di foreste in cui le comunità arboree hanno raggiunto gli ultimi stadi di sviluppo strutturale oltre che essere caratterizzate da individui in grado di raggiungere i limiti di longevità della specie (e quindi gli alberi di età maggiore). Tale criterio ha permesso lo studio di foreste in cui il disturbo antropico è stato assente per un periodo di tempo sufficiente lungo utile a ristabilire in esse il predominio delle dinamiche naturali (Di Filippo, 2005).

Tabella 1. Caratteristiche stazionali e strutturali dei popolamenti presenti all'interno della Rete Dendroecologica Nazionale.

REGIONE	FASCIA	SITO	CATRAS ID	CODICE SITO	LATITUDINE	LONGITUDINE	QUOTA	PENDENZA	ALBERI	CAROTE	DBH	H
CAP	L*	Barbarano Romano	8068000F	BAR	42.2503	12.0675	250	20-70	12	12	30-50	20
SAP	L	Cinquefrondi	8090000F	CFR	38.41800	16.09400	550 (500-600)	20-60	12	12	38-83	35
CAP	M	Monte Cimino	9030000F	CIM	42.41810	12.23500	950	0-35	70	101	35-100	41
EAL	M	Cleulis	8020000F	CLE	46.55835	13.00063	1050 (975-1125)	40-70	23	23	35-70	24
CAP	H	Collelongo	8011000F	COL	41.84944	13.58806	1575	10-30	21	21	-	-
CAP	H	Coppo del Principe	8010000F	COP	41.78833	13.73806	1625	5-55	20	20	-	-
CAP	L	Monte Fogliano	8028000F	FOG	42.32850	12.14400	750	5-30	20	26	45-95	35
EAL	H*	Colle dei Galli	8009000F	GAL	46.45890	13.08860	1100	10-50	23	23	18-60	30
EAL	M	Gracco	8016000F	GRA	46.55140	12.85190	825 (750-900)	70-90	20	20	42-72	21
EAL	H	Lateis	8015000F	LAT	46.45944	12.74889	1450 (1370-1530)	75-110	24	28	33-70	28
CAP	H	Vallonina	8041000F	LEO	42.50000	13.00000	1650	5-60	20	20	42-29	32
CAP	M	Monti Lepini	8007000F	LEP	41.60470	13.08390	1250	20-35	21	21	44-65	30
SAP	M	Madonie	8094000F	MAD	37.90639	14.03972	1775 (1750-1800)	30-70	15	15	30-66	-
SAP	M	Montalto 1600	8092000F	MO1	38.14834	15.94750	1600	20-40	22	22	-	-
CAP	M	Morino	9023000F	MOR	41.86390	13.45810	1250	0-50	20	25	40-70	37
EAL	L	La Motta	8024000F	MOT	46.18860	13.31530	250	10-40	19	19	39-65	-
EAL	L	Nimis	8012002F	NIM	46.20060	13.27690	560	45	12	12	34-65	27
CAP	L	Oriolo Romano	8067000F	ORI	42.15830	12.13920	450 (400-500)	5-45	26	26	45-90	35
WAL	H	Bandita di Palanfrè	8031000F	PAL	44.19340	7.49420	1635	20-50	24	24	39-90	25
EAL	H	Paularo	8018000F	PAU	46.52970	13.11720	1400 (1275-1500)	70-90	20	20	52-100	27
EAL	M*	Pian della Gatta	8002000F	GAT	46.45890	13.08860	850	10-50	23	23	20-65	32
SAP	M	Piani di Zervò	8091000F	PDZ	38.22716	16.00212	1200	0-20	21	21	45-80	36
EAL	L	Pechinie	8022000F	PEC	46.28070	13.20270	670	10-30	14	15	36-62	-
CAP	M*	Monte Petrella	8001001F	PET	41.21780	13.56810	1375	0-30	22	23	41-73	27
CAP	M	Monti Pizi	9004000F	PIZ	41.92140	14.23720	1400 (1350-1450)	0-60	32	32	40-83	30
CAP	M	Fonte Regna	8141501F	REG	42.33830	12.66970	1050	5-40	25	45	40-65	32
CAP	M*	Rosello	8013001F	ROS	41.9008	14.3497	1000	10-50	10	10	30-61	28
EAL	H	Sauris	8025000F	SAU	46.47240	12.68430	1650	40-90	19	20	-	14
CAP	H	Scangive	8041001F	SCA	42.50000	13.00000	1685 (1550-1820)	5-60	21	21	41-83	32
EAL	H	Timau	8017001F	TIM	46.58170	13.00500	1100 (825-1500)	70-90	21	27	40-95	25
CAP	H	Tocchito	8006000F	TOC	41.98420	14.13810	1600	5-30	21	21	41-71	24
EAL	M	Tre Confini	8019000F	TRE	46.50390	13.58310	1100	5-30	12	12	35-55	-
EAL	M	Trelli	8014000F	TRL	46.49972	13.09778	950	20-70	24	24	-	-
WAL	H	Terme di Valdieri	8030000F	TVA	44.20530	7.27550	1605	40-90	25	25	43-94	-
CAP	H	Valle Cervara alta	8012001F	VCH	41.86900	13.62300	1725 (1600-1850)	5-55	32	37	55-100	32
CAP	H	Valle Cervara bassa	8012002F	VCL	41.86900	13.62300	1350 (1200-1500)	0-55	21	21	55-102	32
CAP	L	Monte Venere	8029000F	VEN	42.34340	12.18510	800	5-35	36	38	30-85	32

*: Siti in cui l'appartenenza a ciascuna fascia fitoclimatica è stata attribuita sulla base della correlazione con le composite (cronologie più brevi del periodo 1925-2000)

Tranne rari esempi di naturalità, però, nella maggior parte dei casi le faggete italiane presenti nella rete sono state alterate dalla mano dell'uomo e, di conseguenza, spesso ci si è trovati a campionare anche boschi relativamente giovani o cedui invecchiati; in queste situazioni si è proceduto al campionamento, purché gli ecosistemi presentassero un aspetto forestale non eccessivamente degradato e gli alberi avessero un'età tale da poter sviluppare cronologie anulari utili per le elaborazioni statistiche.

Ai fini delle analisi successive I popolamenti sono stati divisi in: faggete vetuste non gestite e gestite (tagli assenti o utilizzati prima dei '60; ultimi tagli nei 60-70; ultimi tagli negli 80-90). Per meglio comprendere le risposte adattative in funzione del tipo di gestione adottato le faggete sono state suddivise in tre diverse classi di gestione: faggete vetuste (*old-growth*) (tagli assenti o utilizzati

prima degli anni '60); faggete non gestite (*unmanaged*), in cui le ultime utilizzazioni risalgono agli anni '60-'70; faggete gestite (*managed*), ultime utilizzazioni effettuate negli anni '80-'90.

Per i siti campionati durante il triennio di studi, si è proceduto a carotare per mezzo della trivella di Pressler 20-24 individui scelti in quanto miglior compromesso tra età ed integrità del fusto: riguardo all'età, oltre all'informazione portata dalle dimensioni dell'albero, sono stati presi in considerazione anche altri caratteri legati alla senescenza, come lo stato della chioma e dei rami, oppure le caratteristiche della corteccia.

Le carote sono state estratte da alberi dominanti o codominanti, in modo da minimizzare la presenza di anelli formati durante le fasi di aduggiamento, contenenti scarsa informazione climatica (Piutti e Cescatti, 1997); inoltre, gli alberi campionati ricadevano tutti sufficientemente lontano dal limite del bosco per evitare il disturbo dovuto all'effetto margine.

La costruzione delle serie individuali e l'interdatazione

Le carote prelevate sono state portate in laboratorio dove sono state montate su di un listello di legno ponendo la loro fibratura perpendicolare al piano orizzontale e scarificate per mezzo di un bisturi lungo la sezione trasversale in modo da metterne in evidenza gli anelli legnosi; l'evidenziazione è stata poi migliorata grazie all'uso di acqua e gesso.

Le ampiezze anulari sono state misurate con precisione del centesimo di millimetro mediante uno stereomicroscopio ed il sistema CCTRMD (Computer Controlled Tree-Ring Measurement Device) di Aniol (1987) interfacciato ad un computer, il quale salva ogni lettura effettuata in un file per mezzo del programma CATRAS (Aniol, 1983). La lettura di un raggio viene definita "serie o curva elementare" e corrisponde ad una serie temporale di ampiezze anulari.

Per le piante in cui sono stati prelevati più raggi di una stessa sezione le letture vengono mediate e la cronologia che ne scaturisce viene detta "serie individuale", in quanto rappresenta la crescita radiale media di quell'albero.

Ogni lettura “fluttuante”, ossia ancora priva di una precisa collocazione temporale, è stata sottoposta ad un confronto con le altre cronologie elementari ed individuali di quel popolamento in modo da verificare la correttezza della misurazione effettuata o la presenza di eventuali errori e di anelli mancanti.

Questo confronto, detto “sincronizzazione”, si effettua in maniera sia visuale che statistica e consente di datare in modo preciso ogni lettura.

La sincronizzazione visuale consiste nel confrontare l’andamento generale di due curve e nel verificare la concordanza dei principali minimi e massimi assoluti insieme all’assenza di opposizioni di fase.

La sincronizzazione statistica, invece, si basa sui valori forniti dal coefficiente di coincidenza (G) e del t di Student relativi al confronto fra due o più cronologie calcolati da CATRAS.

In pratica viene confrontata la concordanza percentuale nel segno, positivo o negativo, dell’incremento annuale.

Quando due cronologie a confronto hanno un andamento parallelo per molti anni, si può assumere che i fattori che influenzano la crescita sono stati simili in entrambi i casi.

Il valore di t dipende, oltre che dalla correlazione r tra le serie dendrocronologiche, anche dalla loro estensione temporale: tanto più le serie sono lunghe, tanto maggiore è la probabilità di ottenere buoni valori.

Le procedure di sincronizzazione sono alla base dell’interdatazione, che costituisce uno dei punti chiave della scienza dendrocronologica e per mezzo di cui è possibile datare con sicurezza le cronologie fluttuanti (Stokes e Smiley, 1996).

Una volta datate tutte le serie elementari, è stato utilizzato il programma COFECHA (Holmes, 1983) per verificare ulteriormente la qualità delle datazioni effettuate e per avere una prima informazione sul segnale comune espresso dalle nostre serie (Grissino-Mayer, 2001).

Lo studio dendroclimatico

Per l'analisi di alta frequenza le serie elementari datate sono state successivamente standardizzate mediante il programma ARSTAN (Cook, 1985) programma che permette di rimuovere la variabilità di lungo periodo legata al trend biologico dalle serie elementari, dovuto all'età ed alle dimensioni della pianta.

Ciascuna serie è stata standardizzata rimuovendo una spline cubica con periodo di 50 anni. Questo metodo si adatta meglio di funzioni matematiche classiche, come la retta o l'esponenziale negativa, a rappresentare trend di crescita di piante tolleranti l'ombra (Piovesan et al., 2008).

Si è ottenuta così una serie standardizzata di ampiezze anulari indicizzate i cui valori indicano la differenza rispetto al valore del trend biologico stimato in un determinato anno.

La media delle serie individuali standardizzate di incremento di area basimetrica (BAI) di ciascun popolamento ha generato una cronologia stazionale standardizzata.

Successivamente per studiare le variazioni clima-accrescimento a livello nazionale, le cronologie stazionali standardizzate sono state a loro volta mediate a generare una cronologia standardizzata composita per ciascuna fascia climatica di appartenenza, basale, montana ed altimontana.

La qualità delle cronologie standardizzate così prodotte è stata valutata per mezzo dell' EPS (Expressed Population Signal), considerandole valide solo dal periodo in cui l'EPS superasse la soglia convenzionale di 0,85.

Alle cronologie standardizzate e validate, derivanti dalla media delle serie standardizzate, è stato poi rimosso il rumore dovuto all'autocorrelazione, con l'applicazione di un modello ARMA ($p, q = 0$) che ha individuato così, per ogni cronologia, l'ordine p di auto-regressione in base al criterio di Akaike (Akaike Information Criterion, AIC).

La cronologie stazionali standardizzate sono state a questo punto considerate rappresentative dell'influenza del clima sulle variazioni di crescita di alta frequenza dei popolamenti indagati.

Si è proceduto dunque con la calibrazione delle cronologie stazionali grezze, effettuata grazie al programma Dendroclim2002 (Biondi e Waikul, 2002), che consiste nel calcolo di funzioni di

correlazione con il metodo statistico bootstrap tra la cronologia stazionale standardizzata e una matrice di variabili climatiche, dopo che da esse siano state estratte le componenti principali.

I dati climatici utilizzati sono stati i valori di precipitazioni mensili e di temperature medie mensili, ordinati a partire dal mese di giugno dell'anno precedente la formazione dell'anello fino al settembre dell'anno in corso: in questo modo si includono gli effetti del clima sui meccanismi di induzione florale (Piovesan e Adams, 2001) e l'apporto completo delle precipitazioni autunnali e invernali.

I dati climatici utilizzati (Precipitazioni, Temperature mensili, PDSI Z index) sono stati presi da elaborati presenti all'interno del progetto CLIMAGRI (Maugeri et al., 2002) dove sono organizzati in una griglia con celle di $1^\circ \times 1^\circ$.

Successivamente al fine di studiare ed interpretare le variazioni di crescita nel lungo periodo, le cronologie stazionali grezze di BAI validate, sono state filtrate con *splines* cubiche con frequenza di 50 anni (filtri passa basso) per studiare le variazioni di produttività del soprassuolo di medio-bassa frequenza. Con tale procedimento si sono generate delle *spline* per ciascuno dei 34 siti indagati.

Lo stesso filtraggio è stato operato su fattori climatici, individuali o accorpati, scelti in base alle FC, per poter confrontare la presenza di concordanza tra variabilità di bassa frequenza tra produttività e clima. Passo successivo è stato quello di generare una *spline* composta di tutti i popolamenti gestiti, non gestiti e vetusti suddivisi sempre in funzione della fascia fitoclimatica di appartenenza e che per ciascuno dei bioclimi vegetazionali studiati, alpino e appenninico, ha generato 3 diverse classi di appartenenza: old-growth, non utilizzate da più di 50 anni; unmanaged, in cui le ultime utilizzazioni risalgono agli anni '60-'70; managed, ultime utilizzazioni effettuate negli anni '80-90'.

Su tali *spline* si sono inoltre identificati i diversi punti di culminazione delle curve al fine di interpretare le diverse risposte fisiologiche di tali popolamenti in relazione con il clima ed il tipo di gestione adottata. Infine per quantificare le diverse risposte in termini di tasso di crescita tra l'ultima fase umida registrata (1960-1970) e la fase arida attuale (1990-2000), si è calcolata la variazione percentuale di BAI (Mean BAI Variation, MBV) di ciascun popolazione in esame,

come appunto differenza percentuale di incremento di area basimetrica tra i due decenni presi in esame.

Lo studio di discriminazione isotopica del carbonio

Lo studio ha interessato 8 siti, quattro localizzati a quote diverse nell'Appennino centrale: Oriolo Romano (ORI), Monte Cimino (CIM), Fonte Regna (SAB), Coppo del Principe (COP); e quattro appartenenti all'arco alpino (Alpi Carniche): Nimis (NIM), Trelli (TRL), Colle dei Galli (GAL); Lateis (LAT) (Tabella 2). La scelta di tali siti ha permesso di coprire tutte le fasce fitoclimatiche del territorio Nazionale, da quelle basali a quelle altimontane, garantendo un'ampia gamma di scenari adattativi della specie faggio. In particolare i popolamenti esaminati rappresentano esempi di Faggete vetuste, primarie e secondarie (Piovesan et al. 2005), dove da tempo sono in atto dinamiche evolutive naturali in cui l'intervento antropico è assente o molto blando, con l'eccezione della Faggeta gestita del Colle dei Galli. La fase preliminare dello studio, in collaborazione con il dipartimento DAFNE dell'Università degli studi della Tuscia, è consistita nella realizzazione di aree di saggio circolari con 20 m di raggio e distanza media l'una dall'altra di 100 m. Le aree sono state posizionate, tramite criteri sistematici, in modo tale da coprire la gran parte dei popolamenti indagati.

Tabella 2. Attributi geografici delle foreste vetuste e gestite (GAL) campionate.

<i>Siti</i>	<i>Codice</i>	<i>Latitudine</i> (°)	<i>Longitudine</i> (°)	<i>Quota</i> (m.s.l.m)	<i>Pendenza</i> (%)	<i>Esposizione</i>	<i>Sup_tot*</i> (ha)
<i>Siti Alpini</i>							
Lateis	LAT	46.459	12.7489	1450 (1370-1530)	75 -110	S	20
Trelli	TRL	46.500	13.0978	950 (850-1050)	60 -70	SE	7
Nimis	NIM	46.249	13.297	560	45	SE	/
Colle dei Galli	GAL	46.4225	13.0734	1120 (1000-1250)	13 -15	NW	21
<i>Siti Appenninici</i>							
Monte Cimino	CIM	42.4083	12.2033	1000 (950-1050)	0 - 35	W	62
Coppo del Principe	COP	41.7883	13.7381	1625 (1500-1750)	20 - 60	NE	45
Fonte Regna	REG	42.3247	12.7194	954 (880-1010)	50 - 60	W	5
Oriolo Romano	ORI	42.1737	12.1613	450 (400-500)	0 - 35	NE	30

*Area corretta per la pendenza

Per il solo popolamento sabino di Fonte Regna, date le ridotte dimensioni geografiche del sito, è stato realizzato un transetto di 30 x 180 m. Per la caratterizzazione strutturale dei siti e lo studio dei diversi attributi (piante per ha, volume, area basimetrica, distribuzione diametrica), in ognuna delle aree di saggio sono stati misurati: il diametro a petto d'uomo (DBH, 1.3 m dal suolo) di tutte le piante con DBH > 2.5 cm; l'altezza di un rappresentativo numero di piante di ciascuna classe diametrica, per la costruzione della curva ipsometrica; le coordinate polari di ciascun albero (distanza lineare rispetto al centro dell'area di saggio e angolo azimutale rispetto al Nord).

Infine, dove possibile per ciascuna classe sociale (Dominante, Co-dominante; Intermedia, Sottoposta), sono state prelevate mediante succhiello di Pressler un rappresentativo numero di carote incrementali (minimo 20 per sito). Per il solo popolamento del Nimis i dati sopra elencati erano già disponibili ma riferiti all'anno 2003.

L'analisi della discriminazione isotopica del carbonio ($\Delta^{13}C$), così come quella dendrocronologia, è stata effettuata su anelli di carote legnose prelevate da siti analizzati nel progetto. Tale analisi ha permesso di comparare le risposte fisiologiche riferibili all'efficienza d'uso idrico (WUE), su materiale variabile nel tempo (diversi anelli legnosi) e nello spazio (individui e siti distinti).

Misure di rapporti isotopici ($^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$) sono state effettuate da sei individui per sito (scelti come più affini alle dinamiche di crescita media), prendendo in considerazione la decade 1999-2008 per 7 dei siti in esame ed il periodo 1994-2003 per il popolamento alpino del Nimis (in cui non si è potuta aggiornare la cronologia).

Essendo le cronologie di incremento di area basimetrica (BAI) presenti nel database di Nimis datate al 2003, ed al fine di poter includere nell'analisi geografica tutte le fasce fitoclimatiche alpine, si è deciso di indagare le relazioni su due diverse scale temporali: decennio e lustro.

Allo stesso modo sono stati isolati e polverizzati gli anelli del periodo 1960-1970 (fase umida) dei soli siti, LAT, COP, REG, al fine di poter effettuare un'analisi storica dei livelli di discriminazione isotopica del carbonio e, di conseguenza, definire l'andamento dei livelli di WUE nel tempo.

La scelta è ricaduta su tali siti in quanto si è voluto creare una sorta di transetto altimetrico uniformato dal punto di vista del profilo litologico in quanto tutti e tre i popolamenti presentano substrati calcarei.

Gli anelli di accrescimento di ciascuna cronologia sono stati polverizzati adottando una tecnica di precisione messa a punto nel corso di questo progetto di ricerca. Tale tecnica ha previsto l'utilizzo di un trapano di precisione ad elevata velocità di rotazione (DREMEL), di un magnificatore ottico, di una morsa da tavolo, di contenitori di raccolta (Eppendorf) delle polveri generate da ciascun anello annuale di accrescimento e di buona mano ferma. Gli anelli legnosi così polverizzati ed isolati sono stati successivamente classificati ed etichettati. Al fine di evitare contaminazioni tra le polveri di diversi anelli, ad ogni passaggio da un anello al successivo, il piano di lavoro e gli utensili adoperati erano decontaminati mediante aria compressa.

Successivamente per ciascun campione sono stati misurati i rapporti isotopici tramite spettrometro di massa in configurazione di flusso continuo (CF-IRMS; ISOPRIME, GW, UK), in linea con un analizzatore elementare NA 1500 (Carlo Erba, IT). La composizione isotopica ($\delta^{13}\text{C}$) dei campioni è stata calcolata dai rapporti isotopici riferiti allo standard internazionale VPDB (IAEA).

Il parametro $\Delta^{13}\text{C}$ è stato calcolato adottando la formula classica riportata in Farquhar *et al.* (1989) e la procedura di normalizzazione che tiene conto dello scostamento temporale del valore di $\delta^{13}\text{C}$ della CO_2 atmosferica, così come riportato nelle banche dati internazionali di NOAA ed IPCC (Mc Carroll and Loader, 2004):

$$\Delta^{13}\text{C} = (\delta_{\text{air}} - \delta_{\text{plant}})/(1 + \delta_{\text{plant}}) \quad (1),$$

dove δ_{plant} è $\delta^{13}\text{C}$ del materiale vegetale e δ_{air} , la composizione isotopica della CO_2 atmosferica così come sincronizzata alla cronologia in esame (attualmente è $\delta_{\text{air}} = -8.3\text{‰}$).

I valori di $\Delta^{13}\text{C}$ di ciascun individuo studiato sono stati successivamente mediati in modo tale da produrre, per ciascun popolamento analizzato, delle serie di dati confrontabili sia a scala di decennio che di lustro.

Lo stesso tipo di trattamento è stato applicato alle cronologie stazionali di BAI (Incremento di Area Basimetrica) al fine di poter rendere confrontabili i due tipi di parametro.

RISULTATI

Il primo dato emerso dalle analisi dendrocronologiche è quello relativo all'età degli alberi nella volta arborea di ciascun popolamento. Questo dato pur rappresentando una stima per difetto, ha dato importanti informazioni di carattere ecologico.

Come primo parametro si è valutata l'età massima osservata in ciascuno dei popolamenti. L'età massima, costituendo un indice di longevità realizzata, è in grado di rendere molte informazioni sulla storia sociale ed ecologica dei boschi considerati. I valori massimi rilevati per i 34 popolamenti in esame sono riportati in Tabella 3.

Tabella 3. Dati dendrocronologici delle 34 faggete indagate appartenenti alla rete dendroecologica nazionale sviluppata dal dipartimento DAFNE dell'università degli studi della Tuscia, suddivisi in base alla regione di appartenenza (EAL=Alpi orientali; CAP=Appennino centrale); tipo di gestione (O=vetuste; U=non gestite; M=gestite).

REGIONE	FASCIA	CODICE SITO	GESTIONE	N° CAROTE	PERIODO	N>10	ETA' MAX	$\Delta^{13}C$
EAL	H	LAT	O	20	1732-2009	1837-2009	380	*
EAL	H	PAU	U	23	1742-2002	1871-2002	260	
EAL	H	SAU	U	19	1772-2006	1847-2006	234	
EAL	H	TIM	O	18	1697-2009	1868-2009	312	
EAL	H*	GAL	M	19	1849-2009	1906-2009	160	*
EAL	M	CLE	O	24	1744-2003	1832-2003	259	
EAL	M	GRA	O	29	1686-2008	1714-2008	322	
EAL	M	TRE	M	13	1831-2002	1907-2002	171	
EAL	M	TRL	O	25	1686-2008	1762-2008	322	*
EAL	M*	GAT	M	18	1853-2009	1911-2009	156	
EAL	L	MOT	U	12	1928-2004	1964-2004	76	
EAL	L	NIM	U	11	1904-2003	1952-2003	99	*
EAL	L	PEC	U	10	1926-2004	1960-2004	88	
CAP	H	COL	M	21	1884-2009	1900-2009	125	
CAP	H	COP	O	20	1633-2008	1702-2008	375	*
CAP	H	LEO	M	20	1678-2000	1706-2000	322	
CAP	H	SCA	O	40	1559-2011	1694-2011	452	
CAP	H	TOC	M	20	1864-2001	1887-2001	137	
CAP	H	VCH	O	54	1451-2009	1642-2009	558	
CAP	H	VCL	U	18	1567-2001	1764-2001	434	
CAP	M	CIM	O	65	1804-2008	1884-2008	204	*
CAP	M	LEP	U	18	1821-2001	1863-2001	180	
CAP	M	MOR	U	18	1712-2006	1854-2006	294	
CAP	M	PIZ	M	31	1896-2001	1908-2001	105	
CAP	M	REG	O	36	1770-2008	1886-2008	238	*
CAP	M*	PET	U	22	1918-2000	1934-2000	82	
CAP	M*	ROS	M	10	1862-1997	1935-1997	135	
CAP	L	FOG	M	37	1805-2009	1895-2009	204	
CAP	L	ORI	O	45	1898-2009	1919-2009	101	*
CAP	L	VEN	O	67	1863-2009	1889-2009	146	

Faggete di età ragguardevole (superiore a 300 anni) sono state incontrate indistintamente in tutto il paese dalle Alpi all'Appennino centrale, escludendo così alcun legame di longevità con latitudine e longitudine a livello nazionale. Da citare in quanto risultati ben al di sopra del limite massimo di longevità del faggio riportato in molti testi sono i siti altimontani dell'Appennino centrale Val Cervara, con età massima rilevata di 558 anni (H.CAP; VCH) e Scangive, 452 anni (H.CAP; SCA) e Val Cervara bassa, con 434 anni (M.CAP; VCL).

Per quanto riguarda l'arco alpino l'età massima, circa 380 anni, è stata rilevata nel sito del Lateis, nella fascia altimontana (H.EAL; LAT). Anche nella fascia montana sono state rilevate età massime superiori a 300 anni nei siti di Gracco e Trelli (M.EAL; GRA,TRL).

All'interno della rete si è comunque registrata una notevole variabilità di tale parametro, oscillando dai 63 anni della faggeta appenninica basale di Barbarano Romano (BAR) ai sopra citati 558 anni della faggeta sommitale di Val Cervara. In accordo con altri autori (Di Filippo, 2005) tale parametro è risultato significativamente legato alla quota ($r = 0.55$, $p < 0.001$) (Fig. 3).

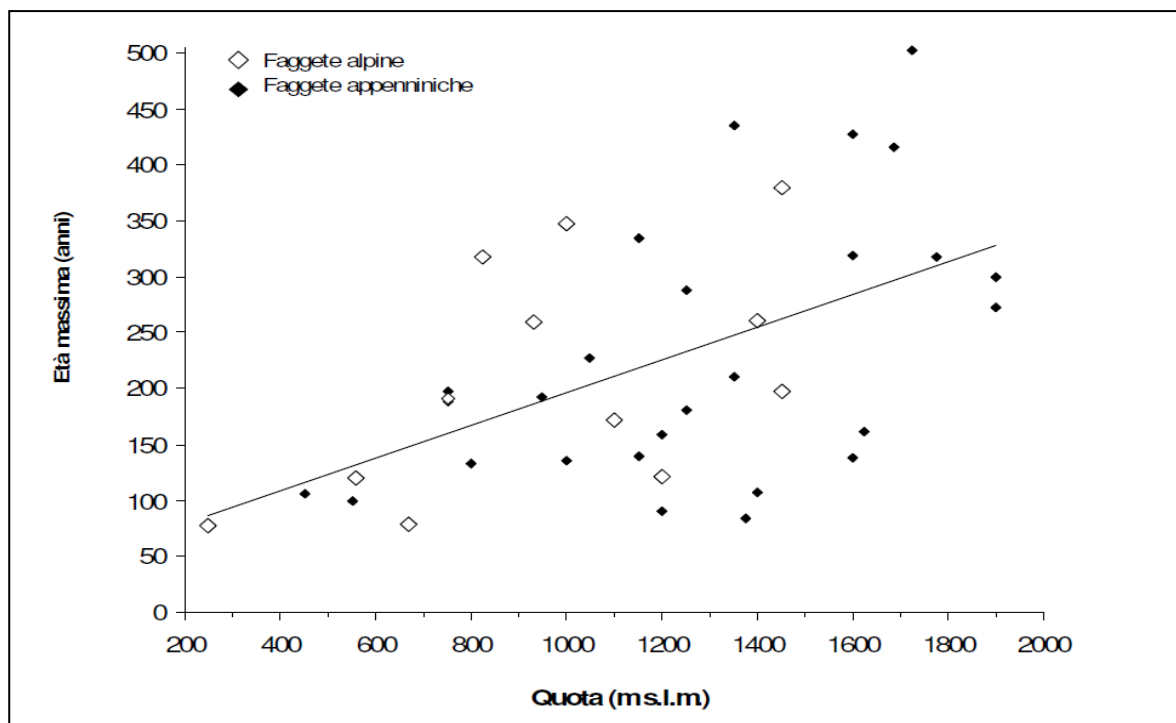


Figura 3. Relazioni tra età massima rilevata e quota media.

Tale relazione conferma come le faggete di quota siano maggiormente longeve in ragione della maggiore durabilità conferita al legno dalla crescita più lenta e dalla minore accessibilità di tali siti al limite altitudinale dell'areale; al contrario, i popolamenti posti a quote inferiori hanno minor longevità in quanto sottoposti da tempo remoto al notevole impatto delle diverse attività antropiche. La minore longevità, oltre all'accessibilità ed alla vicinanza ai centri abitati, va addebitata, nel caso delle faggete collinari e di quelle montane prossime alla linea di costa, alla stagione vegetativa più lunga che porta ad anelli di dimensioni maggiori e ad un legno meno durabile.

L'analisi di alta frequenza realizzata mediante il calcolo delle funzioni di correlazione (FC) attraverso il programma DENDROCLIM2002, ha messo in evidenza profonde differenze nelle limitazioni climatiche tra faggete dell'arco appenninico e quelle dell'arco alpino.

Analizzando gli istogrammi, che per ciascuna variabile (precipitazioni, temperature massime e minime, Palmer's Z-INDEX) rivelano quali sono i mesi limitanti la crescita, evidenziati in grassetto ed individuati da valori di $p < 0.05$, si è visto come i popolamenti delle fasce basali e montane appenninici siano primariamente limitati nella crescita da temperature massime elevate nei mesi di giugno, luglio ed agosto dell'anno in corso, e da una conseguente aridità estiva evidenziata da una forte significatività delle precipitazioni nei mesi di giugno, luglio ed agosto dell'anno in corso soprattutto per quanto riguarda i popolamenti della fascia montana (Fig. 4).

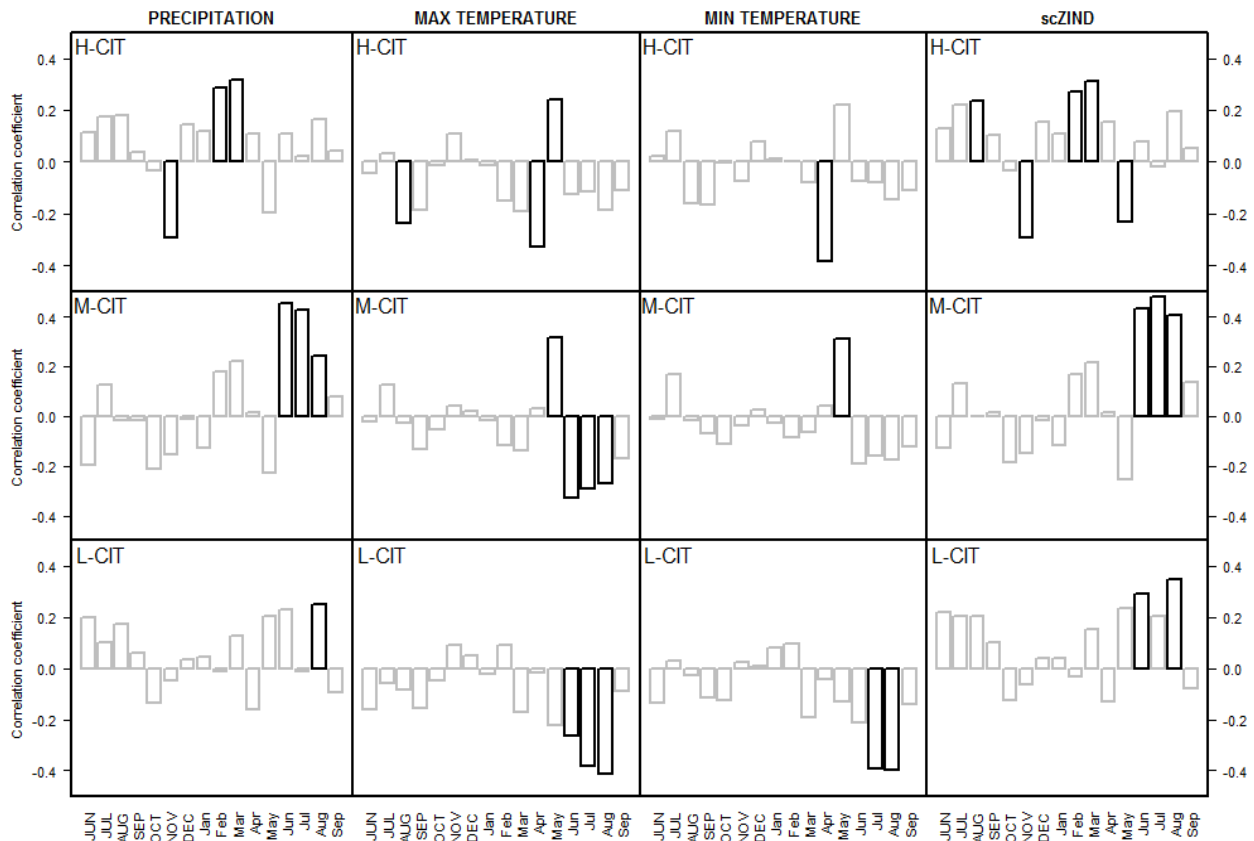


Figura 4. Funzioni di correlazione tra cronologie composite altitudinali dell'Appennino centrale e precipitazioni mensili, temperature massime e minime, ed il Palmer's Z-index. H: altimontane; M: montane; L: basali.

Da sottolineare che lo stress idrico nelle faggete di bassa quota (faggete basali) è avvertito già a partire dal mese di maggio.

Se ne deduce che la crescita radiale di questi faggi è influenzata positivamente da una primavera mite e dalle piogge dell'estate dell'anno in corso, segnale dominante comunque rimangono le temperature massime dei mesi estivi che ad oggi rappresentano il maggior fattore limitante la crescita di tali popolamenti.

Per quanto riguarda le faggete della fascia altimontana gli unici segnali termici significativi sulla crescita sono risultati nella risposta positiva alle temperature di maggio e nella relazione inversa con la temperatura del mese di aprile.

Il fabbisogno di un maggio mite in quota è legato al risveglio vegetativo, periodo di intensa attività metabolica, in cui il calore è necessario per sostenere le reazioni biochimiche legate alla crescita. La correlazione inversa con le temperature di aprile è verosimilmente legata a due fattori: l'elusione di danni da gelate tardive favorito da un ritardato risveglio vegetativo e un prolungato mantenimento dell'accumulo nevoso al suolo da utilizzare come apporto idrico durante la stagione vegetativa (Biondi, 1993).

Riguardo alle precipitazioni, si ritrova una correlazione diretta con le precipitazioni di febbraio e marzo dell'anno corrente mentre si è osservata una correlazione inversa con novembre dell'anno precedente.

La crescita di queste faggete al limite superiore di distribuzione altitudinale risulta, quindi, influenzata da un insieme di fattori climatici tipici dell'ecologia di alta quota (gelate tardive ed entrata in vegetazione ritardata), ma resta intimamente legata al regime climatico mediterraneo (esigenza di precipitazioni estive e ricarica invernale dei suoli). Le precipitazioni del mese di febbraio possono essere ascritte al più ampio ambito di quelle invernali, che svolgono l'importante ruolo di ricarica idrica dei suoli necessaria ad affrontare la forte evapotraspirazione estiva (Biondi, 1993).

Per quanto riguarda le faggete alpine queste non hanno evidenziato risposte comuni tra le fasce indagate (Fig.5).

Analizzando le FC delle fasce montane ed altimontane si nota come per tali siti il segnale climatico dominante la crescita sia soprattutto legato a un effetto limitante delle temperature. Soprattutto nelle faggete altimontane si è notata una forte significatività con le temperature massime nel corso della stagione vegetativa, che dimostra che tali faggete al limite altitudinale superiore stanno rispondendo positivamente al recente riscaldamento climatico.

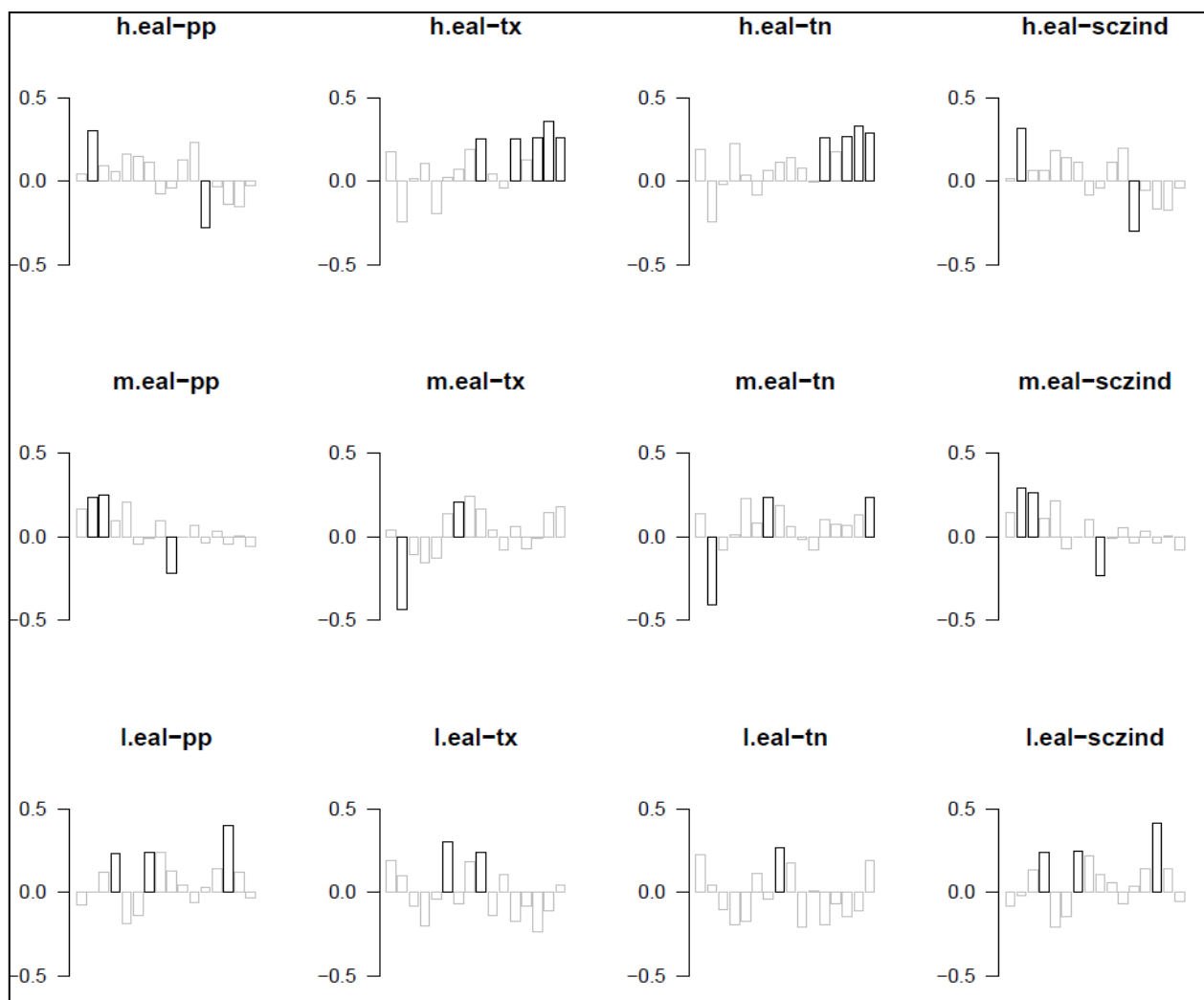


Figura 5. Funzioni di correlazione tra cronologie composite altitudinali delle Alpi orientali e precipitazioni mensili, temperature massime e minime, ed il Palmer's Z-index. H: altimontane; M: montane; L: basali.

Le faggete montane alpine non sembrano invece risentire particolarmente del clima della stagione vegetativa, avendo come unico segnali limitanti quelli relativi all'estate precedente la formazione dell'anello.

Questo segnale è stato messo in relazione all'effetto dell'induzione fioreale, nel faggio stimolata dallo stress idrico presente nel momento della formazione delle gemme (inizio estate), che poi provocherebbe un calo di produttività nella stagione di crescita successiva (Piovesan e Adams, 2001).

Sembra quindi che, tra tutte le faggete indagate, queste vivano in un asorta di ottimo di crescita, in cui gli unici fattori climatici limitanti la crescita siano quelli relativi ai cicli di fruttificazione.

Da evidenziare invece che le faggete basali alpine mostrano legami con lo stress idrico di luglio che, insieme alla correlazione positiva con le precipitazioni autunno invernali, mostrano come tali faggete incomincino a subire gli effetti di una crescente siccità estiva che a queste quote diviene ben più dominante del fattore temperatura.

L'analisi delle spline con periodo di 50 anni, utilizzate per studiare le variazioni di produttività del soprassuolo di medio-bassa frequenza, ha messo in risalto una netta differenziazione tra bioregione alpina e bioregione appenninica, in termini di risposta alle mutate condizioni climatiche.

In particolare tutti i popolamenti dell'Appennino centrale dalle fasce basali a quelle montane, e in parte anche quelle altimontane, presentano un evidente decremento nei loro trend di crescita.

Tale perdita di produttività è comunque ben più marcata ed evidente nei popolamenti basali e di transizione tra la fascia montana e quella basale (CIM - REG), dove il decremento è ormai repentino da parecchi anni e che, a differenza dei popolamenti montani ed altimontani, presenta un anticipo nel declino dei propri trend di crescita.

Per quanto riguarda i siti della fascia altimontana le spline applicate hanno evidenziato anche qui un trend decrescente in molti dei siti indagati, anche se molto meno marcato rispetto a quello delle fasce basali e montane, ad eccezione dei popolamenti di COP e LEO dove invece si sono evidenziati trend di crescita positivi (Fig. 6).

Successivamente l'analisi dei periodi di culminazione di produttività di ciascun popolamento, all'interno delle diverse fasce fitoclimatiche, ha permesso di evidenziare come i popolamenti appenninici basali e di transizione abbiano culminato nel periodo a cavallo tra il 1967 ed il 1977.

Andando a calcolare i periodi di culminazione dei popolamenti della fascia montana si è visto invece come quest'ultimi abbiano culminato nel periodo a cavallo tra il 1971 ed il 1981, con uno shift di circa un lustro rispetto alla fascia basale.

Infine per la fascia altimontana e per i soli siti che ad oggi presentano un evidente perdita di produttività (SCA – VCH), i periodi di culminazione sono ricaduti tra il 1980 ed il 1987.

Tale risultato è stato molto interessante in quanto ci ha permesso di capire come i diversi popolamenti, nelle diverse fasce di appartenenza, abbiano reagito alle mutate condizioni climatiche con tempi diversi in funzione della localizzazione geografica e del tipo di gestione adottata.

L'analisi delle spline cubiche della bioregione alpina ha messo invece in evidenza come tali popolamenti, indifferentemente dalla fascia fitoclimatica di appartenenza, sembrerebbero non aver risentito negativamente delle mutate condizioni climatiche, ma anzi abbiano aumentato i propri tassi di crescita proprio in funzione delle aumentate temperature registrate a partire dagli anni novanta. Questa osservazione è in linea con le risposte positive al fattore termico emerse dalle Funzioni di Correlazione. Unica eccezione è rappresentata dai popolamenti basali del La Motta e di Pechinie (MOT; PEC) che hanno visto stabilizzarsi i propri tassi di crescita e dal sito montano del Trelli (TRL), che così come osservato per alcuni popolamenti della fascia altimontana e montana appenninica, ad oggi mostra un lento decremento di produttività, giustificato perlopiù dalla natura poco fertile del substrato (dolomia).

Per i popolamenti della bioregione alpina, visti i loro trend di crescita (Fig.7), non è stato possibile definire ben precisi periodi di culminazione, ma di identificare un lieve calo dei tassi di crescita per la maggior parte dei siti, soprattutto nell'ultimo decennio.

Per meglio comprendere le risposte adattative in funzione del tipo di gestione adottato le faggete sono state suddivise in tre diverse classi: vetuste (old-growth), non gestite (unmanaged) e gestite (managed). Le spline applicate a tali classi, suddivise sempre in funzione della bioregione e della fascia fitoclimatica di appartenenza, hanno evidenziato diverse ed interessanti risposte.

A tali spline è stata inoltre affiancata un spline climatica, che per quanto riguarda l'Appennino è stata generata sulla media delle temperature massime della stagione vegetativa (Tmax growing season), mentre per l'arco alpino sono state considerate le temperature medie del periodo gennaio-settembre (Jan-Sep Tave). La scelta è stata dettata dal fatto che la siccità durante la stagione

vegetativa è il principale fattore limitante sull'Appennino, mentre le basse temperature sono il principale fattore limitante le nostre faggete alpine.

Analizzando nel complesso le risposte di tutte le faggete appenniniche, a prescindere dalla fascia fitoclimatica di appartenenza e dal tipo di gestione adottata, si è notata una forte relazione inversa tra spline di produttività e spline climatica. A seguito del 1970 si nota infatti un progressivo aumento medio delle temperature massime, a cui si affianca una altrettanto ripida caduta della produttività di tutti i siti indagati.

L'analisi grafica ha evidenziato come nelle faggete appenniniche basali ed altimontane il periodo di culminazione dei trend di crescita dei siti gestiti sia posticipato di alcuni anni rispetto ai siti old-growth, andando poi progressivamente al di sotto dei livelli di produttività dei siti non gestiti da più di 50 anni (Fig.8).

Tale risposta può essere giustificata in quanto i siti gestiti si sono avvantaggiati di una minor competizione intraspecifica, durante i primi anni della fase arida, che hanno sostenuto elevati livelli di crescita per circa un lustro. In seguito però, una volta richiusa la volta arborea, si è assistito ad una perdita maggiore di produttività con l'avvento della fase arida recente. Questo può essere legato al maggior sviluppo delle chiome in seguito ai tagli che, insieme ad una maggiore alterazione del suolo, può avere esposto maggiormente le piante rilasciate agli effetti della siccità. Si può comunque affermare di come le faggete vetuste (old-growth), che ad oggi presentano maggiori livelli di naturalità e dunque di una maggiore stabilità strutturale, abbiano reagito meglio delle faggete gestite in ogni fascia indagata, confermando l'importanza di una gestione sostenibile delle risorse forestali.

Per quanto riguarda le risposte delle faggete della fascia montana i maggiori livelli di crescita registrati nei siti gestiti di Rosello e Monte Pizi (ROS, PIZ) sono giustificati perlopiù dalla giovane età dei popolamenti in esame e dalla struttura ben più aperta, rispetto ai soprassuoli vetusti. C'è inoltre da notare che ROS gode anche di condizioni stazionali contraddistinte da buona fertilità ed un particolare microclima.

L'analisi delle spline composite alpine ha evidenziato invece di come i siti delle fasce montana ed altimontana si stiano avvantaggiando dell'aumento delle temperature registrato negli ultimi anni aumentando progressivamente i propri livelli di produttività, a prescindere dal tipo di gestione attuata.

Si è osservato infatti un forte parallelismo tra andamento produttivo e andamento delle temperature medie del periodo gennaio-settembre, giustificato dal fatto che tali faggete, in cui la disponibilità idrica non rappresenta un fattore limitante, si stiano avvantaggiando di un allungamento e di un miglioramento delle condizioni della stagione vegetativa, che diviene sempre più ampia all'aumentare delle temperature, aumentando di conseguenza i propri tassi di crescita.

Diversamente si è notato come le faggete alpine basali stiano stabilizzando i propri tassi di crescita proprio a partire dalla fine degli anni novanta, indicando primi segnali di stress legati perlopiù a limitazioni idriche durante la stagione estiva (Fig.9).

L'analisi della variazione percentuale di BAI (MBV) tra l'ultima fase umida registrata (1961-1970) e la fase arida attuale (1991-2000) ha permesso di quantificare, in termini di produttività, gli effetti del surriscaldamento su tutti i popolamenti studiati, evidenziando risposte preoccupanti soprattutto per le fasce basali e montane appenniniche (Fig.10).

Tali fasce infatti, indipendentemente dal tipo di gestione attuata, hanno registrato una perdita di produttività del 20-25%, ad esclusione dei siti gestiti di ROS e PIZ il cui aumento di produttività è perlopiù giustificato dalla giovane età di tali popolamenti e da una struttura ben più aperta in grado di diminuire fortemente i livelli di competizione.

Per quanto riguarda la fascia altimontana si sono invece registrati trend discordanti ma tendenzialmente positivi, ad indicare di come in tale fascia non vi sia ancora una limitazione idrica tale da indurre uno stress in tali popolamenti, che risultano invece essere governati dal fattore temperatura. Per quanto riguarda il bioma alpino si è evidenziata una risposta positiva comune, indipendentemente dal tipo di gestione e dalla fascia di appartenenza. I maggiori tassi di crescita si sono comunque registrati nella fascia basale ed in quella montana dove le temperature hanno

permesso un maggior allungamento della stagione vegetativa rispetto alla fase umida di riferimento che ha portato ad un aumento di produttività medio del 30-40%.

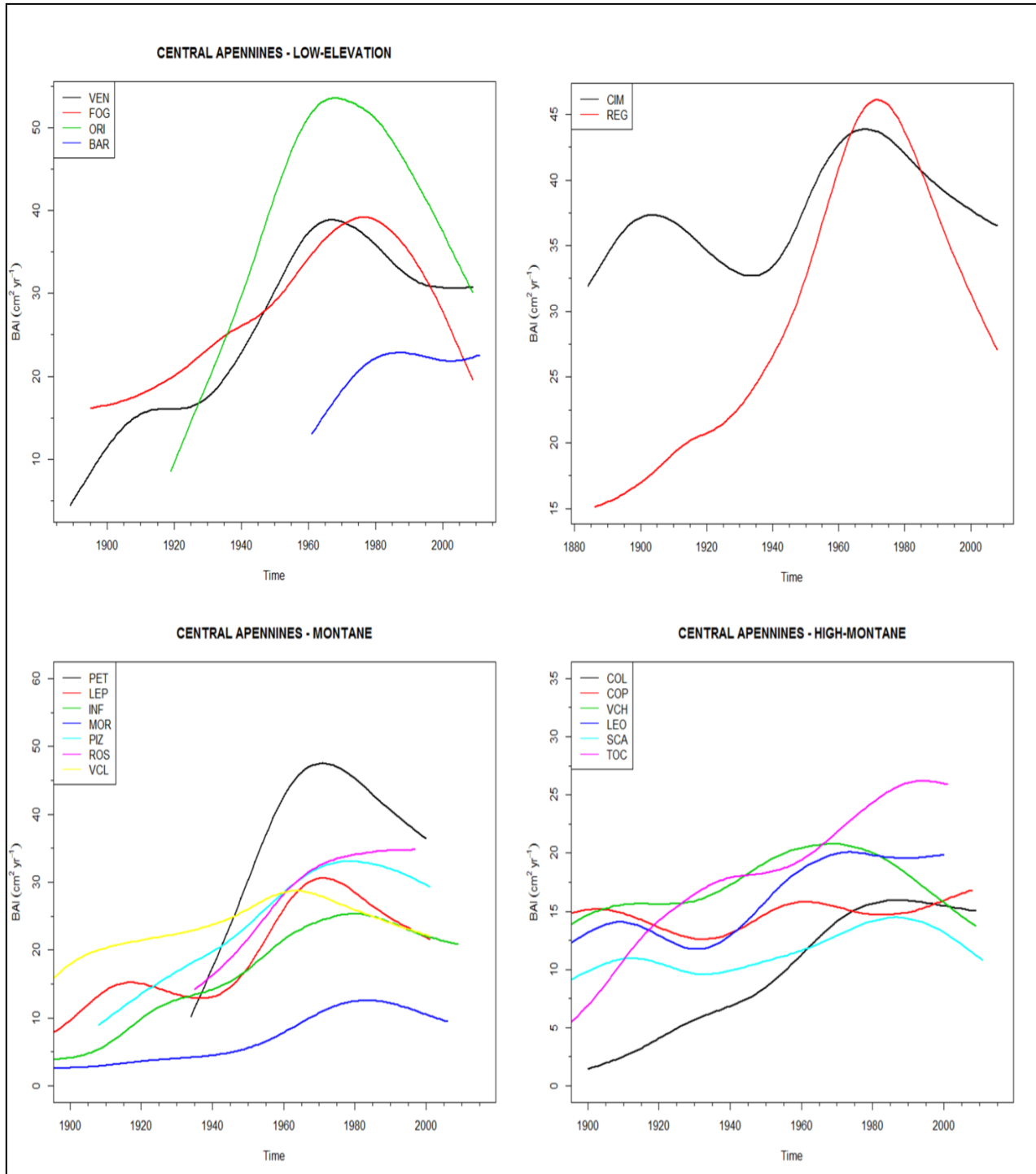


Figura 6. Splines cubiche con periodo di 50 anni utilizzate per lo studio delle variazioni di produttività del soprassuolo di medio-bassa frequenza della bioregione appenninica, suddivisa nelle diverse fasce fitoclimatiche di appartenenza dei siti.

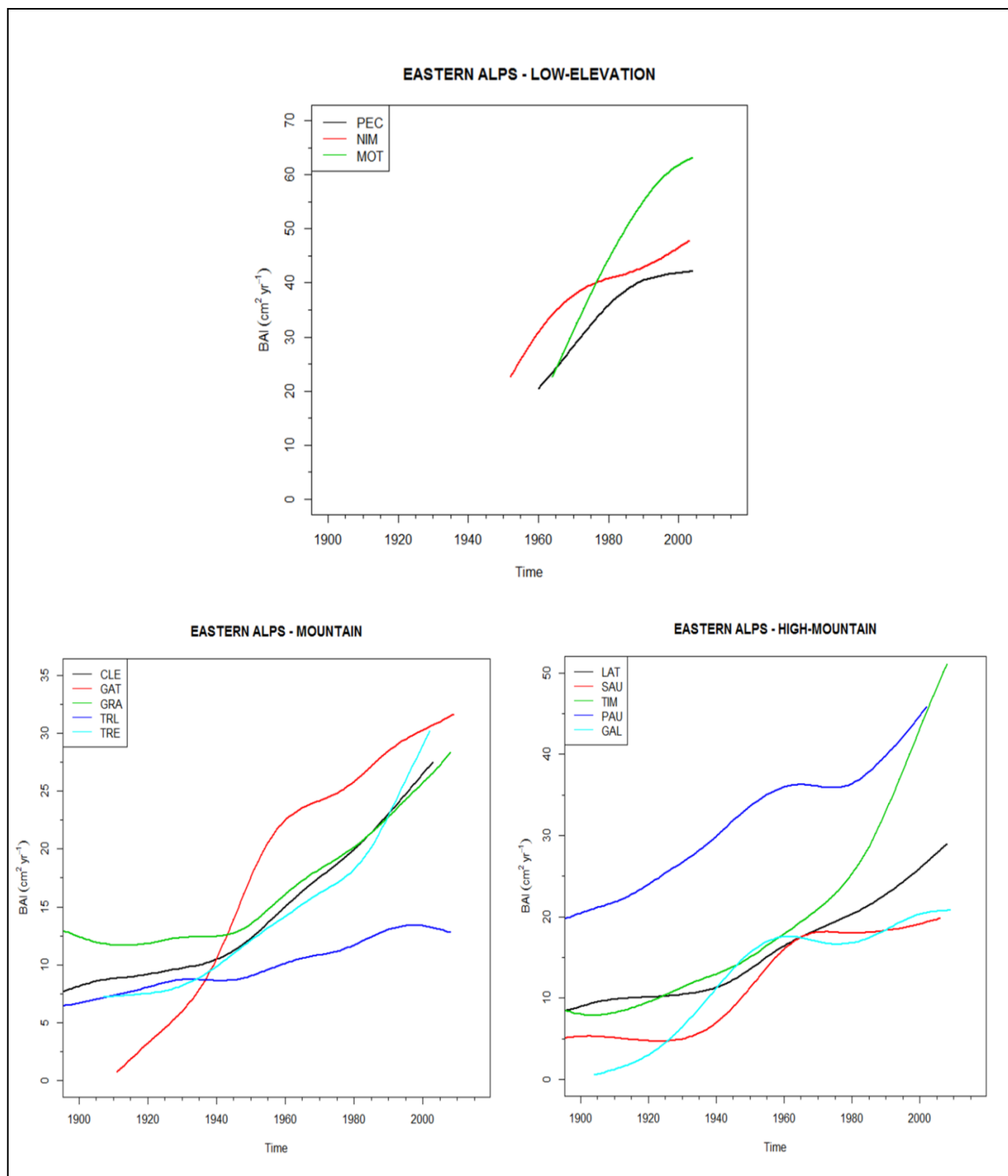


Figura 7. *Splines* cubiche con periodo di 50 anni utilizzate per lo studio delle variazioni di produttività del soprassuolo di medio-bassa frequenza della bioregione Alpina, suddivisa nelle diverse fasce fitoclimatiche di appartenenza dei siti.

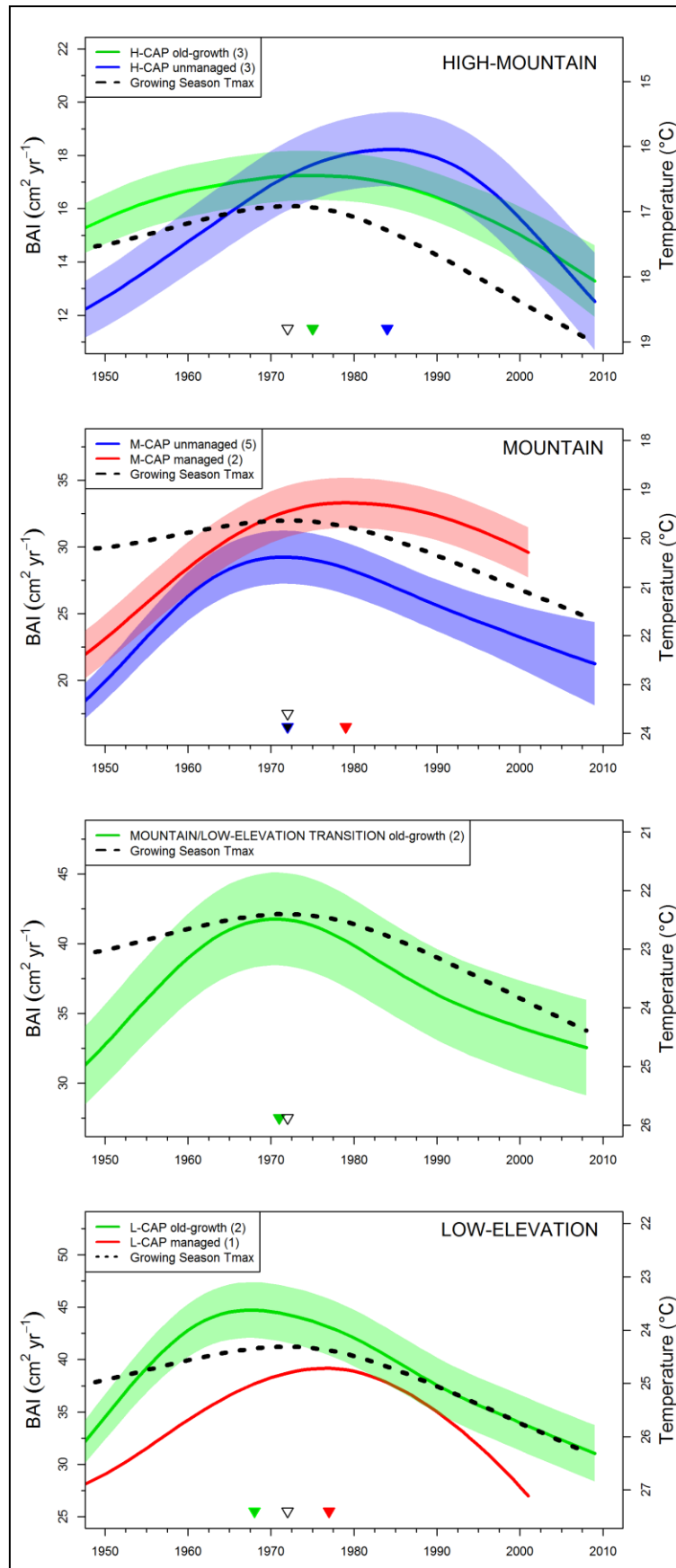


Figura 8. *Splines* cubiche con periodo di 50 anni utilizzate per lo studio delle variazioni di crescita di lungo periodo delle cronologie composite per ciascuna fascia fitoclimatica appenninica, in funzione del tipo di gestione applicata.

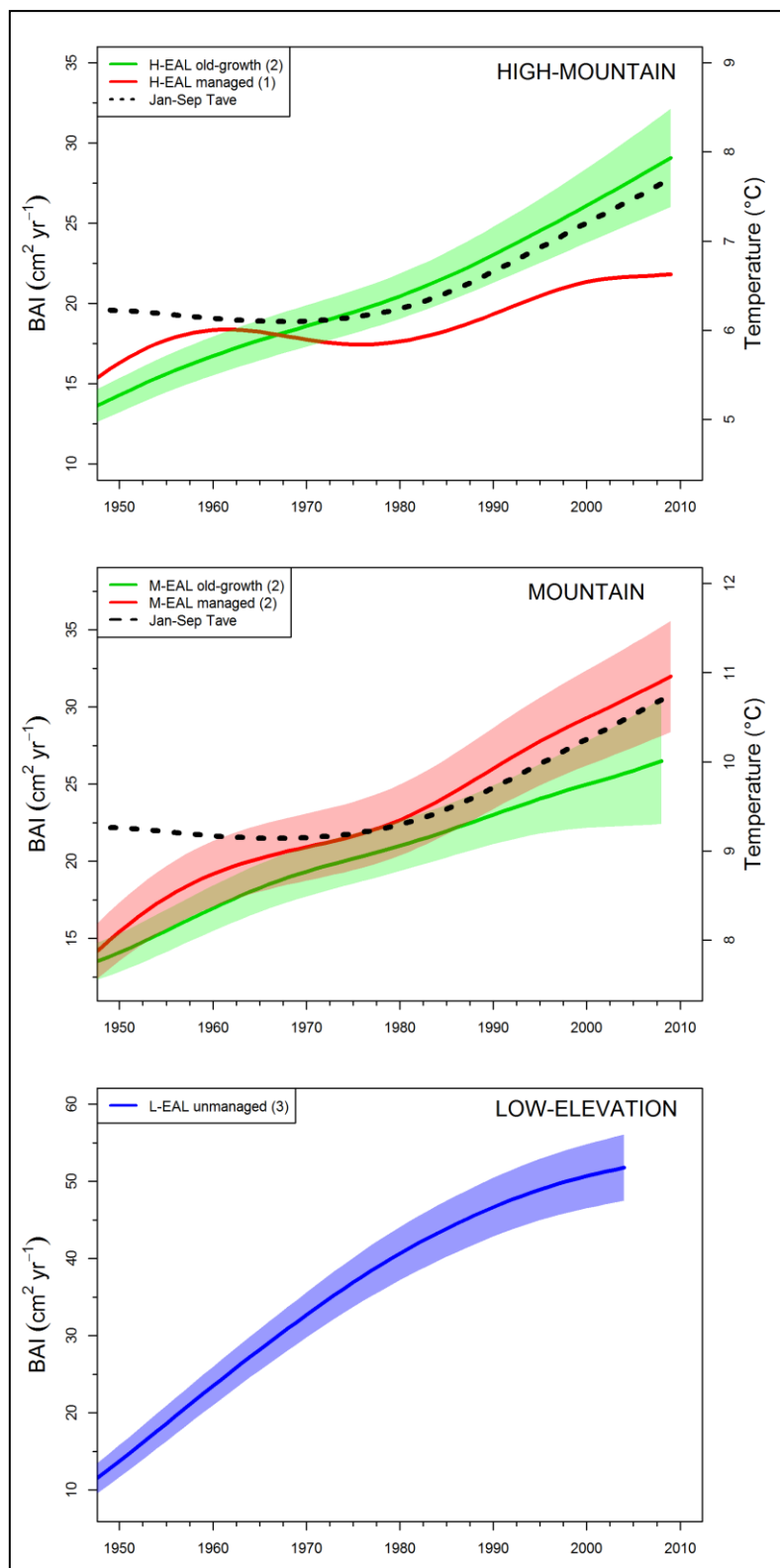


Figura 9. *Splines* cubiche con periodo di 50 anni utilizzate per lo studio delle variazioni di crescita di lungo periodo delle cronologie composite per ciascuna fascia fitoclimatica alpina, in funzione del tipo di gestione applicata.

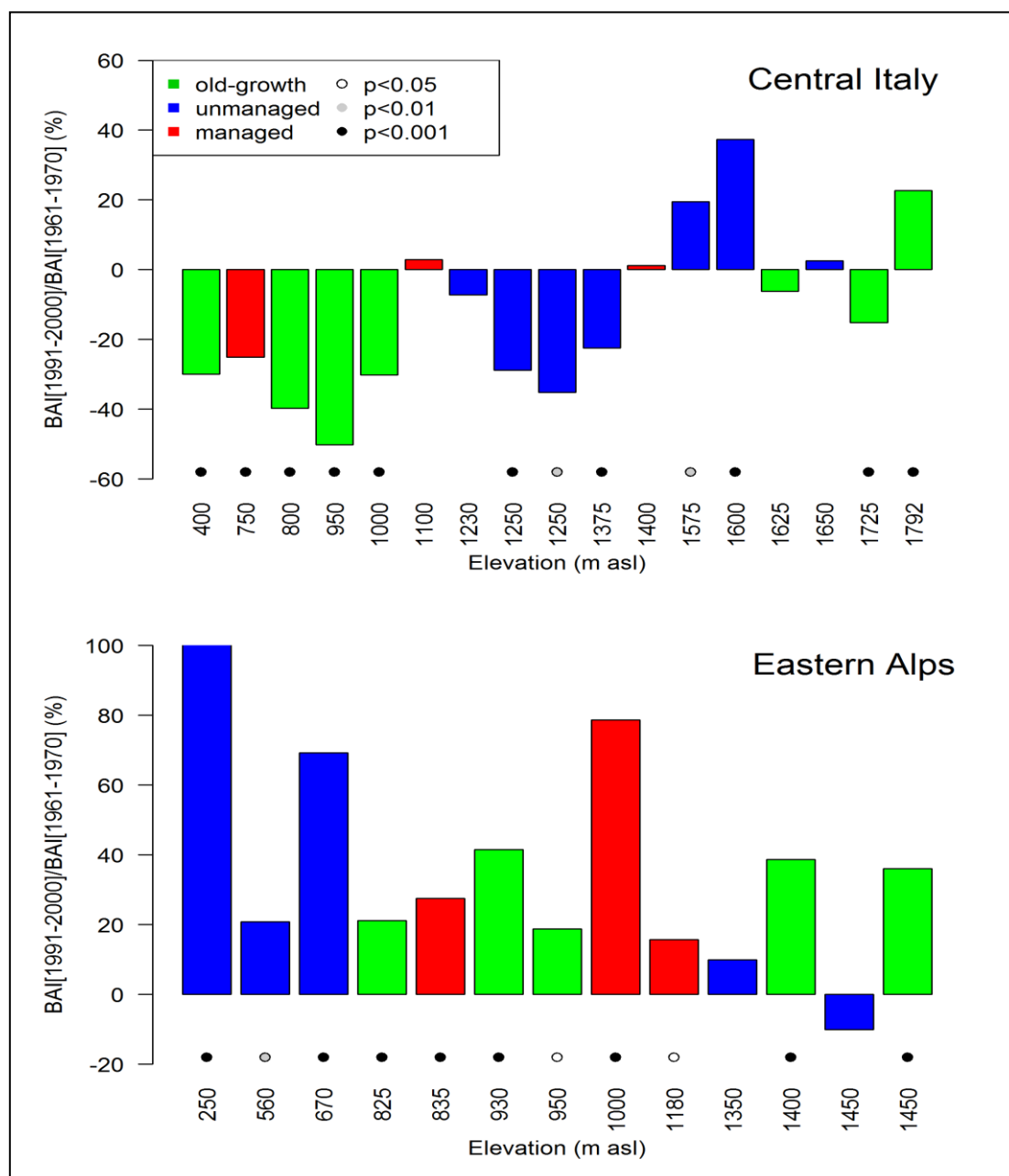


Figura 10. Variazione percentuale di BAI (MBV) calcolata come differenza tra l'ultima fase umida registrata (1960-1970) e la fase arida in atto (1990-2000). I pallini indicano la significatività del test *t* di *student* effettuato sui due periodi: nero, $p < 0.001$, nero; $p < 0.01$; bianco, $p < 0.05$; nessun pallino, non significativo.

I risultati medi normalizzati di $\Delta^{13}\text{C}$ sono stati confrontati riferendosi al decennio 1999 – 2008. I dati derivanti dal sito di Nimis, sono tuttavia relativi al solo lustro 1999-2003, perchè non si è potuto aggiornare la cronologia. In entrambe le analisi, decennali o di lustro, si è comunque rivelata una variazione sia riguardo la localizzazione bioregionale (regione alpina: 18.7‰; regione appenninica: 18.1‰) che i singoli popolamenti in analisi (Tabella 4).

La media decennale più bassa ($17.8 \pm 0.1\text{‰}$) così come quella quinquennale è stata registrata nella faggeta vetusta basale di Fonte Regna (Monti Sabini, 954 m s.l.m.); il valore massimo decennale è stato rilevato per il popolamento vetusto altimontano alpino di Lateis ($19.0 \pm 0.2\text{‰}$; 1450 m.s.l.m.), mentre su scala di lustro il valore massimo ha interessato il popolamento alpino, basale, di Nimis ($19.3 \pm 0.1\text{‰}$; 560 m s.l.m.).

La faggeta basale appenninica di Oriolo Romano (con esposizione NE) ha presentato valori medi di $\Delta^{13}\text{C}$ pari a $18.0 \pm 0.1\text{‰}$; le altre due faggete appenniniche analizzate, in relazione alla quota e la freschezza dell'esposizione, hanno mostrato valori medi maggiori: Monte Cimino (1000 m s.l.m., esposizione W, $\Delta^{13}\text{C} = 18.1 \pm 0.1\text{‰}$); Coppo del Principe (1625 m s.l.m., esposizione NE, $\Delta^{13}\text{C} = 18.4 \pm 0.1\text{‰}$).

La faggeta gestita alpina montana di Colle dei Galli (1120 m s.l.m., Carnia) ha fatto rilevare un valore medio di $\Delta^{13}\text{C}$ ($18.3 \pm 0.1\text{‰}$) del tutto analogo a quello della foresta vetusta appenninica altimontana di Coppo del Principe ($18.3 \pm 0.1\text{‰}$).

Per effettuare uno studio delle relazioni tra $\Delta^{13}\text{C}$ e BAI, abbiamo confrontato i valori medi di entrambe le variabili per il decennio (1999-2008) e per il quinquennio (1999-2003). L'incremento di area basimetrica (BAI) medio decennale appenninico è stato pari a $33.8 \text{ cm}^2 \text{ anno}^{-1}$, contro quello alpino di $24.5 \text{ cm}^2 \text{ anno}^{-1}$; i valori su scala quinquennale sono risultati pari a $33.7 \text{ cm}^2 \text{ anno}^{-1}$ per la regione appenninica e di $30.9 \text{ cm}^2 \text{ anno}^{-1}$ per quella alpina.

In dettaglio, la faggeta di Monte Cimino ha presentato il massimo valore di BAI nella decade ($42.3 \pm 2.2 \text{ cm}^2 \text{ anno}^{-1}$), Trelli quello minimo ($12.7 \pm 1.1 \text{ cm}^2 \text{ anno}^{-1}$), ed entrambi i popolamenti alpini

altimontani (Lateis e Colle dei Galli) hanno rispecchiato i valori medi di Coppo del Principe ($23.1 \pm 1.5 \text{ cm}^2 \text{ anno}^{-1}$).

Dall'analisi quinquennale è emerso invece che il sito del Nimis ha fatto registrare il massimo valore di BAI ($55.7 \pm 1.2 \text{ cm}^2 \text{ anno}^{-1}$) così come Trelli il minimo ($14.7 \pm 0.7 \text{ cm}^2 \text{ anno}^{-1}$); per i restanti siti i valori medi sono risultati del tutto analoghi ai precedenti su scala decennale.

Tabella 4. Dati di discriminazione isotopica e di incremento di area basimetrica per i siti campionati per entrambe le scale temporali indagate, decade e lustro.

Siti	1999-2008						1999-2003					
	$\Delta^{13}\text{C}$ (μ)			BAI (μ)			$\Delta^{13}\text{C}$ (μ)			BAI (μ)		
	(‰)	(‰)	(‰)	($\text{cm}^2 \text{ anno}^{-1}$)	($\text{cm}^2 \text{ anno}^{-1}$)	($\text{cm}^2 \text{ anno}^{-1}$)	(‰)	(‰)	(‰)	($\text{cm}^2 \text{ anno}^{-1}$)	($\text{cm}^2 \text{ anno}^{-1}$)	($\text{cm}^2 \text{ anno}^{-1}$)
Alpini							Alpini					
LAT	19.0	19.6	18.1	24.6	30.2	20.2	18.8	19.6	18.1	24.9	28.2	22.2
TRL	18.5	19.3	18	12.7	16.9	8.1	18.2	18.9	18	14.7	16.9	12.1
NIM	/	/	/	/	/	/	19.3	19.7	18.6	55.7	60.6	51.6
GAL	18.3	18.6	18	24.5	36.2	14.7	18.3	18.6	18	28.4	36.2	25.6
Appenninici							Appenninici					
CIM	18.1	18.6	17.8	42.3	56.2	32.5	18.2	18.6	17.8	39.5	45.3	32.5
COP	18.4	19	18	23.1	33.1	18.7	18.7	18.3	17.7	23.8	33.1	18.7
REG	17.8	18.3	17.4	38.4	47.6	29.8	17.9	19	18.5	41	47.6	29.8
ORI	18.0	18.4	17.8	31.3	37	26.3	18.1	18.4	17.8	30.7	35.1	26.3

Dall'analisi delle relazioni tra BAI e $\Delta^{13}\text{C}$ è emerso un interessante raggruppamento delle faggete in entrambe le scale temporali, decennio e lustro.

Le regressioni lineari dei parametri BAI vs $\Delta^{13}\text{C}$, relative al periodo 1999-2008, dunque prive del popolamento alpino basale di Nimis, hanno fatto generalmente rilevare i coefficienti r (coefficiente di correlazione di Pearson) più alti, abbinando i valori di discriminazione isotopica dell'anno (n) con quelli di BAI dell'anno precedente ($n-1$). Seguendo questo tipo di logica, la quale attribuisce alla variabile $\text{BAI}_{(n-1)}$ un certo livello di determinismo sulla variabile $\Delta^{13}\text{C}_{(n)}$, si è ottenuta una regressione lineare negativa globale, che ha permesso di analizzare i risultati di tutti i popolamenti

come un unico insieme, e che spiega il 26% della variazione di $\Delta^{13}\text{C}$ come conseguenza della variazione di BAI dell'anno precedente ($r = -0.51$, $P < 0.01$) (Fig.11).

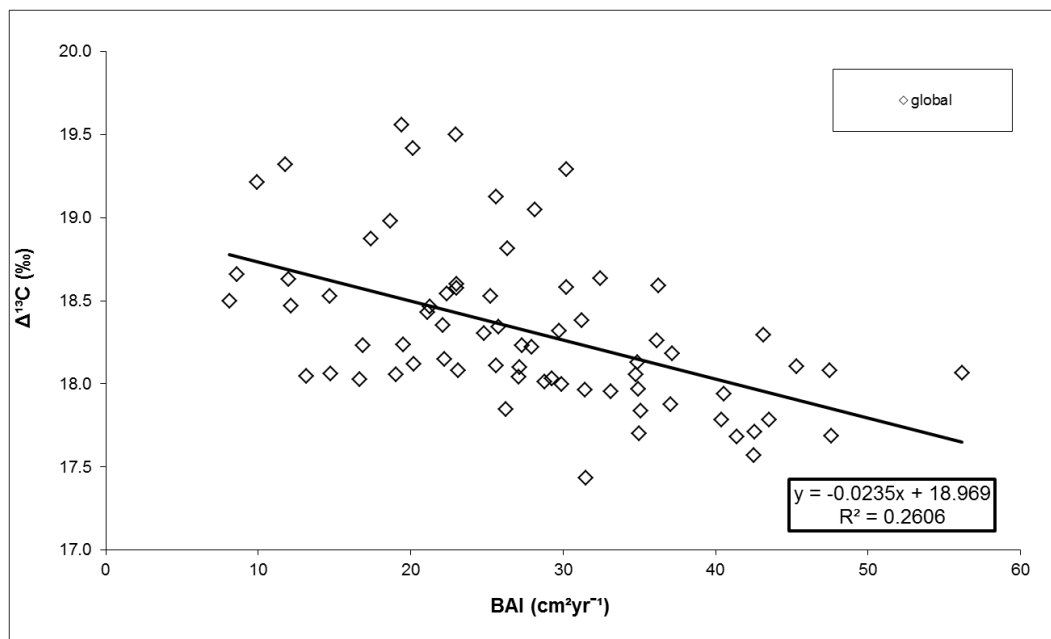


Figura 11. Regressione lineare globale ottenuta abbinando i valori di discriminazione isotopica dell'anno (n) con quelli di BAI dell'anno precedente (n-1).

E' da evidenziare come livelli elevati di $\Delta^{13}\text{C}$ tendano ad associarsi con livelli depressi di BAI.

Tuttavia, la stessa relazione appare più robusta analizzando insieme i dati di $\Delta^{13}\text{C}$ e BAI relativi alle sole popolazioni appenniniche ($r = -0.53$), mentre non si nota alcuna relazione per le sole faggete alpine ($r = 0.04$) (Fig.12). L'incremento di $\Delta^{13}\text{C}$ pari a 0.6‰ nella media delle faggete alpine rispetto alla media delle faggete appenniniche è indice delle condizioni più fresche ed umide della regione alpina. Implicazione ecofisiologica rilevante di questa osservazione riguarda il livello di efficienza d'uso idrico medio decennale, che sarebbe più elevato nelle faggete appenniniche rispetto alle alpine, indicando maggiori livelli di stress idrico. L'analisi delle regressioni lineari $\text{BAI}_{(n-1)}$ vs $\Delta^{13}\text{C}_{(n)}$, a scala quinquennale (periodo 1999-2003), che ci ha permesso di integrare il popolamento basale del Nimis e dunque di analizzare tutte le diverse fasce fitoclimatiche alpine, ha mostrato interessanti relazioni e coefficienti di correlazione (r). In particolare la regressione delle sole popolazioni alpine ha mostrato un trend fortemente positivo ($r = 0.78$), generato per lo più dagli

elevatissimi valori in BAI e $\Delta^{13}\text{C}$ riscontrati nel popolamento basale del Nimis (BAI = 55.7 cm^2 anno $^{-1}$; $\Delta^{13}\text{C}$ = 19.3 ‰) (Fig.13).

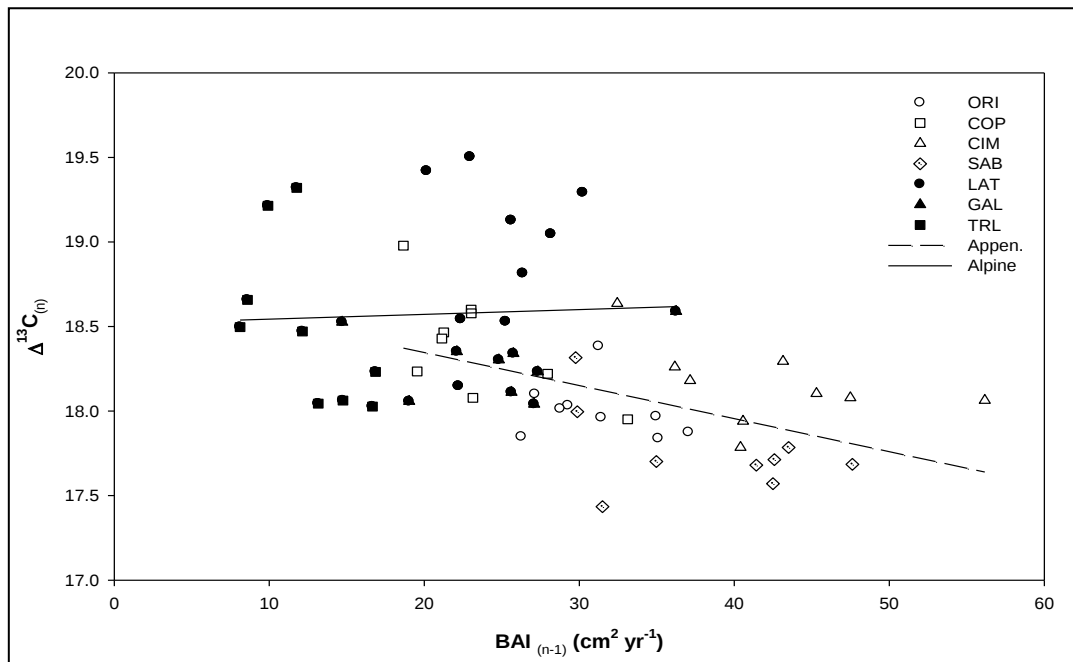


Figura 12. Relazioni tra i parametri BAI ($n-1$) dell'anno precedente e $\Delta^{13}\text{C}$ (n) dell'anno in corso, rilevati su serie annuali di dieci anni delle faggete studiate, delle Alpi (Lateis, Colle dei Galli, Trelli) e dell'Appennino centrale (Oriolo Romano, Coppo del Principe, Monte Cimino e Fonte Regna).

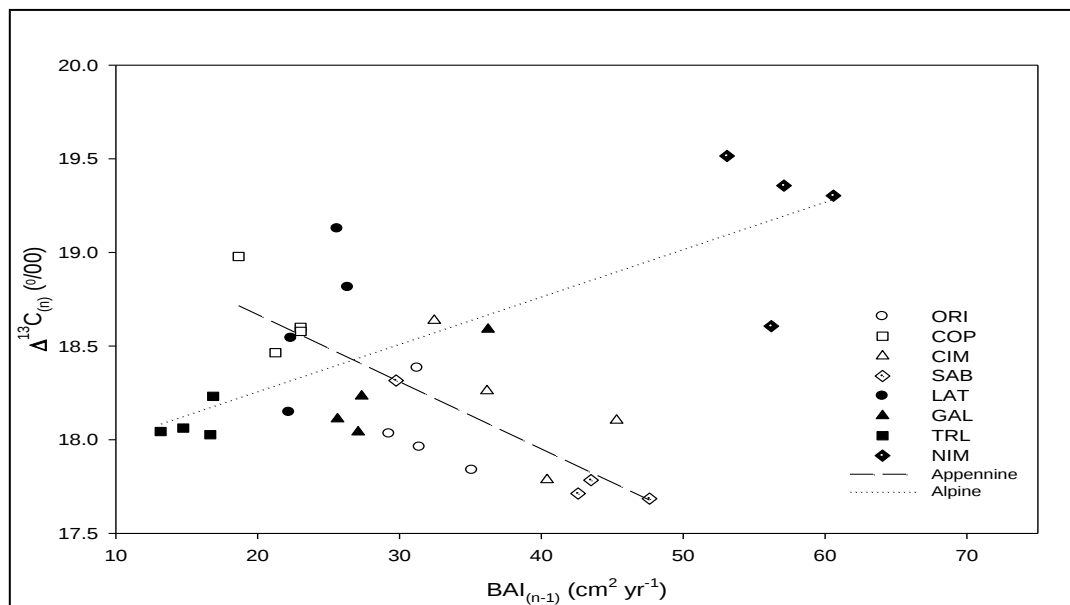


Figura 13. Relazioni tra i parametri BAI dell'anno precedente ($n-1$) e $\Delta^{13}\text{C}$ (n) dell'anno in corso, rilevati su serie annuali di cinque anni delle faggete studiate, delle Alpi (Lateis, Colle dei Galli, Trelli, e Nimis) e dell'Appennino centrale (Oriolo Romano, Coppo del Principe, Cimino e Fonte Regna).

Risultato interessante è scaturito dall'analisi di lungo periodo dei livelli di WUE effettuata sui siti di Lateis (alpino altimontano), di Coppo del Principe (appenninico altimontano) e di Fonte Regna (transizione da montano a basale), uniformati dal punto di vista del substrato (calcareo).

L'analisi ha evidenziato come il sito altimontano appenninico di Coppo del Principe abbia affiancato ad un trend stabile di BAI dei livelli di discriminazione isotopica costanti nel tempo; al contrario il popolamento di transizione di Fonte Regna (REG) ha registrato una diminuzione dei livelli di BAI a cui si è affiancata una parallela diminuzione dei livelli discriminazione isotopica del carbonio (Fig.14). Il sito alpino di Lateis, a differenza dei precedenti, ha evidenziato una costanza nei trend di crescita affiancata ad un aumento dei livelli di $\Delta^{13}\text{C}$, ad indicare come a tali latitudini il fattore limitante la crescita siano le temperature e non tanto la disponibilità idrica.

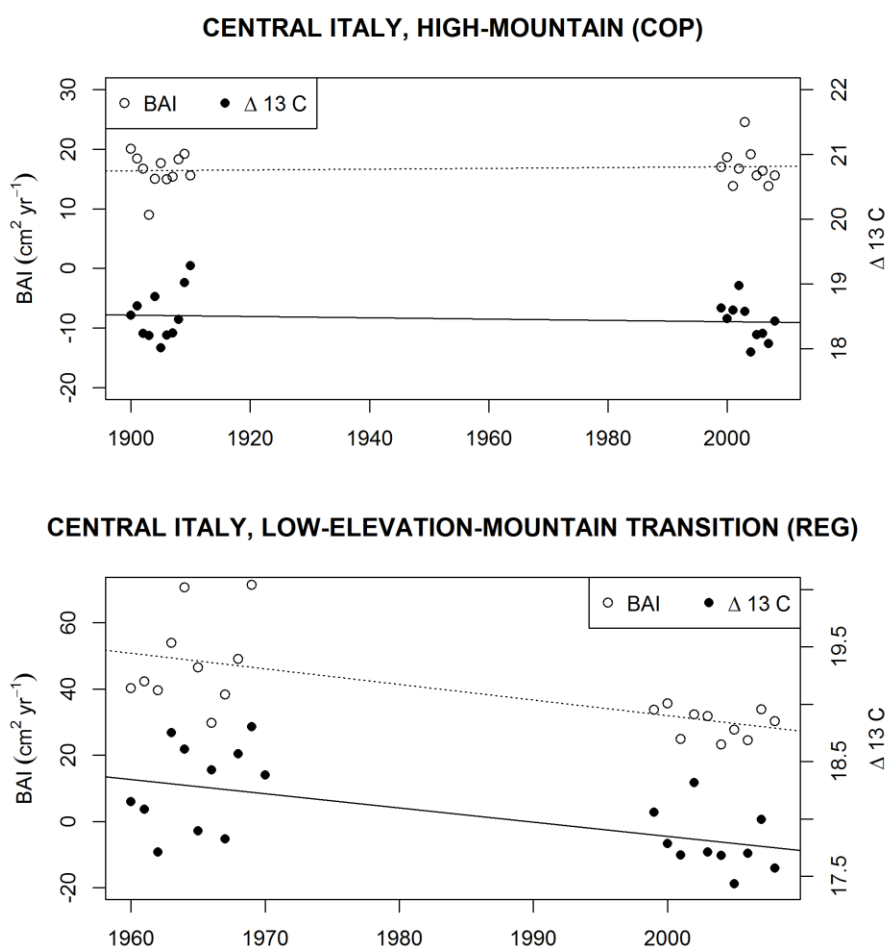


Figura 14. Produttività del faggio (BAI) vs. discriminazione del ^{13}C in una foresta vetusta primaria (sopra) e secondaria (sotto) in Italia centrale.

DISCUSSIONE

Le evidenze emerse dalle ricerche effettuate nel corso del triennio di studi hanno permesso di ipotizzare una profonda differenziazione delle limitazioni ambientali a cui sono sottoposte le faggete italiane lungo i principali gradienti ecologici latitudinali e altitudinali che interessano l'areale del faggio.

Lo studio ha infatti permesso di definire diverse caratteristiche dei popolamenti osservati all'interno della Rete Dendroecologica Nazionale.

In primo luogo si è definita l'età massima di tutti i siti che ha evidenziato una volta di più come sia proprio la quota il fattore geografico più importante nel determinare la longevità del faggio; questo soprattutto a causa dei ridotti ritmi di crescita che si hanno alle quote più elevate e che determinano una maggiore durabilità del legno, ma anche per il minor disturbo antropico che subiscono tali aree, essendo per lo più inaccessibili (*Di Filippo et al.*, 2012).

Al contrario le faggete ricadenti nelle fasce del piano basale e quello montano, sono tendenzialmente meno longeve in quanto godono di un periodo vegetativo più lungo che le porta a formare anelli di accrescimento più ampi ma meno durabili. Inoltre la loro vicinanza con centri abitati le ha rese maggiormente accessibili causandone un intenso sfruttamento nel corso del tempo.

A tal proposito di particolare importanza si sono dimostrati i vincoli di tutela applicati (Monte Cimino) e l'adozione di recinzioni utili per la salvaguardia di tali aree (Fonte Regna).

Lo stesso è stato osservato per le cosiddette “faggete bandite” delle Alpi Carniche dove, al di là della quota, lo svolgimento di un ruolo di foreste di protezione degli abitati ha avuto un ruolo di conservazione dell'ecosistema (*Di Filippo*, 2006).

L'analisi dendroclimatica, sia di alta che di bassa frequenza, ha evidenziato una profonda differenziazione di risposte tra bioclimate alpino e appenninico. Recentemente, alcuni autori hanno descritto una vera e propria divergenza di risposta tra i due biomi in relazione al riscaldamento climatico (*Di Filippo et al.*, 2012). Laddove le precipitazioni sono fattore limitante (Appennini) la

produttività tende a diminuire; sulle Alpi, invece, forse anche in congiunzione con deposizioni azotate, il riscaldamento ha favorito un incremento dei tassi di crescita.

Sia le funzioni di correlazione (FC) che le *spline* applicate ai popolamenti alpini ci hanno permesso di capire come, a prescindere dalla quota e dal tipo di gestione attuata, i dinamismi di tali faggete siano governati principalmente dal regime termico stagionale (Di Filippo et al., 2007). Dall'analisi di produttività delle *spline* le faggete altimontane e montane alpine hanno infatti mostrato generalmente trend di crescita positiva. Unica eccezione la faggeta montana di Trelli, l'unica ad una certa quota con trend di BAI negativi. Qui la pedologia (roccia di tipo dolomitico che produce suoli di minore fertilità) gioca un ruolo chiave nel determinare la risposta incrementale all'attuale riscaldamento. La fase di stasi produttiva di Trelli è giustificata anche dai livelli di discriminazione medi rilevati in tale sito risultati i più bassi, tra le faggete non gestite, dell'intero arco alpino ($\Delta^{13}\text{C} = 18.5\text{‰}$).

Nelle faggete basali alpine sono stati riscontrati i valori più elevati di $\delta^{13}\text{C}$ e BAI (Nimis), dovuti perlopiù a temperature molto favorevoli nella stagione vegetativa e ad una spiccata umidità del sito. Ciò nonostante tale sito, mostra all'attualità un rallentamento dell'incremento dei tassi di BAI. Come evidenziato dalle FC, questa fascia bioclimatica oggi presenta primi segnali di stress idrico estivo, così come tutti i siti appartenenti al piano basale alpino. Si è osservata infatti una correlazione con le precipitazioni dei mesi estivi, indice di primi segnali di stress legati a tale parametro, che evidenziano dunque risposte comuni ai siti a temperamento prettamente mediterraneo. Tale ipotesi è altresì rafforzata dai valori di discriminazione isotopica calcolati per il sito basale alpino del Nimis. Questa osservazione è corroborata da osservazioni simili fatte su faggete di bassa quota nel Nord-Est della Francia, in cui recentemente sono stati osservati i primi effetti negativi della siccità estiva (Charru et al., 2010).

Per quanto riguarda le faggete appenniniche preoccupanti sono risultate le risposte osservate.

La relazione inversa tra produttività (BAI) e riscaldamento della stagione estiva osservata nelle faggete appenniniche, caratterizzate da una spiccata mediterraneità, rivela la presenza di relazioni di

causa-effetto più complesse lungo il transetto altitudinale, con una maggiore variabilità di risposta tra popolamenti all'interno della fascia altimontana. Le osservazioni effettuate concordano comunque con studi precedenti effettuati su faggete mediterranee, che vedono soprattutto i popolamenti di media e bassa quota interessati da forti perdite di produttività (Penuelas et al, 2008; Piovesan et al., 2008)

In Italia centrale, i siti contraddistinti da condizioni stazionali più umidi e fertili (come sui suoli vulcanici laziali) spiegano gli elevati valori di BAI e di $\Delta^{13}\text{C}$ osservati ad esempio a Monte Cimino e Oriolo Romano, quest'ultimo caratterizzato anche da un'esposizione molto fresca del sito.

Al contempo il decremento di BAI è attribuibile ad una relativa limitazione idrica ($\Delta^{13}\text{C}$ ridotto) nella popolazione sabina di Fonte Regna, mentre il marcato decremento in BAI della faggeta altimontana appenninica di Coppo del Principe, associato a livelli relativamente alti di $\Delta^{13}\text{C}$, è attribuibile a temperature stagionali limitanti, piuttosto che a condizioni siccitose durante la stagione vegetativa.

L'analisi di lungo periodo, infine, conferma uno stato di progressiva esposizione a condizioni di stress idrico limitanti nelle situazioni appenniniche di bassa quota.

La sofferenza di queste faggete sembrerebbe riflettersi in un considerevole aumento di WUE nel lungo periodo, così come indicato dall'analisi della discriminazione isotopica del carbonio stabile. Limitazioni in termini di temperature elevate e carenza idrica sembrano non costituire, al contrario, un fattore di declino di crescita per le situazioni altimontane sia appenniniche che anzi si sono avvantaggiate del surriscaldamento climatico aumentando i propri tassi di crescita.

Questa resilienza fisiologica sarebbe concretizzata nella costanza dei trend di lungo periodo di WUE, che hanno evidenziato come siano proprio le faggete basali centro italiane a risentire in maggior misura di tale cambiamento climatico generando un campanello di allarme preoccupante in relazione alle previsioni climatiche future. In queste faggete, infatti, ai trend negativi di crescita si è affiancato un parallelo trend negativo di discriminazione isotopica, che dimostra l'aumento del livello di stress idrico a cui sono sottoposte. Studi analoghi effettuati in Catalogna, Spagna, hanno

già riportato simili evidenze nelle faggete di bassa quota (Penuelas et al., 2008; Penuelas et al., 2011).

Riguardo ai diversi livelli di naturalità delle faggete indagate si può affermare di come le migliori risposte in termini di acclimatamento ed adattamento si siano avute da quei sistemi ad elevato grado di naturalità (*old-growth* e, a seguire, *unmanaged*), soprattutto delle fasce basali e montane appenniniche, che sono state in grado di auto-organizzarsi e di raggiungere una miglior stabilità strutturale rispetto ai sistemi gestiti.

CONCLUSIONI

Il metodo dendroclimatico si è dimostrato un valido strumento per lo studio delle variazioni di crescita delle faggete italiane, riuscendo a cogliere fedelmente la variabilità del clima nel nostro paese e l'effetto che essa ha sulla crescita arborea.

La sua affidabilità è stata confermata, oltre che dalla concordanza di risposte con le regioni climatiche identificate sul territorio italiano, anche dalla successiva analisi dei livelli di WUE.

I cambiamenti tracciati possono fornire valide informazioni sui cambiamenti bioclimatici che stanno interessando le nostre foreste, e che potrebbero sfociare in futuro in veri e propri fenomeni di *shift* bioclimatico (Jump et al., 2009) o di deperimento forestale (Allen)

Uno dei maggiori pregi dell'approccio dendroclimatico è dato dalla sua oggettività, fondata sul fatto che il legame pianta - clima è qui rappresentato direttamente dal rapporto clima - accrescimento arboreo, integrante l'osservazione della vegetazione e quello del clima, palesato per mezzo del processo di calibrazione.

Allo stesso modo risulta altrettanto oggettiva l'analisi ecofisiologica, in grado di valutare la quantità di carbonio organicato per unità di acqua traspirata, registrata appunto dalla stessa pianta sia nel breve che nel lungo periodo.

In particolare con l'integrazione delle due metodologie si è riusciti a identificare direttamente il fattore climatico che guida la crescita (il segnale climatico), isolandolo e ponendolo al centro delle distinzioni fra popolamenti, si sono altresì identificate le popolazioni maggiormente soggette a stress idrici grazie ai livelli di discriminazione calcolati, che hanno confermato le risposte dello studio dendroclimatico.

In futuro sarà sicuramente di primaria importanza espandere la Rete Dendroecologica andando a coprire le aree ancora non studiate in modo da fornire una migliore continuità ed omogeneità di campionamento: i punti prioritari cadranno sicuramente nelle aree sensibili, come il settore

compreso tra l'Appennino Settentrionale e le Alpi Marittime, al fine di poter raggiungere una migliore caratterizzazione dell'area di transizione tra la zona mediterranea e quella medioeuropea, ma interesseranno anche quei settori della regione alpina, come quello centrale e quello occidentale, attualmente poco o nulla rappresentati all'interno della Rete, in cui dominano attualmente i popolamenti del settore orientale.

Vista l'importanza e la scarsità dei dati riguardanti il ruolo adattativo ed acclimatativo del carattere WUE per le formazioni forestali nazionali, è auspicabile che ogni campionamento futuro prenda in considerazione anche tale parametro ecofisiologico. La costituzione di un database, strutturato spazialmente e cronologicamente sulle dinamiche di WUE di tutti i popolamenti della Rete, favorirebbe la miglior comprensione delle risposte adattative in atto all'interno del territorio nazionale, permettendo di identificare dei modelli completi per la pianificazione e gestione sostenibile di tali siti.

BIBLIOGRAFIA

AA.VV., (2008). Alla scoperta di una foresta vetusta: La Faggeta di Soriano nel Cimino. Provincia di Viterbo, 66 pp.

Alessandrini A., (2003). La foresta vetusta della Val Cervara. Caratterizzazione ecologica e strutturale. Tesi di laurea in Scienze Forestali e Ambientali. Università degli studi della Tuscia, facoltà di Agraria. Dipartimento di Tecnologie, Ingegneria e Scienze dell'Ambiente e delle Foreste.

Alessandrini A., Blasi S., Biondi F., Chiocchini U., Di Filippo A., Eusepi G., Piovesan G. e G. Santarelli, 2008. Geopedologia, auxologia e dendroclimatologia di un ceduo. Alberi e Territorio, 6: 14-18. (ISSN 1724-4021).

Allen, C.D., A.K. Macalady, H. Chenchouni, D. Bachelet, N. McDowell, M. Vennetier, T. Kizberger, A. Rigling, D.D. Breshears, E.H. Hogg, P. Gonzalez, R. Fensham, Z. Zhang, J. Castro, N. Demidova, J.H. Lim, G. Allard, S.W. Running, A. Semerci, and N. Cobb (2010). A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests. *Forest ecology and management* 259: 660-684.

Aniol R.W., (1983). Tree-ring analysis using CATRAS. *Dendrochronologia* 1: 45-53

Aniol R.W., (1987). A new device for Computer Assisted Measurement of tree-ring Widths. *Dendrochronologia* 5: 135-141.

Bernabei M., Lo Monaco A., Piovesan G., Romagnoli M., 1996. Dendrocronologia del faggio sui Monti Sibini (Rieti). *Dendrocronologia* 14: 59-70.

Biondi F., Waikul K., 2004. DENDROCLIM2002 : A C++ program for statistical calibration of climate signals in tree-ring chronologies. *Computer and geosciences* 30, 303-311.

Blasi C., 1994. Il fitoclima del Lazio. *Fitosociologia* 27: 151-175.

Brunetti M., Maugeri M., Monti F., Nanni T., 2006. Temperature and precipitation variabilità in Italy in the last two centuries from homogenised instrumental time series. *International Journal of Climatology*.

Carrer, M. & Urbinati, C. (2006) Long-term change in the sensitivity of tree-ring growth to climate forcing in *Larix decidua*. *New Phytologist*, 170, 861–872.

Cook, E.R. & Holmes, R.L. (1986) Users Manual for Program ARSTAN. Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona, Tucson, USA.

Cook, E.R. & Kairiukstis, L.A. (1990) *Methods of Dendrochronology: Applications in Environmental Science*. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, pp. 104–123.

Cook, E.R. & Peters, K. (1981) The smoothing spline: a new approach to standardizing forest interior tree-ring width series for dendroclimatic studies. *Tree-Ring Bulletin*, 41, 45-53.

- Charru M, Seynave I, Morneau F, Bontemps J-D (2010) Recent changes in forest productivity: an analysis of national forest inventory data for common beech (*Fagus sylvatica* L.) in north-eastern France. *Forest Ecology and Management*, 260, 864–874.
- Fritts, H. C., and T. W. Swetnam. 1989. Dendroecology: A tool forevaluating variations in past and present forest environments. *Advances in Ecological Research* 19:111-188.
- La Marca O., 1999. *Elementi di Dendrometria*, Patron.
- La Marca, O. (2004) *Elementi di dendrometria*. Patron Editore, Padova, Italy.
- Lauteri M., Monteverdi M.C., Sansotta A., Küçük M., Cherubini M., Spaccino L., Villani F., 1999. Adaptation to drought in European chestnut. Evidences from a hybrid zone and from controlled crosses between drought and wet adapted populations. *Acta Horticulturae*, 494: 345-353.
- Lauteri M., Pliura A., Monteverdi M.C., Brugnoli E., Villani F., Eriksson G., 2004. Genetic variation in carbon isotope discrimination in six European populations of *Castanea sativa* Mill. originating from contrasting localities. *J. of Evol. Biol.*, 17: 1286-1296.
- Lauteri M., Scartazza A., Guido M.C., Brugnoli E., 1997. Genetic variation in photosynthetic capacity, carbon isotope discrimination and mesophyll conductance in provenances of *Castanea sativa* adapted to different environments. *Functional Ecology*, 11: 675-683.
- Read J., Farquhar G.D., 1991. Comparative studies in *Nothofagus* (Fagaceae). I. Leaf carbon isotope discrimination. *Functional Ecology*, 5: 684-695.
- Scartazza A., Mata C., Matteucci G., Yakir D., Moscatello S., Brugnoli E., 2004. Comparisons of $\delta^{13}\text{C}$ of photosynthetic products and ecosystem respiratory CO_2 and their responses to seasonal climate variability. *Oecologia*, 140: 340-351.
- Leavitt Steven W. Prospects for reconstruction of seasonal environment from tree-ring $\delta^{13}\text{C}$: baseline findings from the Great Lakes area, USA.
- Liñán Isabel Dorado, Emilia Gutiérrez, Gerhard Helle, Ingo Heinrich, Laia Andreu, Hayles, Octavi Planells, Markus Leuenberger, Carmen Bürger, Gerhard Schleser. Pooled versus separate measurements of tree-ring stable isotopes. *Science of the Total Environment* 409 (2011) 2244–2251.
- Linares, J.C., Delgado-Huertas, A., Camarero, J.J., Merino, J. & Carreira, J.A. (2009) Competition and drought limit the response of water-use efficiency to rising atmospheric carbon dioxide in the Mediterranean fir *Abies pinsapo*. *Oecologia*, DOI 10.1007/s00442-009-1409-7.
- McCabe, G.J., and Palaecki, M.A., 2006, Multidecadal climate variability of global lands and oceans: *International Journal of Climatology*, v. 26, no. 7, p. 849-865.
- McCarroll D., Neil J. Loader. Stable isotopes in tree rings. *Quaternary Science Reviews* 23 (2004) 771–801

- 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.
- Osborn T.J., Briffa K.R. (2006) The Spatial Extent of 20th-Century Warmth in the Context of the Past 1200 Years. *Science* 311: 841-844.
- J., Sardans J., Llusà J., Owen S., Carnicer J., Giambelluca T.W., Rezende E.L., Waite M., Niinemets Ü. 2009. Faster returns on "leaf economics" and different biogeochemical niche in invasive compared with native plant species. *Global Change Biology* doi: 10.1111/j.1365-2486.2009.02054.x.
- J., Rutishauser T., Filella I. 2009. Phenology Feedbacks on Climate Change. *Science* 324: 887-888.
- Jump A. S., C. Mátyás, and J. Peñuelas. (2009). The altitude-for-latitude disparity in the range retractions of woody species. *Trends in Ecology and Evolution*. 24: 694-701
- Peñuelas J, Hunt JM, Ogaya R, Jump AS (2008) Twentieth century changes of tree-ring $\delta^{13}C$ at the southern range-edge of *Fagus sylvatica*: increasing water-use efficiency does not avoid the growth decline induced by warming at low altitudes. *Global Change Biology*, 14, 1076–1088.
- Peñuelas J, Canadell JG, Ogaya R (2011) Increased water-use efficiency during the 20th century did not translate into enhanced tree growth. *Global Ecology and Biogeography*, 20, 597–608.
- Pignatti S., 1982, *Flora d'Italia*, Edagricole
- Pignatti S., 1997, *Ecologia del paesaggio*, UTET.
- Pignatti S., 1998, *I Boschi D'Italia*, *Sinecologia e biodiversità*, UTET.
- Piovesan G., Alessandrini A., Baliva M., Chiti T., D'Andrea E., De Cinti B., Di Filippo A., Hermanin L., Lauteri M., Scarascia Mugnozza G., Schirone B., Ziacco E., Matteucci G. (2010) Structural patterns, growth processes, carbon stocks in an Italian network of old-growth beech forests *Italia Forestale e Montana* (Italian Journal of Forest and Mountain Environments): vol. 65, n° 5, pp. 557-590. doi: 10.4129/ifm.2010.5.07
- Piovesan, G. & Schirone, B. (2000) Winter North Atlantic Oscillation effects on the tree rings of the Italian beech (*Fagus sylvatica* L.). *International Journal of Biometeorology*, 44, 121, 127.
- Piovesan, G., Biondi, F., Di Filippo, A., Alessandrini, A. & Maugeri, M. (2008) Drought-driven growth reduction in old beech (*Fagus sylvatica*) forests of the central Apennines, Italy. *Global Change Biology*, 14, 1-17.
- Romagnoli, M. & Codipietro, G. (1996) Pointer years and growth in Turkey oak (*Quercus cerris* L) in Latium (central Italy). A dendroclimatic approach. *Annals of Forest Science*, 53, 671-684.
- Schwartz M.D., Ahas R., Aasa A. (2006) Onset of spring starting earlier across the Northern Hemisphere. *Global Change Biology* 12: 343-351

Schweingruber, F.H. (1996) Tree rings and environment dendroecology. Swiss Federal Institute of Forest, Snow and Landscape Researches, WSL/FNP, Birmensdorf.

Valentini R., Matteucci G., Dolman A.J., Schulze E.-D., Rebmann C., Moors E.J., Granier A., Gross P., Jensen N.O., Pilegaard K., Lindroth A., Grelle A., Bernhofer Ch., Grünwald T., Aubinet M., Ceulemans R., Kowalski A.S., Vesala T., Rannik Ü., Berbigier P., Loustau D., Guðmundsson J., Thorgeirsson H., Ibrom A., Morgenstern K., Clement R., Moncrieff J., Montagnani L., Minerbi S., Jarvis P.G. (2000). Respiration as the main determinant of carbon balance in European forests. *Nature*, 404: 861-865.

RINGRAZIAMENTI

Desidero ringraziare tutte le persone che mi hanno accompagnato in questi tre anni di dottorato.

Innanzitutto Manuela, unica nel potermi sopportare prima e durante la stesura della tesi. I miei genitori, mio fratello e Claudia, che mi sono sempre stati vicini. Poi tutti gli amici, vicini e lontani, compagni di sventura e avventura nelle lunghe giornate viterbesi.

Un ringraziamento particolare va a Marco Lauteri per gli insegnamenti ricevuti durante il triennio di studi, così come al Prof. Piovesan ed al mitico ed unico Alfred per i consigli e la fiducia datami.