



Porano, 10/03/2022

Rapporto scientifico conclusivo inerente le attività di ricerca del CNR-IRET nell'ambito del progetto ACARO

1.Introduzione

1.1 Mitigazione e adattamento delle foreste ai cambiamenti climatici

Le foreste hanno un ruolo fondamentale per la lotta ai cambiamenti climatici, grazie alla loro capacità mitigativa superiore a quella degli altri ecosistemi terrestri. La mitigazione può avvenire attraverso 3 processi:

1. Assorbimento di CO₂ direttamente dall'atmosfera e successiva fissazione nella biomassa;
2. Riduzione delle emissioni di CO₂ provenienti da incendi o deforestazioni;
3. Fornitura di materiali lignocellulosici che possono sostituire materiale di origine fossile per la produzione di energia oppure come materia prima per la produzione di beni durevoli al posto di materiale più inquinante (ad esempio utilizzo del legno nelle costruzioni al posto del cemento).

Si deve considerare che la capacità mitigativa delle foreste non è costante ed è molto influenzata dalle risposte e soprattutto dall'adattamento ai cambiamenti climatici.

L'adattamento può avvenire in modo naturale, come caratteristica intrinseca delle piante, ma può anche essere guidato attraverso strategie di gestione delle risorse forestali. E' necessario adottare pratiche gestionali efficaci che riducano la vulnerabilità delle foreste, promuovano la salute del bosco aumentandone la resilienza.

Ad oggi poco si sa sulla risposta fisiologica degli alberi al diradamento e all'aumento delle temperature. In particolare, è di grande importanza studiare l'impatto del diradamento sull'efficienza dell'uso dell'acqua, sull'efficienza fotosintetica e sulla crescita degli alberi soprattutto nelle regioni d'Italia dove la disponibilità idrica è spesso limitante per la produttività.

1.2 La discriminazione isotopica del carbonio

CNR-IRET - Via G. Marconi 2, 05010 Porano (TR), ITALIA

Tel. +39 0763-37491 Fax: +39 0763-374980

e-mail: segreteria@iret.cnr.it pec: protocollo.iret@pec.cnr.it web: www.iret.cnr.it



L'analisi degli isotopi stabili del carbonio fornisce la metodologia più innovativa, efficace e non invasiva per lo studio dell'efficienza di uso idrico (WUE) in ambienti naturali. 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 durante il processo fotosintetico discriminano contro la $^{13}\text{CO}_2$ atmosferica rispetto alla $^{12}\text{CO}_2$ in quanto il ^{13}C ha una più bassa velocità di diffusione attraverso gli stomi ed una minor velocità di reazione con l'enzima fotosintetico Rubisco (1.5- ribuloso-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 concentrazioni intercellulare ed atmosferica di CO_2 (C_i/C_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).

1.3 Progetto ACARO

L'obiettivo generale del progetto ACARO è la realizzazione di un modello prototipale per la gestione del rischio delle superfici boscate in adattamento ai cambiamenti climatici e la definizione di azioni di resilienza. Il CNR-IRET è responsabile delle analisi climatiche e della valutazione delle risposte ecofisiologiche ai cambiamenti climatici delle principali specie forestali dell'area di studio. In questo contesto, abbiamo confrontato le dinamiche di crescita e le caratteristiche di utilizzo dell'acqua di cerro (*Quercus cerris* L.) e faggio (*Fagus Sylvatica*), due specie forestali che crescono nelle zone collinari, delle aree interne del sud-ovest dell'orvietano.

L'obiettivo di queste attività è individuare i fattori climatici che influenzano la fisiologia e la produttività di queste specie, in modo da poter predire la loro futura risposta ai cambiamenti in corso.



2. Materiali e metodi

2.1 Siti di studio

L'area di studio è un complesso alto-collinare morfologicamente uniforme, inciso da torrenti e fossi che vanno a confluire nel Fiume Chiani e nel Fiume Paglia. Le due cime più alte sono quella del Monte Spano (617 m slm) e del Poggio Spino (810 m slm). I corsi d'acqua costituiscono una densa ed articolata rete idrografica che incide più o meno profondamente, in relazione al sub-strato geologico ed alla morfologia. Tale conformazione è la principale causa del limitato utilizzo ai fini agricoli cui l'area è stata sottoposta, di conseguenza la causa principale del valore ambientale, paesaggistico e naturalistico che la stessa ha conservato.

Il paesaggio del Complesso di Monte Peglia e Selva di Meana è caratterizzato da estese formazioni boschive, in prevalenza costituite da cedui di cerro e di leccio, a cui nelle aree più fresche e umide si affiancano il carpino, la rovere, il castagno. Lungo i versanti più soleggiate dove la cerreta acquista un maggior grado di termofilia, aumentano la roverella e l'orniello, fino alla comparsa di specie mediterranee arbustive sempreverdi come l'erica arborea, la fillirea, il corbezzolo. Inoltre nel comune di Castel Viscardo è interessante dal punto di vista ecologico naturalistico la presenza di un lembo di faggeta depressa, formazione che si trova a quote più basse del normale.



Figura 1. Siti di studio delle aree interne del sud ovest Orvietano. A sinistra Selva di Meana, al centro Borgo San Faustino, a destra Castel Viscardo.

2.2 Analisi dendrocronologiche

Nel 2021, 10 piante di faggio, 10 di cerro e 10 di pino domestico sono state campionate nei diversi siti per le analisi degli accrescimenti degli anelli legnosi. Le piante sono state carotate ad un'altezza di circa 1,3 m con un carotatore di 0,5 cm di diametro. Le carote sono state conservate in ambiente asciutto, dove sono state lasciate all'aria ed in seguito levigate. Le ampiezze degli anelli sono state misurate con una risoluzione di 0,01 mm, utilizzando il LINTAB 6.0 accoppiato a uno stereo



microscopio (ingrandimento 60×, Leica, Germania), attraverso il software Time Series Analysis Program (TSAP) (Frank Rinn, Heidelberg, Germania). A causa della probabile presenza di falsi anelli e di anelli mancanti, comunemente presenti negli alberi della regione mediterranea (Cherubini et al. 2003), è stata prestata attenzione al fine di garantire la corretta datazione di ogni anello.



Figura 1. Procedimento per le analisi dendrocronologiche, a sinistra prelievo della carota legnosa, al centro preparazione della carota, a destra lettura della carota con il LINTAB 6.

Le serie di dati grezzi sono state analizzate seguendo il classico approccio dendrocronologico. Innanzitutto, si è proceduto ad effettuare una standardizzazione dei dati di ciascuna pianta campionata al fine di evitare gli effetti del lungo periodo, dovuti all'età che porta ad una progressiva diminuzione dello spessore anulare in un albero adulto. La standardizzazione produce parametri (*Ring Widths Index*, RWI) comparabili e compatibili, ossia ogni albero ha lo stesso peso nella costruzione della cronologia media del sito. Questa cronologia media sarà utilizzata in seguito per le analisi climatiche. Inoltre, per valutare la produttività è stato utilizzato l'incremento di area basimetrica (BAI) che è strettamente correlato all'incremento di volume delle piante o del popolamento forestale (Phipps and Whiton 1988). Tale parametro viene calcolato come segue:

$$BAI = \pi (r_n^2 - r_{(n-1)}^2)$$

dove r è il raggio dell'albero e n è l'anno di formazione dell'anello dell'albero.

2.3 Analisi isotopiche

Le analisi isotopiche sono state eseguite sugli anelli delle carote legnose di cerro e faggio. La scelta è ricaduta su queste due specie per motivi differenti. Il cerro è la specie più diffusa nell'area di studio rivestendo anche un valore economico per la popolazione locale. Il faggio che vegeta a quote così basse rappresenta un'interessante fonte di informazione per lo studio dell'adattamento ai cambiamenti climatici.



Il pino domestico, vista la giovane età, non è stato considerato adatto per le analisi dendrofisiologiche tramite isotopi stabili. Infatti le analisi isotopiche sono influenzate in modo determinante dall'*age effect*. Questo effetto consiste in una serie di disturbi al segnale isotopico che derivano da cambiamenti del microclima (emissioni di CO₂ dal suolo, disponibilità di luce, temperatura) durante la maturazione della formazione forestale e da cambiamenti della fisiologia delle piante in crescita. Gli alberi utilizzati per le analisi isotopiche sono stati selezionati per la loro capacità di rappresentare il segnale più simile a quello dei popolamenti analizzati.

Per ciascun albero selezionato, dal 1981 al 2020, ogni singolo anello è stato tagliato manualmente. I campioni di ogni singolo anno sono stati macinati utilizzando un mulino IKA (IKA India Private Limited). La polvere risultante è stata pesata (circa 1,5 mg) con una microbilancia e chiusa in capsule di stagno. I rapporti isotopici del carbonio (¹³C/¹²C) degli anelli di legno sono stati misurati mediante uno spettrometro di massa isotopica (Isoprime, GV, Cheadle, UK) connesso ad un analizzatore elementare (Carlo Erba, NA1500, Milano, Italia).



Figura 3. Procedimento per le analisi isotopiche degli anelli di legno: a sinistra la macinatura del campione, al centro l'analizzatore elementare, a destra lo spettrometro di massa isotopica.

I risultati sono stati espressi come delta ($\delta^{13}\text{C}$) in ‰ rispetto allo standard Pee Dee Belemnite (PDB):

$$\delta^{13}\text{C}_{\text{sample}} = \left[\frac{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{sample}}}{(^{13}\text{C}/^{12}\text{C})_{\text{V-PDB}}} - 1 \right] \times 1000$$

Dove ¹³C/¹²C è il rapporto isotopico del campione e dello standard internazionale Vienna-Pee Dee Belemnite (VPDB).

Successivamente abbiamo calcolato la discriminazione isotopica del carbonio ($\Delta^{13}\text{C}$), la concentrazione di CO₂ intercellulare (C_i) e l'efficienza di uso idrico intrinseca (iWUE). Il $\Delta^{13}\text{C}$ è stato



calcolato (Farquhar et al. 1982) utilizzando i valori di $\delta^{13}\text{C}$ pubblicati per l'aria da misurazioni di carote di ghiaccio, misurazioni atmosferiche dirette e dedotte da piante C_4 (McCarroll & Loader 2004).

$$\Delta^{13}\text{C} = (\delta^{13}\text{C}_{\text{air}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{plant}}) / (1000 - \delta^{13}\text{C}_{\text{plant}}) * 1000$$

Poiché il $\Delta^{13}\text{C}$ è correlato alla C_i e alla concentrazione di CO_2 atmosferica (C_a) dalla seguente equazione:

$$\Delta^{13}\text{C} \text{ ‰} = a + (b - a)(\text{C}_i/\text{C}_a)$$

dove a è la discriminazione contro $^{13}\text{CO}_2$ durante la diffusione della CO_2 attraverso gli stomi ($a=4,4\text{‰}$, Farquhar et al. 1982), b è la discriminazione associata alla carbossilazione ($b=27\text{‰}$, Farquhar et al. 1982),

abbiamo determinato C_i , usando l'equazione di (Francey & Farquhar 1982):

$$\text{C}_i = \text{C}_a (\delta^{13}\text{C}_{\text{plant}} - \delta^{13}\text{C}_{\text{air}} + a) / (a - b)$$

Infine, abbiamo calcolato $i\text{WUE}$ come

$$i\text{WUE} = \text{C}_a (b - \Delta^{13}\text{C}) / (1.6 (b - a))$$

2.4 Scenari climatici

I modelli climatici, considerando una gamma di possibili scenari di emissione di gas serra, producono proiezioni di cambiamenti incessanti nel corso del 21° secolo.

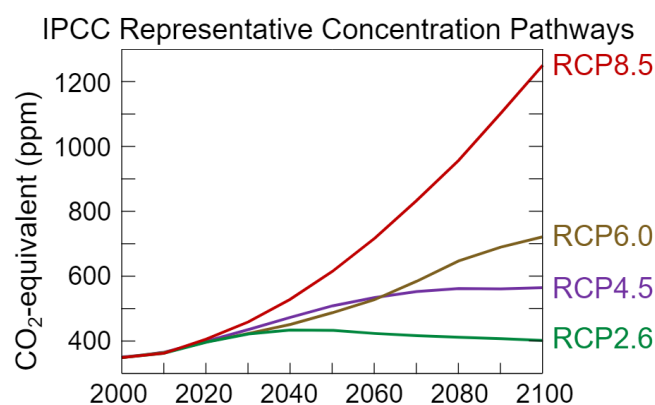


Figura 4. Previsioni climatiche di concentrazione di CO_2 nei diversi scenari RCP (Representative Concentration Pathways).



I Percorsi Rappresentativi di Concentrazione (Representative Concentration Pathways, RCP) sono scenari climatici espressi in termini di concentrazioni di gas serra piuttosto che in termini di livelli di emissioni. Il numero associato a ciascun RCP si riferisce al Forzante Radiativo (Radiative Forcing – RF) espresso in unità di Watt per metro quadrato (W/m^2) ed indica l'entità dei cambiamenti climatici antropogenici entro il 2100 rispetto al periodo preindustriale. Ciascun RCP mostra una diversa quantità di calore addizionale immagazzinato nel sistema Terra quale risultato delle emissioni di gas serra.

In particolare, tra gli scenari IPCC principalmente adottati per effettuare le simulazioni climatiche ad alta risoluzione si propongono:

- RCP 8.5 (comunemente associato all'espressione “Business-as-usual”, o “Nessuna mitigazione”) – crescita delle emissioni ai ritmi attuali. Tale scenario assume, entro il 2100, concentrazioni atmosferiche di CO_2 triplicate o quadruplicate (840-1120 ppm) rispetto ai livelli preindustriali (280 ppm).
- RCP 2.6 (“Forte mitigazione”) – assume la messa in atto di alcune iniziative per controllare le emissioni. Sono considerati scenari di stabilizzazione: entro il 2070 le emissioni di CO_2 scendono al di sotto dei livelli attuali e la concentrazione atmosferica si stabilizza, entro la fine del secolo, a circa il doppio dei livelli preindustriali.

Per creare gli scenari locali ad alta risoluzione è stato utilizzato il Climate Downscaling Tool (ClimateDT). Il sistema funziona su una griglia di 1 km utilizzando un'interpolazione spaziale di CRU-TS per il clima storico (1901-ora) e il set di dati UKCP18 per proiezioni future (attuale-2098).

2.5 Analisi statistiche

La relazione tra iWUE e crescita con le variabili climatiche di ciascuna specie sono state calcolate utilizzando correlazioni bootstrap e la significatività statistica è stata fissata a un valore $P \leq 0,05$. Nell'analisi, abbiamo considerato la temperatura media massima mensile e le somme mensili delle precipitazioni da giugno dell'anno precedente a settembre dell'anno di crescita in corso.

Inoltre è stata utilizzata una communality analysis (CA) ad una regressione lineare multipla ($iWUE = aT_{mean} + bCa + cPP$, dove T_{max} è la media delle massime della stagione vegetativa, Ca è la concentrazione di CO_2 atmosferica, PP è la somma delle precipitazioni) per discriminare delle variabili sull'iWUE. Questo tipo di analisi divide la varianza in effetti puri e combinati dei predittori, in modo da calcolare il contributo relativo di ogni predittore alla varianza spiegata della variabile



dipendente (Huang et al. 2017). Questa analisi è stata applicata alle differenze di primo ordine della serie per analizzare le fluttuazioni di iWUE (Tsonis et al. 2015).

3. Risultati

3.1 Scenari climatici

La figura 5 mostra gli scenari climatici per l'area di studio fino alla fine del secolo corrente. Nel pannello superiore si nota una grande differenza tra i due scenari (RCP 2.6 e RCP8.6) nelle proiezioni delle temperature medie annuali. In entrambi gli scenari si nota che a fine secolo le proiezioni indicano un aumento della temperatura superiore ai 2°C, limite stabilito nell'accordo di Parigi per evitare pericolosi cambiamenti climatici.

Le precipitazioni della stagione vegetativa (aprile-ottobre) stanno subendo una riduzione nel corso del secolo. Per quanto riguarda le proiezioni future si potrebbe assistere ad una frenata di questa riduzione in entrambi gli scenari, che non mostrano differenze marcate.

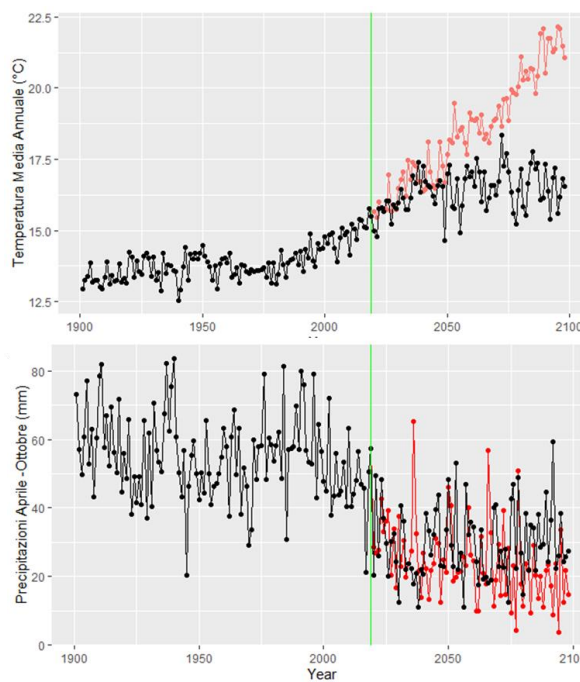


Figura 5. Scenari climatici locali. Nel pannello superiore: l'andamento delle Temperature medie annuali. Nel pannello inferiore: l'andamento delle precipitazioni primaverili-estive. In rosso, RCP (Percorsi Rappresentativi di Concentrazione) 8.6 e in nero RCP 2.6. La linea verde rappresenta l'anno 2020.



3.2 Analisi Dendroecologiche

In tutti i siti il cerro è stato campionato all'interno di cedui, storicamente gestiti. Questo ha portato alla selezione di alberi relativamente giovani con un'età massima intorno agli 80 anni ed una media di 60 anni. La forte pressione sui popolamenti, rappresentata dalle ceduazioni, è visibile dall'andamento ciclico della crescita, in cui si alternano periodi di stimolazione e declino della stessa. Questi cicli hanno la durata di circa 20 anni, equivalenti al turno dei cedui di cerro. Quindi si nota un aumento della crescita dopo il taglio e una successiva diminuzione dovuta all'aumento di competizione (Figura 6, 7 e 8).

Per quanto riguarda il faggio depresso di Castel Viscardo, si è osservata la fase di rilascio (forte crescita) tra gli anni 60 e 80 del secolo scorso, seguita da una fase di rallentamento della crescita a cavallo del 2000, con una ripresa della crescita nell'ultimo decennio.

Gli individui di pino domestico campionati sono molto giovani, anche se di grosse dimensioni, avendo un'età media di circa 30 anni. Dopo aver mostrato una crescita stabile, si comincia ad osservare un declino nell'ultimo periodo, probabilmente per la mancanza di cure colturali (diradamento). Per questa specie sarà difficile ottenere informazioni sulla loro risposte fisiologiche sia per il breve periodo di crescita, sia per la presenza di solo legno giovanile che influenza fortemente la composizione isotopica degli anelli legnosi (*age effect*).

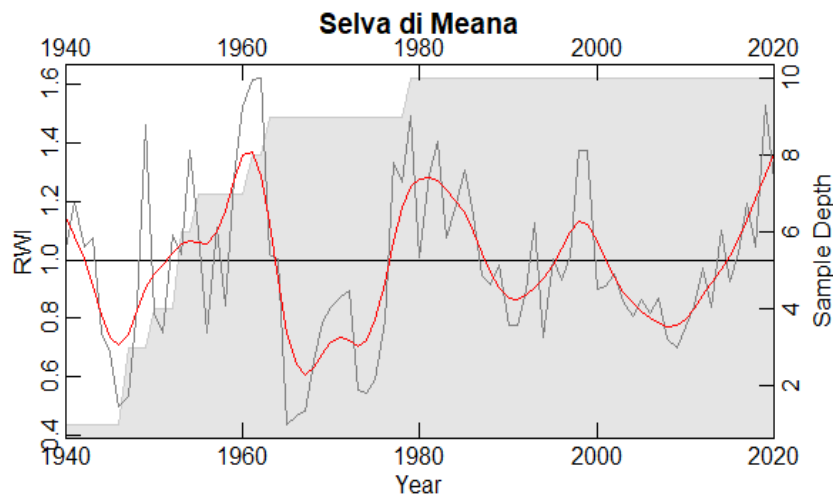


Figura 6. Andamento della crescita standardizzata del cerro di Selva Meana

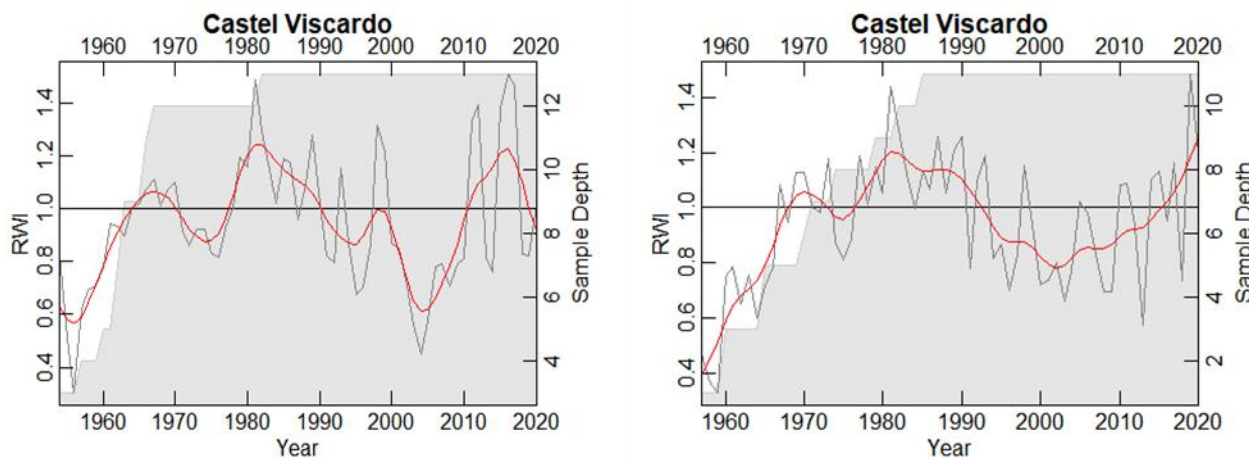


Figura 7: Andamento della crescita standardizzata del cerro (sinistra) e del faggio (destra) di Castel Viscardo

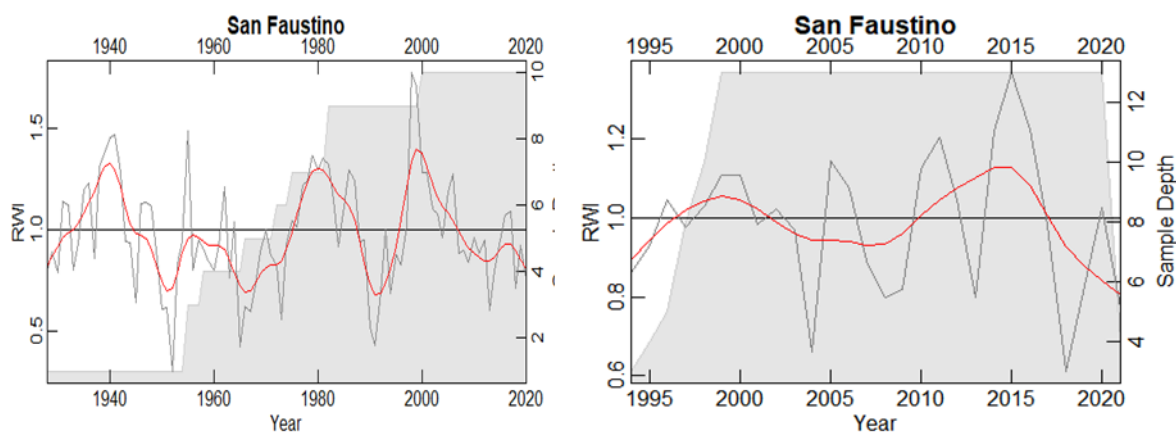


Figura 8. Andamento della crescita standardizzata del cerro (sinistra) e del pino domestico (destra) di San Faustino

3.3 Crescita e Clima

Dopo aver creato una cronologia media per il cerro è stato possibile individuare quali fattori climatici influenzano la crescita della specie nell'area di studio. La serie cronologica creata era relativamente corta e per questo ci si aspettava un segnale climatico molto debole anche per il forte impatto del riscoppio vegetativo dalle ceppaie. La crescita del cerro sembra essere influenzata dalle condizioni climatiche dell'anno di crescita precedente (Figura 9). Nello specifico la crescita radiale è influenzata positivamente dalle piogge di inizio estate dell'anno di crescita precedente. Un fattore dominante è la temperatura massima dei mesi estivi che ad oggi rappresenta il maggior fattore che limita la crescita di tale specie (Rezaie et al., 2018). Queste condizioni climatiche estive sono determinanti per la



crescita del cerro perché si verificano nel momento di allocazione del carbonio negli organi di riserva. Si intuisce che un clima favorevole rappresentato dalle piogge estive e da temperature miti porta ad una maggiore crescita. Al contrario temperature estive troppo elevate creano uno stress alle piante che impedisce loro di immagazzinare il carbonio di riserva a discapito della crescita nell'anno successivo. Queste dinamiche sono legate alla fisiologia del cerro, che come tutte le specie a porosità anulare, per sostenere la crescita all'inizio della stagione vegetativa utilizza le riserve di carbonio immagazzinate nell'anno precedente.

Per quanto riguarda il faggio, un effetto positivo sulla crescita è dato dalle precipitazioni del mese di giugno dell'anno precedente (Figura 10), quando il risveglio vegetativo, ormai avviato, richiede un'intensa attività metabolica. Anche in questo caso si può parlare di effetto memoria, ossia dell'influenza della stagione precedente sulla crescita. L'importanza della stagione precedente è stata dimostrata nelle aree meridionali di distribuzione del faggio (Hacket-Pain et al., 2016). Infatti il faggio è noto come specie altamente sensibile alla siccità, soprattutto a quote basse nel sud Europa (Di Filippo et al. 2007).

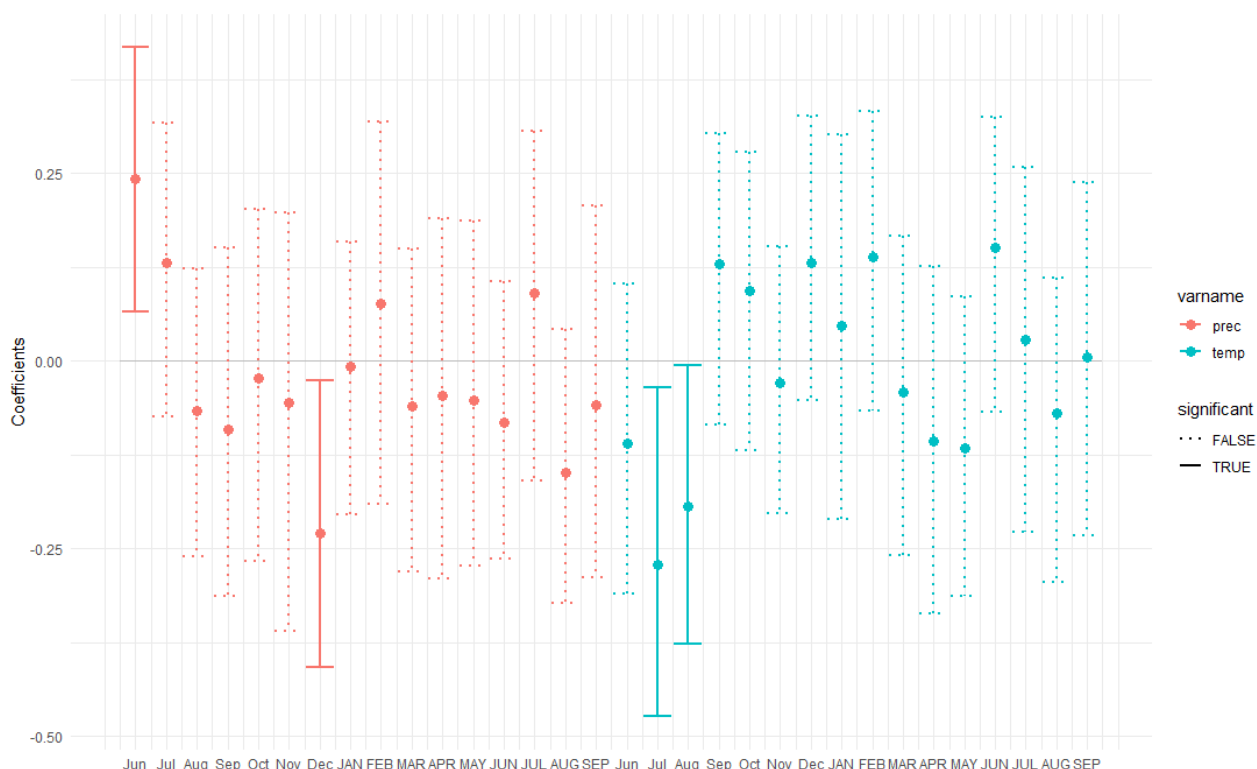


Figura 9. Correlazioni tra RWI e Variabili climatiche per il cerro, in rosso le precipitazioni mensili e in blu la temperatura massima da giugno dell'anno precedente a settembre della stagione in corso.



Le linee continue rappresentano correlazioni significative ($P\text{-value} < 0.05$). I mesi in minuscolo rappresentano l'anno precedente, quelli in maiuscolo l'anno corrente.

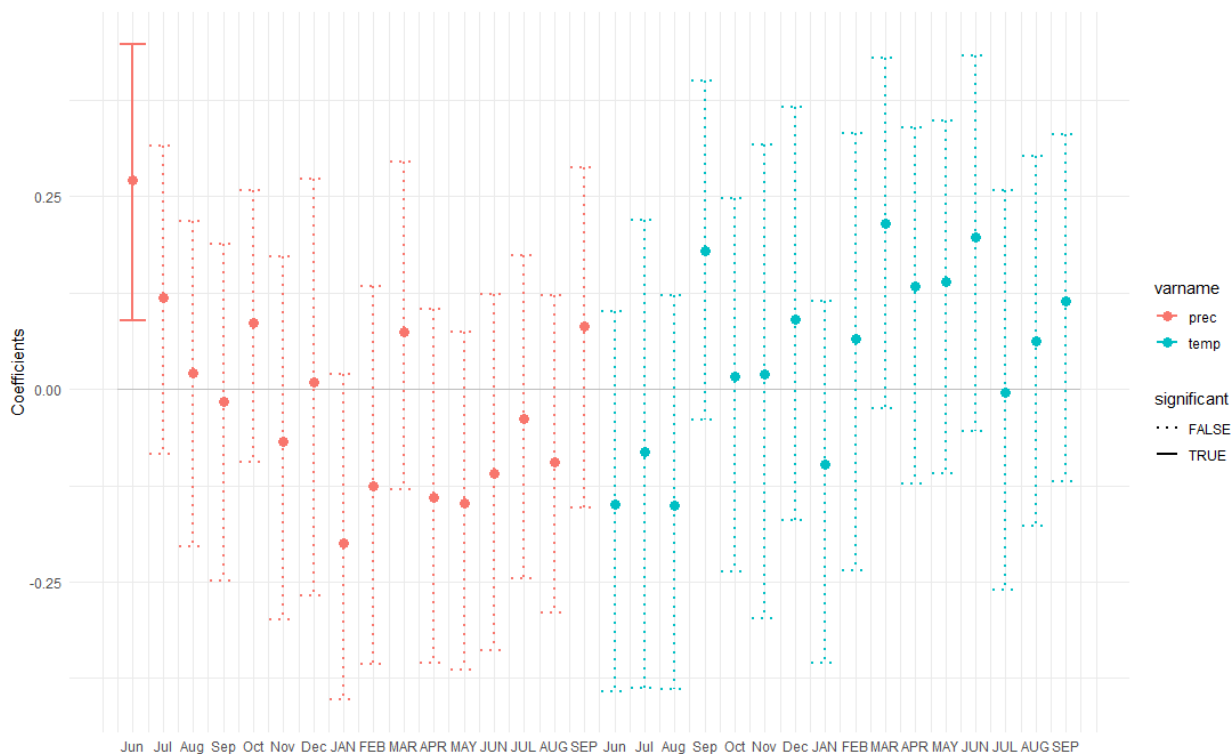


Figura 10. Correlazioni tra RWI e Variabili climatiche per il faggio, in rosso le precipitazioni mensili e in blu la temperatura massima da giugno dell'anno precedente a settembre della stagione in corso. Linee continue rappresentano correlazioni significative ($P\text{-value} < 0.05$). I mesi in minuscolo rappresentano l'anno precedente, quelli in maiuscolo l'anno corrente.

3.4 iWUE e scenari delle risposte

L'andamento nel tempo di iWUE delle due specie è molto simile come mostrato in figura 11.

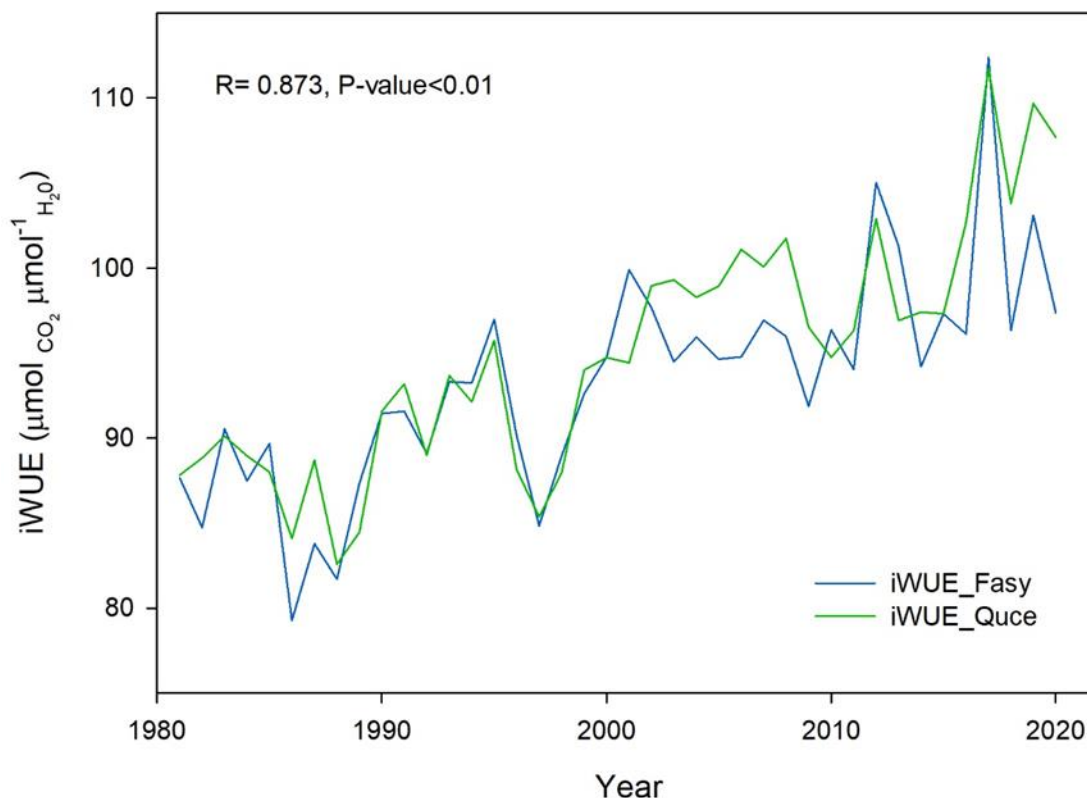


Figura 11. Andamento di iWUE del cerro (verde) e del faggio (azzurro) dal 1981 al 2020.

Per capire come le piante si stanno adattando all'incremento di CO₂ in atmosfera si usano tre diversi scenari (Saurer et al. 2004): (i) C_i = costante, (ii) C_i/C_a = costante and (iii) C_a - C_i = costante. Questi scenari differiscono in funzione della variazione di C_i all'aumento di C_a: lo scenario i) C_i è completamente indipendente dall'aumento di C_a; lo scenario ii) prevede una risposta attiva che prevede una regolazione della conduttanza stomatica e la capacità fotosintetica per mantenere costante il rapporto; lo scenario (iii) prevede un aumento allo stesso tasso quindi una risposta passiva, che non prevede aggiustamenti a livello stomatico ed extra stomatico.

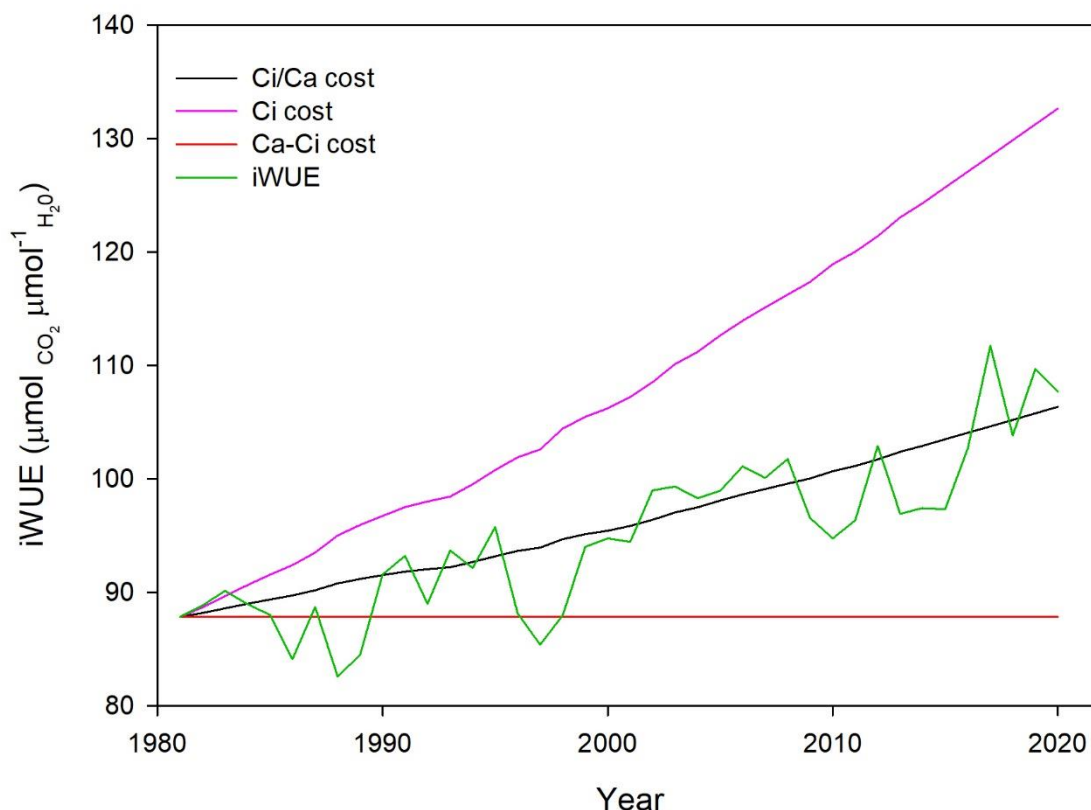


Figura 12. Scenari di risposta della iWUE delle piante di cerro all'aumentare di CO₂. In nero lo scenario a Ci/Ca costante - risposta attiva; In magenta Ci costante - risposta indipendente; in rosso Ca-Ci costante - risposta passiva. In verde l'andamento di iWUE ottenuto dai dati sperimentali.

Come si nota nella Figura 11, l'andamento di iWUE ottenuto dai dati isotopici degli anelli di legno, si sovrappone a quello ricavato dal modello Ci/Ca costante. Questo ci mostra che le piante di cerro presentano una risposta attiva all'aumento di CO₂ atmosferica. Le piante regolano la conduttanza stomatica e/o l'attività fotosintetica per adattarsi ai cambiamenti climatici. Le piante di questa specie tendono a modificare la loro fisiologia per potersi adattare alle nuove condizioni ambientali.

Per quanto riguarda il faggio la risposta all'aumento di CO₂ atmosferica non è ben definita come nel cerro, comunque è assimilabile ad una risposta anche in questo caso attiva (Figura 12).

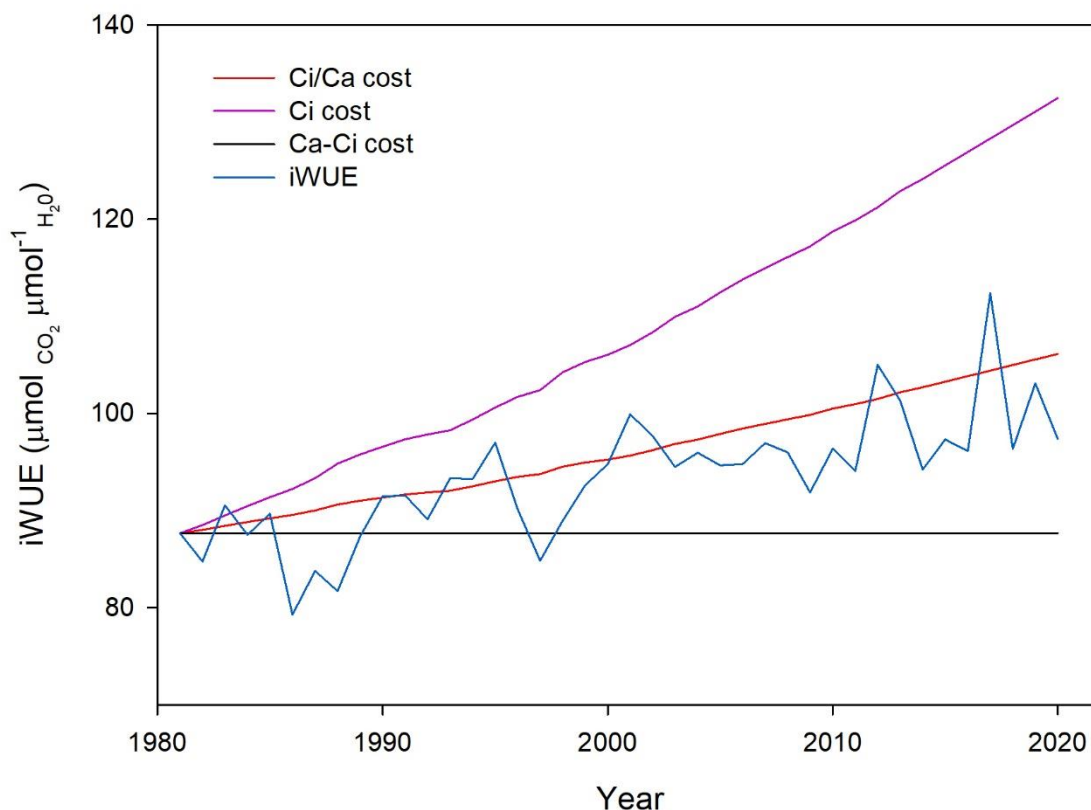


Figura 13. Scenari di risposta della iWUE delle piante di faggio all'aumentare di CO₂. In rosso lo scenario a Ci/Ca costante - risposta attiva; In magenta Ci costante - risposta indipendente; in nero Ca-Ci costante - risposta passiva. In blu l'andamento di iWUE ottenuto dai dati sperimentali.

3.5 Clima e iWUE

Entrambe le specie hanno mostrato una risposta simile alle variabili climatiche in termini di efficienza di uso dell'acqua. Le figure 14 e 15 mostrano che le temperature dell'anno precedente e dell'anno di crescita in corso hanno una influenza significativa sulla iWUE di cerro e faggio. Inoltre, entrambe le specie mostrano una correlazione negativa con le ridotte precipitazioni estive dell'anno in corso.

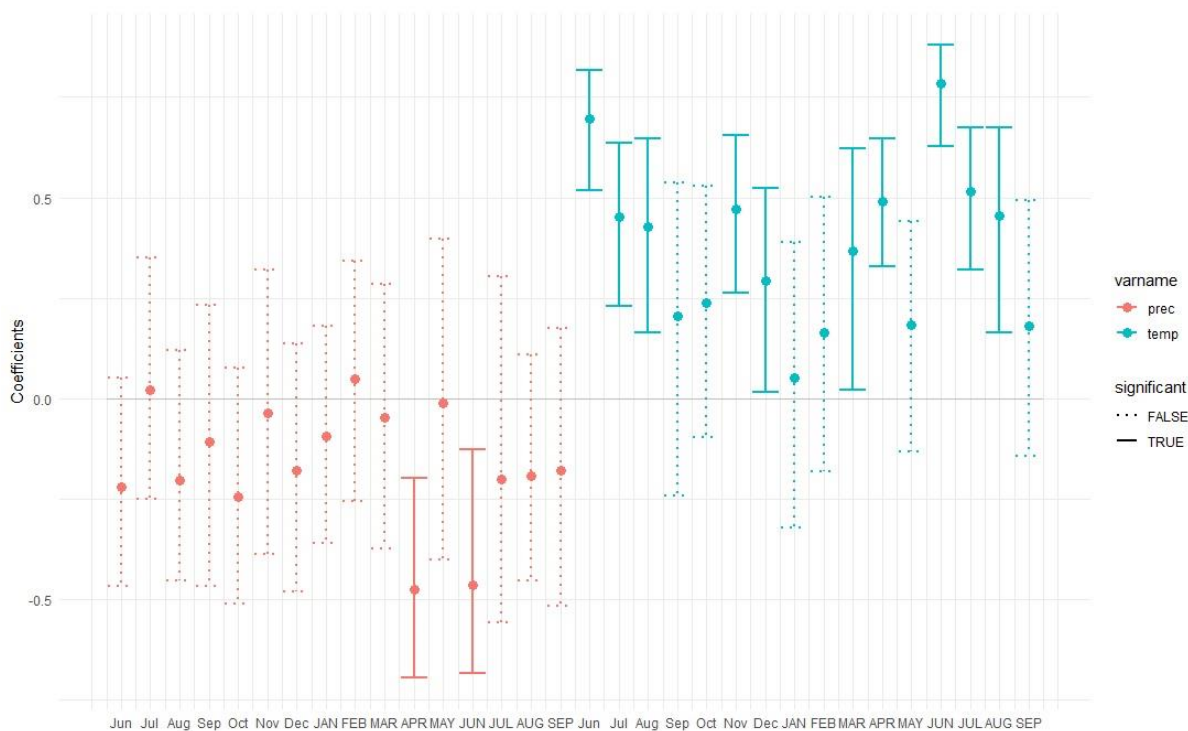


Figura 14. Correlazioni tra iWUE e variabili climatiche per il cerro, in rosso le precipitazioni mensili e in blue la temperatura massima dal giugno dell'anno precedente al settembre della stagione in corso. Linee continue rappresentano correlazioni significative $P\text{-value} < 0.05$. I mesi in minuscolo rappresentano l'anno precedente, quelli in maiuscolo l'anno corrente.

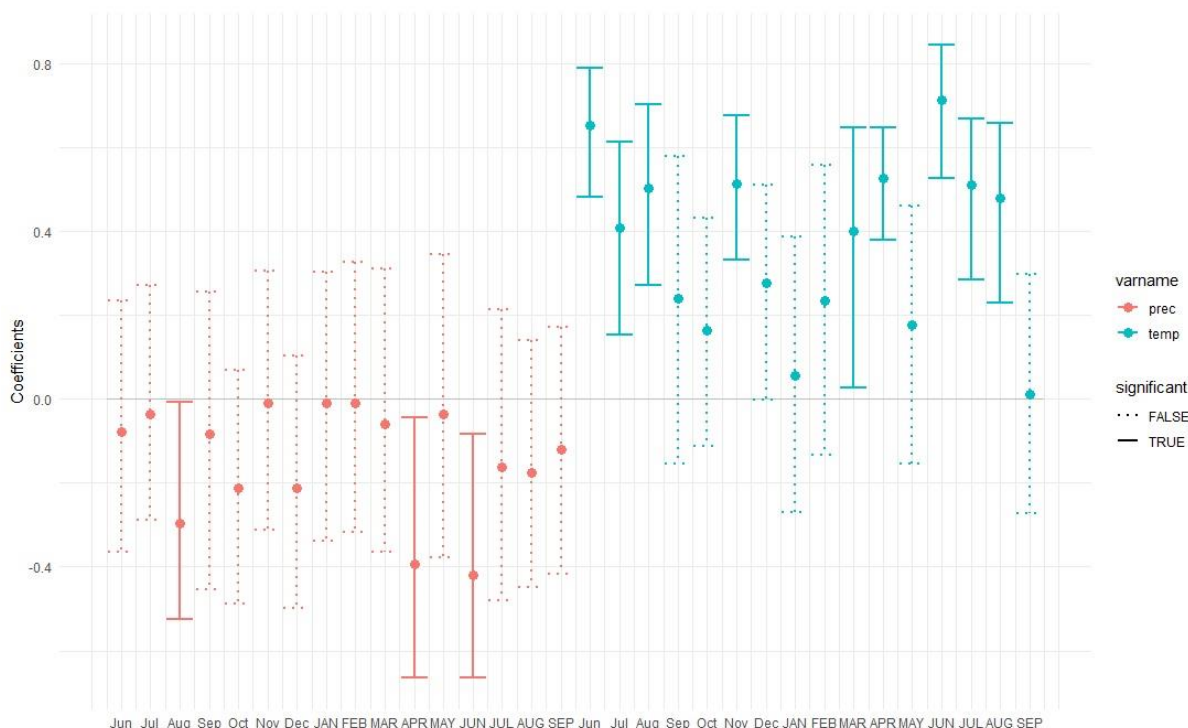


Figura 15. Correlazioni tra iWUE e variabili climatiche per il faggio, in rosso le precipitazioni mensili e in blue la temperatura massima dal giugno dell'anno precedente al settembre della stagione in corso. Linee continue rappresentano correlazioni significative $P\text{-value} < 0.05$. I mesi in minuscolo rappresentano l'anno precedente, quelli in maiuscolo l'anno corrente.

Questi risultati indicano che faggio e cerro rispondono alla siccità estiva tramite regolazione stomatica. In particolare, la siccità estiva e le elevate temperature inducono le piante a chiudere gli stomi per impedire un'eccessiva perdita di acqua (stress idrico) con una conseguente riduzione della conduttanza stomatica, e di conseguenza un aumento dell'iWUE.

Se si considera solo il clima della stagione vegetativa, l'importanza dell'acqua nell'iWUE è sottolineata dai risultati della commonality analysis, che mostrano come il 84% della variabilità del iWUE del cerro è spiegata dalle precipitazioni. Un risultato ancora maggiore si è osservato nel faggio dove le precipitazioni spiegano circa il 95% della variabilità del iWUE.

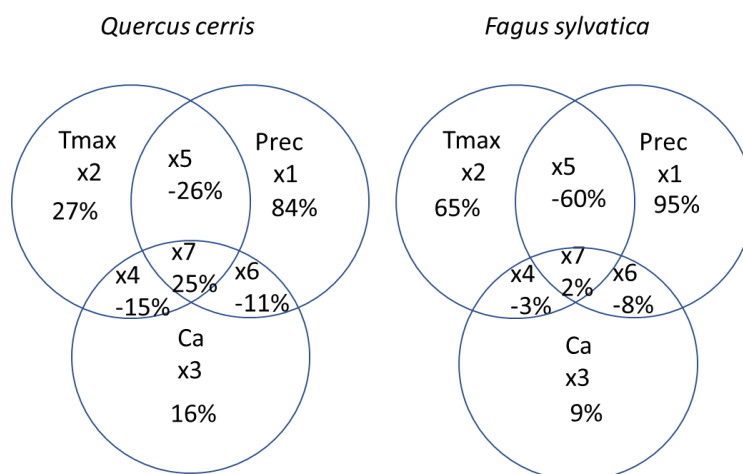


Figura 16. Variazione della iWUE spiegata dalla commonality analysis (CA) per le differenze di primo ordine della serie per ciascuna specie. La CA porta a sette frazioni di variazione spiegata per l'iWUE: gli effetti puri di Prec (x1), Tmax (x2) e Ca (x3); gli effetti combinati di Ca and Tmax (x4), Tmax and Pprec (x5), Ca and Prec (x6), in fine l'effetto combinato di Tmax, Ca e Prec (x7). La percentuale rappresenta la variabilità spiegata da ogni singola frazione.

3.6 iWUE e produttività

Una correlazione positiva tra iWUE e crescita si è osservata solo durante il periodo di rilascio del faggio a partire dal 2000. Questo potrebbe essere dovuto al raggiungimento della maturità del bosco, in cui è scomparso l'effetto confondente dello sviluppo strutturale e il clima è diventato il fattore dominante per la crescita.

Per quanto riguarda il cerro non sono state trovate correlazioni significative tra iWUE e crescita. Questo ci indica che l'adattamento delle piante di cerro alle variazioni climatiche non si riflette sulle dinamiche di crescita. Questo comportamento è già stato osservato in studi precedenti ed indica che altri fattori di stress coprono l'effetto fertilizzante della CO₂ sulla crescita (Saurer et al. 2004, Waterhouse et al. 2004, Linares and Camarero 2012). I cambiamenti climatici e in particolare la siccità, la limitazione dei nutrienti, e l'adattamento fisiologico a lungo termine all'elevata CO₂ sono stati proposti come fattori potenziali che potrebbero limitare l'effetto fertilizzante della CO₂ (Levanic et al. 2011).

A differenza del cerro, il faggio ha mostrato una correlazione significativa ($P < 0.05$) tra iWUE e crescita (Figura 17).

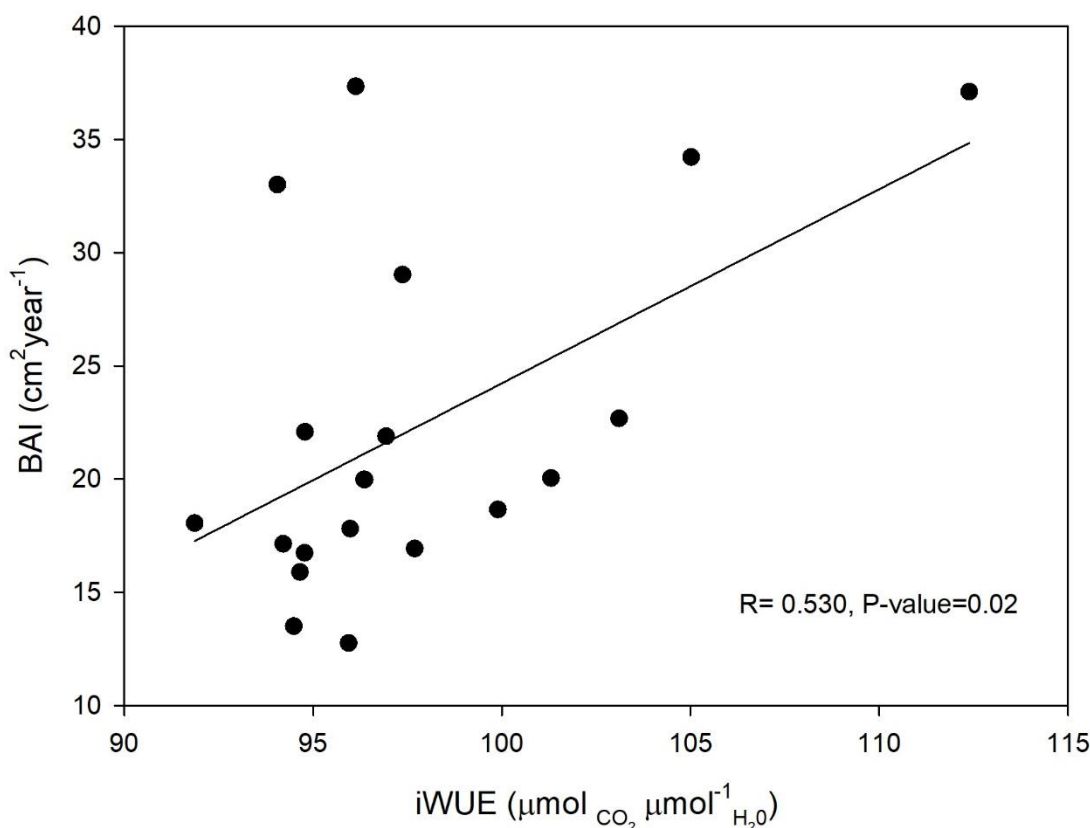


Figura 17. Correlazione tra iWUE e BAI per il faggio.

Limitazioni climatiche in termini di temperature elevate e carenza idrica sembrano non costituire un fattore di declino di crescita per il faggio che mostra un'alta resilienza fisiologica con un incremento di BAI negli ultimi 20 anni.

Questa differenza riscontrata in cerro e faggio potrebbe essere legata ad una diversa capacità di allocazione e mobilitazione delle riserve di carbonio nei vari organi della pianta (Portarena et al., 2021). Possiamo supporre che le piante di faggio, per bilanciare i rapporti tra *source* e *sink* durante i periodi di stress estivi riescano a mobilitare e utilizzare rapidamente le riserve di carbonio precedentemente accumulate (D'Andrea et al., 2019). Le riserve di carbonio assicurano la sopravvivenza in caso di scarsa disponibilità di carboidrati e permettono di tollerare gli stress climatici durante la stagione vegetativa.

In termini di acclimatazione la plasticità di mobilitazione delle riserve è un tratto fondamentale per la resilienza ai cambiamenti climatici in corso.



Conclusioni

L'approccio dendroecologico si è dimostrato un valido strumento per lo studio delle dinamiche di crescita e delle risposte fisiologiche delle popolazioni di *Quercus cerris* L. e *Fagus Sylvatica* degli ultimi 40 anni nell'area del sud ovest orvietano.

Sono stati individuati i fattori climatici che hanno guidano la crescita delle due specie negli ultimi 40 anni e la risposta in termini di efficienza di uso dell'acqua (rapporto tra carbonio organicato ed acqua traspirata).

In futuro sarà sicuramente di primaria importanza integrare gli studi dendroecologici andando a studiare altre specie forestali in modo da ottenere una migliore caratterizzazione delle aree di interesse. Sarà inoltre necessario espandere gli studi ad aree più sensibili ai cambiamenti climatici e non ancora esplorate in modo da fornire una migliore continuità ed omogeneità di campionamento.

La costituzione di un database, strutturato spazialmente e cronologicamente sulle dinamiche di crescita e di WUE delle diverse specie, favorirebbe la miglior comprensione delle risposte adattative in atto all'interno del territorio locale e nazionale, permettendo di identificare dei modelli completi per la pianificazione e la gestione sostenibile delle foreste.



Riferimenti bibliografici

- Brugnoli, E., Hubick, K.T., von Caemmerer, S., Wong, S.C., & Farquhar, G.D. (1988). Correlation between carbon isotope discrimination in leaf starch and sugars of C₃ plants and the ratio of intercellular and atmospheric partial pressures of carbon dioxide. *Plant Physiol*, 88, 1418–1424.
- Cherubini, P., Gartner, B. L., Tognetti, R., BRAeKER, O. U., Schoch, W., & Innes, J. L. (2003). Identification, measurement and interpretation of tree rings in woody species from Mediterranean climates. *Biological Reviews*, 78(1), 119-148.
- D'Andrea, E., Rezaie, N., Battistelli, A., Gavrichkova, O., Kuhlmann, I., Matteucci, G., ... & Muhr, J. (2019). Winter's bite: beech trees survive complete defoliation due to spring late-frost damage by mobilizing old C reserves. *New Phytologist*, 224(2), 625-631.
- Di Filippo, A., Biondi, F., Čufar, K., De Luis, M., Grabner, M., Maugeri, M., ... & Piovesan, G. (2007). Bioclimatology of beech (*Fagus sylvatica* L.) in the Eastern Alps: spatial and altitudinal climatic signals identified through a tree-ring network. *Journal of Biogeography*, 34(11), 1873-1892.
- Farquhar, G. D., O'Leary, M. H., & Berry, J. A. (1982). On the relationship between carbon isotope discrimination and the intercellular carbon dioxide concentration in leaves. *Aust. J. Plant Physiol*, 9, 121-137.
- Farquhar, G.D., Ehleringer, J.R., & Hubick, K.T. (1989). Carbon isotope discrimination and photosynthesis. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*. 40, 503-537.
- Francey, R. J., & Farquhar, G. D. (1982). An explanation of ¹³C/¹²C variations in tree rings. *Nature*, 297(5861), 28-31.
- Hacket-Pain, A. J., Cavin, L., Friend, A. D., & Jump, A. S. (2016). Consistent limitation of growth by high temperature and low precipitation from range core to southern edge of European beech indicates widespread vulnerability to changing climate. *European Journal of Forest Research*, 135(5), 897-909.
- Huang R, Zhu H, Liu X, Liang E, Grießinger J, Wu G, Li X, Bräuning A (2017) Does increasing intrinsic water use efficiency (iWUE) stimulate tree growth at natural alpine timberline on the southeastern Tibetan Plateau? *Glob Planet Change* 148: 217–226.



- Levanic T, Cater M, McDowell NG (2011) Associations between growth, wood anatomy, carbon isotope discrimination and mortality in a *Quercus robur* forest. *Tree Physiol* 31: 298–308.
- Linares JC, Camarero JJ (2012) From pattern to process: linking intrinsic water-use efficiency to drought-induced forest decline. *Glob Chang Biol* 18:1000–1015.
- McCarroll, D., & Loader, N. J. (2004). Stable isotopes in tree rings. *Quaternary Science Reviews*, 23(7-8), 771-801.
- Portarena, S., Gavrichkova, O., Brugnoli, E., Battistelli, A., Proietti, S., Moscatello, S., ... & Farinelli, D. (2021). Carbon allocation strategies and water uptake in young grafted and own-rooted hazelnut (*Corylus avellana* L.) Cultivars. *Tree Physiology*.
- Rezaie, N., D'Andrea, E., Bräuning, A., Matteucci, G., Bombi, P., & Lauteri, M. (2018). Do atmospheric CO₂ concentration increase, climate and forest management affect iWUE of common beech? Evidences from carbon isotope analyses in tree rings. *Tree Physiology*, 38(8), 1110-1126.
- Saurer M, Siegwolf RTW, Schweingruber FH (2004) Carbon isotope discrimination indicates improving water-use efficiency of trees in northern Eurasia over the last 100 years. *Glob Chang Biol* 10:2109–2120.
- Tsonis, A. A., Deyle, E. R., May, R. M., Sugihara, G., Swanson, K., Verbeten, J. D., & Wang, G. (2015). Dynamical evidence for causality between galactic cosmic rays and interannual variation in global temperature. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(11), 3253-3256.
- Waterhouse JS, Switsur VR, Barker AC, Carter AHC, Hemming DL, Loader NJ, Robertson I (2004) Northern European trees show a progressively diminishing response to increasing atmospheric carbon dioxide concentrations. *Quat Sci Rev* 23:803–810.

Il Responsabile Scientifico

Dr.ssa Silvia Portarena