



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI MILANO



DiSAA
DIPARTIMENTO
di SCIENZE
AGRICOLE E
AMBIENTALI

Report del progetto “Programma pilota per favorire il sequestro e la conservazione del carbonio nelle faggete appenniniche a diversi indirizzi gestionali”

DIP. SCIENZE AGRARIE E AMBIENTALI UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO NOVEMBRE 2024

GIORGIO VACCHIANO, LORENZO MW ROSSI, SILVIO D OGGIONI

Sommario

Introduzione.....	3
Obiettivi del progetto:	3
Materiali e metodi	4
Area di studio	4
Attività effettuate	5
Attività di campo.....	5
Analisi dendrometriche e dendrocronologiche per calcolo di stock e sink di carbonio	5
Analisi suolo	7
Simulazioni	7
Risultati	10
Concentrazione di carbonio e azoto e stock di carbonio nel suolo	10
Stock di carbonio nella biomassa forestale	13
Stock di carbonio a pianta.....	14
Stock di carbonio nella biomassa ad ettaro.....	15
Sink di carbonio nella biomassa forestale.....	16
Sink di carbonio a pianta.....	16
Sink di carbonio nella biomassa ad ettaro	17
Stock di carbonio ad ettaro totali (biomassa + suolo)	18
Simulazione dello stock e sink di carbonio nella biomassa forestale	19
Andamento degli stock di carbonio nel periodo 2020 - 2100 in diversi scenari climatici	19
Bilancio di stock di carbonio nel periodo 2020 - 2100 in diversi scenari climatici.....	20
Modellazione di sink di carbonio nella biomassa forestale	22
Andamento dei sink di carbonio forestali nel periodo 2020 - 2100 in diversi scenari climatici ...	22
Sink forestali medi nel periodo 2020 - 2100 in diversi scenari climatici.....	24
Scenari futuri per la gestione delle foreste del PNATE in ottica di massimizzazione degli stock e dei sink forestali.....	26
Suggerimenti di gestione	27
Obiettivi di Gestione	27
Strategie e Azioni	29
Conclusioni.....	31
Bibliografia	32
Appendici	37

Introduzione

Il progetto si inserisce in un framework di mitigazione dei gas serra, in cui il sequestro del carbonio (C) ricopre un ruolo chiave in ambito scientifico e politico. Le faggete, componendo da sole quasi il 10% della superficie forestale italiana (INFC 2015), risultano una delle latifoglie con maggiore capacità di immagazzinare il carbonio atmosferico (Bayat et al., 2012). Nell'Appennino Centro-Nord è presente il 61% delle foreste di ceduo italiano (Chianucci et al., 2016), e di queste il faggio è una delle specie più importanti. Il Parco Nazionale dell'Appennino Tosco Emiliano (PNATE) ricopre un ruolo fondamentale come promotore di pratiche che aumentino lo stoccaggio di carbonio, sia per promuovere pratiche gestionali che contribuiscano a bilanciare in termini di sostenibilità gli effetti della pressione antropica, sia per rilanciare il valore economico del territorio tramite il mercato di crediti volontari di carbonio. In questo quadro generale il primo obiettivo del progetto è quantificare il carbonio (C) stoccato stoccato nei principali serbatoi di carbonio del parco (C stock nella biomassa e nel suolo) e il loro potenziale di assorbimento di CO₂ (C sink).

È inoltre importante considerare gli effetti della gestione forestale sulla capacità delle foreste di assorbire e stoccare C atmosferico nella biomassa, per delineare delle linee guida nella gestione forestale che possano favorire questo processo di C sink e storage. I cambiamenti sociali ed economici hanno portato in Italia alla graduale conversione di ampie zone di ceduo in alto fusto (Chianucci et al., 2016). Inoltre, l'89% delle foreste a ceduo vengono lasciate crescere più del turno stabilito (INFC 2015), e spesso vengono abbandonate (Nocentini, 2009). Un altro importante aspetto da considerare è il mix con altre specie, in particolare l'Abete bianco e rosso, molto frequente nelle foreste Europee (Hilmers et al., 2020), e il mix con le latifoglie nel limite più basso del faggio. Il mix di specie forestali è spesso risultato più vantaggioso per la massimizzazione dei servizi ecosistemici rispetto a monocolture (e.g. Jonsson et al., 2019), in particolar modo per quanto riguarda lo stoccaggio di carbonio (Hulvey et al., 2013). Il primo obiettivo del progetto è quantificare l'effetto di queste diverse gestioni sullo stock ed il sink di carbonio nella biomassa e nel suolo, per delineare gli scenari di gestione che massimizzino lo stoccaggio netto di carbonio.

Lo stoccaggio di carbonio è un aspetto fondamentale in un framework di contrasto al cambio climatico, ma è altresì importante considerare l'effetto che diversi livelli di cambio climatico potrebbero avere sullo sviluppo delle foreste di faggio ceduo e convertite ad alto fusto (la quasi totalità delle foreste di faggio del PNATE). Questo effetto si ripercuote sulla capacità delle foreste faggio di agire come "carbon sink". Il cambio climatico mette a rischio l'esistenza del faggio nel suo limite altitudinale inferiore, specialmente nel sud Europa (come il PNATE) (Kramer et al., 2010), schiacciandolo sul suo limite altitudinale superiore, in competizione con l'Abete, e esponendo la specie a siccità estive prolungate, gelate tardive, e competizione con le latifoglie sul suo limite inferiore. Modellare l'effetto che il cambio climatico può avere sui flussi di C è uno step fondamentale per delineare le più efficaci azioni possibili atte ad aumentare il C sink delle foreste italiane. Infine, è bene ricordare che la capacità di stoccare carbonio non è solo relativa all'accumulo nella biomassa tramite fotosintesi, ma anche al suo trasferimento nel suolo. E' quindi necessario considerare anche gli stock di carbonio nel suolo per avere una visione completa degli stock di carbonio presenti nel PNATE.

Obiettivi del progetto:

- Stima dello **stock di C attuale** nella biomassa forestale e nel suolo in aree con diverse gestioni forestali (mix vs purezza; ceduo abbandonato, ceduo a regime, ceduo convertito ad alto fusto).
- **Modellazione delle variazioni dello stock di C** nel lungo periodo (100 anni), considerando diversi livelli di gestione forestale e scenari di cambio climatico.
- **Formulare suggerimenti per massimizzare il sink di C** attraverso una corretta gestione forestale.

Materiali e metodi

Area di studio

All'interno del parco sono state selezionate 60 aree rappresentative delle diverse gestioni del parco.

Il parco è stato suddiviso in sezioni in base alla gestione del bosco, alle specie arboree presenti, all'altitudine e all'esposizione in modo tale da ottenere aree il più omogenee possibile rappresentanti le principali gestioni del PNATE (Figura 1):

- **Faggio in purezza invecchiato - fuori turno.** Questa gestione rappresenta una vasta porzione del parco la cui gestione è stata abbandonata, si trova ad altitudini eterogenee e rappresenta il "controllo" nel nostro studio. (12 aree di studio)
- **Faggio in purezza gestito a ceduo.** Sono selezionate particelle vicine alla fine del turno 30-45 anni per meglio osservare gli effetti della gestione. (12 aree di studio)
- **Faggio in purezza convertito ad alto fusto.** Le particelle selezionate con l'aiuto dei forestali
- **Faggete invecchiate - fuori turno in mix con l'abete** nella fascia più alta del PNATE (>1200 mslm) (8 aree di studio)
- **Faggete invecchiate - fuori turno in mix con le latifoglie** nella fascia inferiore del PNATE (<1200 mslm) (12 aree di studio)

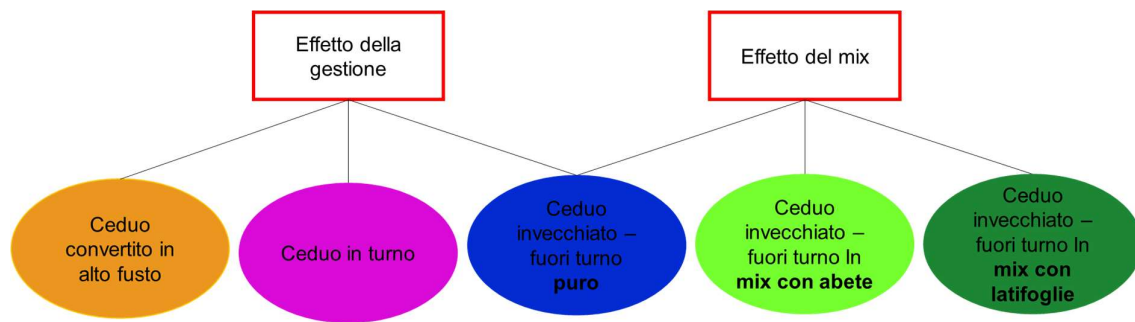


Figura 1: Livelli di studio selezionati all'interno del parco PNATE rappresentanti le principali gestioni dei boschi di faggio e i principali mix di specie presenti

Per ogni area è stato identificato un plot rappresentativo di 530 m² (appezzamento circolare di 13 m di raggio) (Figura 2). Per il processo di identificazione dei plot, in un primo momento più di 100 plot possibili sono stati selezionati con l'aiuto della direzione del parco e dei tecnici forestali delle diverse province coinvolte. Dopo i sopralluoghi in campo per selezionare i plot più idonei, 54 plot sono stati identificati per le analisi (12 ogni gestione e 8 per la gestione ceduo invecchiato - fuori turno in mix con abete).

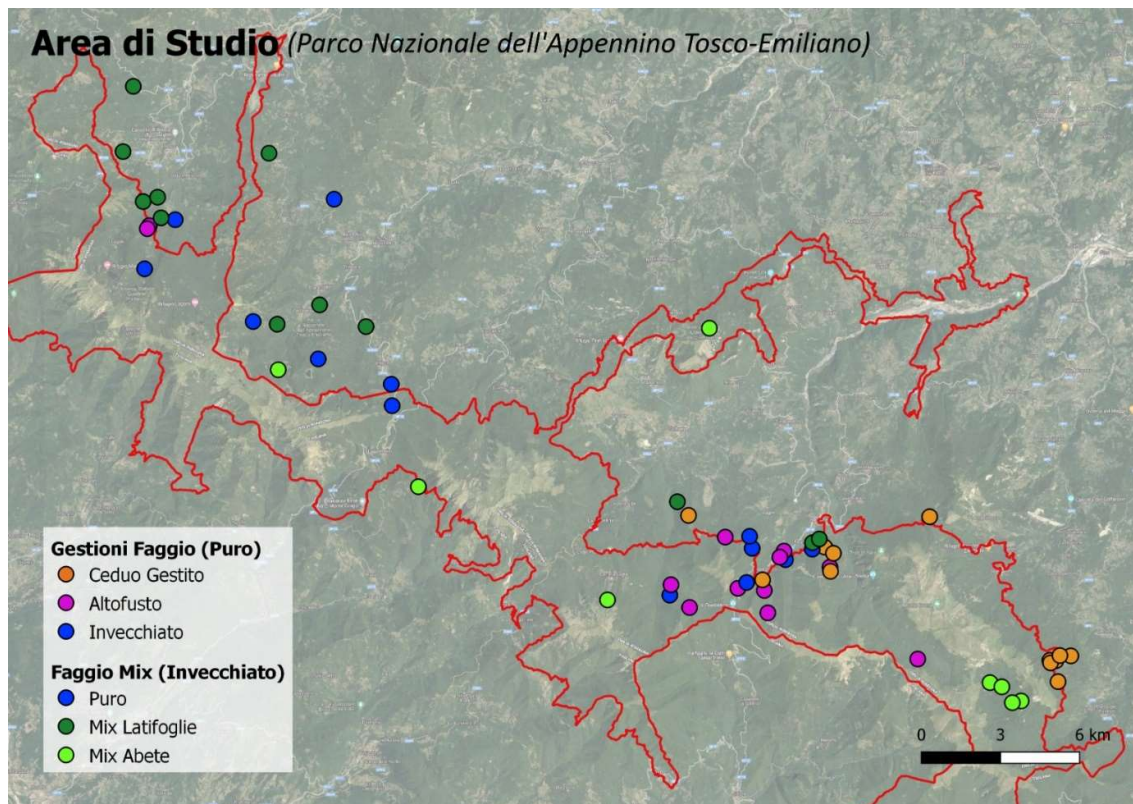


Figura 2: mappa delle aree di studio campionate all'interno del territorio PNATE e nelle aree limitrofe, rappresentanti le principali gestioni e mix del faggio

Attività effettuate

Attività di campo

Le operazioni di campo si sono divise in più fasi: cavallettamento di tutti gli alberi presenti con diametro $> 7\text{cm}$, prelievo di due tasselli legnosi e rilevazione dei dati dendrometrici (diametro, altezza, dimensioni della chioma) di 10 alberi modello scelti in maniera da rappresentare le diverse classi di diametro presenti in campo, proporzionalmente all'abbondanza dei diversi individui del plot alle diverse classi di diametro.

In ogni area di studio sono stati anche prelevati 5 campioni di lettiera, 5 carote 0-20cm di profondità per analisi di carbonio (C) e azoto (N) nel suolo, e 5 campioni compositi composti da 3 sampling ring di suolo per la stima della bulk density. I 5 campioni sono stati collezionati a distanza crescente (1,2,3,4,5 m) da 5 alberi modello nell'area di studio e uniti in un campione composito per ogni area, per meglio rappresentare la variabilità del suolo all'interno dell'area stessa.

Analisi dendrometriche e dendrocronologiche per calcolo di stock e sink di carbonio

Le 10 piante modello sono state utilizzate per creare curve ipsometriche e stimare l'altezza di tutti alberi presenti nelle aree di campionamento partendo dalle misure di diametro (Tabella 1).

Tabella 1: Curve Altezza – diametro stimate in campo su dieci alberi campione per plot. I 12 plot replicati per gestione sono stati accorpati per avere un campione rappresentativo per il parco. Le specie meno rappresentate nei diversi plot campione in mix con latifoglie sono state accorpate per derivare un'equazione allometrica generale 'altre latifoglie'. H è l'altezza stimata della pianta in m e D il diametro in cm.

Species	Gestione	Equazione ipsometrica
<i>Abies Alba</i>	Ceduo invecchiato in mix con abete	$H = (0.83 \cdot D) / (1 + (0.83 \cdot D) / 42.91)$
<i>F. sylvatica</i>	Ceduo invecchiato in mix con abete	$H = (1.77 \cdot D) / (1 + (1.77 \cdot D) / 28.67)$
<i>F. sylvatica</i>	Ceduo in turno puro	$H = (1.92 \cdot D) / (1 + (1.92 \cdot D) / 26.63)$
<i>F. sylvatica</i>	Ceduo convertito ad alto fusto puro	$H = (2.44 \cdot D) / (1 + (2.44 \cdot D) / 28.17)$
<i>F. sylvatica</i>	Cedup invecchiato puro	$H = (1.50 \cdot D) / (1 + (1.50 \cdot D) / 34.74)$
<i>F. sylvatica</i>	Ceduo invecchiato in mix con latifoglie	$H = (1.37 \cdot D) / (1 + (1.37 \cdot D) / 33.31)$
<i>Acer campestre</i>	Ceduo invecchiato in mix con latifoglie	$H = (2.26 \cdot D) / (1 + (2.26 \cdot D) / 20.89)$
<i>Castanea sativa</i>	Ceduo invecchiato in mix con latifoglie	$H = (2.22 \cdot D) / (1 + (2.22 \cdot D) / 20.33)$
<i>Malus sylvestris</i>	Ceduo invecchiato in mix con latifoglie	$H = (1.44 \cdot D) / (1 + (1.44 \cdot D) / 19.26)$
<i>Ostrya carpinifolia</i>	Ceduo invecchiato in mix con latifoglie	$H = (7.24 \cdot D) / (1 + (7.24 \cdot D) / 14.98)$
<i>Prunus avium</i>	Ceduo invecchiato in mix con latifoglie	$H = (2.06 \cdot D) / (1 + (2.06 \cdot D) / 25.53)$
<i>Altre latifoglie</i>	Ceduo invecchiato in mix con latifoglie	$H = (2.12 \cdot D) / (1 + (2.12 \cdot D) / 20.45)$

Utilizzando relazioni allometriche standard per le principali specie forestali italiane (Tabacchi et al., 2011) è stata calcolata la biomassa ad ettaro per ogni ara di studio. La biomassa radicale è stata stimata come uguale al 24% della biomassa epigea (Easdale et al., 2019; Mokany et al., 2006). Utilizzando fattori di conversione da biomassa totale a massa di carbonio (0.47 g g^{-1} ; IPCC, 2006) sono stati calcolati gli stock di C ad ettaro per tutte le aree di studio per confrontare gli stock di C per le diverse gestioni del bosco.

I tasselli degli alberi prelevati in campo tramite succhielli di Pressler sono state processati manualmente e analizzati mediante scansione con uno scanner EPSON Perfection v850 Pro a una risoluzione di 2400 dpi. I tasselli legnosi sono stati letti utilizzando i software CooRecorder e CDendro (v. 9.3.1 – Cybis, 2022; Maxwell e Larsson, 2021) (totale 60 plot * 10 alberi * 2 carote = 1200 carote analizzate). Il software CDendro è stato impiegato anche per la crossdatazione dei campioni. La crossdatazione è stata effettuata a due livelli: a livello di singolo albero, confrontando i due tasselli raccolti sullo stesso individuo, e tra gli alberi campione. Un controllo finale è stato effettuato confrontando le cronologie medie dei diversi popolamenti campionati. Grazie all'analisi è stato possibile quantificare gli accrescimenti medi annuali delle piante analizzate per tutto il periodo della loro vita, e calcolare un accrescimento medio per area di studio. Una volta ottenute le larghezze e gli incrementi degli anelli degli alberi analizzati, sono stati convertiti in cronologie di diametro e successivamente in altezza degli alberi, utilizzando le curve altezza-diametro precedentemente stimate dai dati in campo (Tabella 1).

Infine, abbiamo inserito il diametro e l'altezza di ogni anno analizzato in equazioni allometriche di Tabacchi et al. (2011) per calcolare e creare serie temporali di biomassa e di stoccaggio del carbonio. Attraverso la sottrazione, è stato possibile stimare l'assorbimento annuale di carbonio per ciascuno dei 10 alberi modello, derivando così la media dell'assorbimento di C per albero. Successivamente è stata applicata una regressione diametro-assorbimento per stimare l'assorbimento di C di tutti gli

alberi misurati in ciascun appezzamento, da cui infine è stato possibile stimare l'assorbimento di carbonio per ettaro.

Abbiamo analizzato le differenze statistiche nel C stock e sink tra tipologie di gestione utilizzando modelli lineari generalizzati (GLM) con distribuzione Gamma. I modelli comprendono diverse covariate ambientali, come altitudine, pendenza, aspetto (linearizzato mediante trasformazione coseno), densità degli alberi, età media degli alberi, carbonio organico del suolo (SOC) e azoto totale del suolo. La selezione del modello migliore è stata effettuata mediante la rimozione inversa dei predittori non influenti basata sul Criterio di Informazione di Akaike (AIC). Il modello finale è stato infine testato per la collinearità tra i predittori calcolando il Fattore di Inflazione della Varianza (VIF); se è stata rilevata collinearità ($VIF > 10$ - Dormann et al., 2013), una delle due variabili collineari è stata esclusa dal modello, scegliendo quella con il peggiore valore di significatività. Il VIF è stato calcolato utilizzando la funzione VIF del pacchetto R *car* (Fox et al., 2023). Tutte le analisi statistiche sono state condotte utilizzando il software R (versione 4.2.3) (R Core Team, 2022). I GLM sono stati eseguiti utilizzando il pacchetto *stats* e il R-quadrato di McFadden è stato utilizzato per stimare l'adattamento del modello. I test post-hoc di Tukey sono stati utilizzati per confrontare le differenze nei C stock e sink tra le tipologie di gestione.

Analisi suolo

I 5 campioni di suolo prelevati in ogni plot sono stati uniti tra loro per creare un campione composito che rappresenti la variabilità intrinseca del suolo in un determinato plot. I campioni, dopo essere stati essiccati all'aria e setacciati a 2mm, sono stati analizzati per stimare:

- Bulk density superficiale 0-5cm
- Contenuto di C inorganico (Metodo del Calcimetro di Dietrich-Fruhling)
- Contenuto di C organico e N totale (tramite gascromatografia)

Similmente, i 5 campioni di lettiera sono stati uniti, seccati in stufa a 105°C per 48h, e pesati, per stimare la quantità di lettiera presente al suolo per ogni gestione forestale.

La bulk density è stata misurata solo sulla parte superficiale che comprende l'orizzonte O (0-5cm). Per poter stimare la bulk density alla profondità 5-20 cm è stata usata la metodologia di Ferré et al. (2023), applicando la funzione di pedotransfer:

$$BD = 1.0435 \times SOC^{-0.255}$$

Per ottenere un valore unico di densità apparente nel range di profondità 0-20 cm, abbiamo calcolato una media ponderata utilizzando la densità apparente misurata a 0-5 cm e quella stimata a 5-20 cm, coprendo così l'intero intervallo di profondità.

Simulazioni

Per modellare l'evoluzione dei boschi di faggio nel PNATE è stato utilizzato il modello 3-PG (Physiological Processes Predicting Growth) sviluppato da Landsberg e Waring (1997). Il modello 3-PG calcola l'energia radiante assorbita dalle chiome forestali e la converte in produzione di biomassa. L'efficienza di conversione della radiazione è modificata dagli effetti della fertilità, dell'umidità del suolo (il modello include il calcolo continuo del bilancio idrico), dei deficit di pressione di vapore atmosferico e dell'età del bosco. Il carbonio prodotto dalla chioma viene allocato a foglie, fusti e radici, utilizzando equazioni dinamiche che aggiornano lo stato del sistema con time-step mensile. È un modello generico ma necessita di essere parametrizzato per singole specie. Il modello 3-PG richiede, come input, dati meteorologici standard e informazioni sulla profondità del suolo e sulle sue caratteristiche di ritenzione idrica. Le caratteristiche degli stand forestali sono specificate all'inizio

della simulazione, basate sui dati di campo misurati per le diverse gestioni. I cambiamenti nelle caratteristiche dendrometriche del popolamento vengono poi calcolate dal modello utilizzando funzioni di mortalità. Gli output includono biomassa e volume dei fusti, diametri medi, area basale del bosco in ogni time-step di simulazione e l'andamento nel tempo dell'Indice di Area Fogliare. I principali processi simulati dal modello includono:

- **Fotosintesi:** Il modello considera la capacità dell'albero di assorbire anidride carbonica dall'aria e di convertirla in materia organica durante la fotosintesi.
- **Respirazione:** Considera il processo di respirazione degli alberi, che coinvolge la conversione di zuccheri e altri composti organici in energia, rilasciando anidride carbonica.
- **Allocazione di risorse:** 3PG tiene conto di come gli alberi allocano le risorse (come carbonio, acqua e nutrienti) per la crescita, la produzione di foglie, rami e radici, nonché per l'accumulo di biomassa.
- **Condizioni ambientali:** Il modello considera i fattori ambientali come la disponibilità di acqua, luce solare, temperatura e nutrienti nel terreno, poiché influenzano direttamente la fotosintesi e la crescita degli alberi

Per studiare l'effetto del cambio climatico sono stati considerati due scenari di cambio climatico SSP (Shared Socioeconomic Pathways, fonte dati ESGF CORDEX (ESGF, 2023), risoluzione 1 km²) che valutano diversi possibili scenari futuri fino al 2100 considerando combinazioni di fattori socioeconomici, tecnologici e ambientali che potrebbero influenzare le emissioni di gas serra e il cambiamento climatico.

- **SSP 1 – 2.6 (Sustainability):** Questo scenario rappresenta un futuro in cui ci sono politiche e azioni globali efficaci per affrontare i cambiamenti climatici. Il riscaldamento atteso a livello globale è nel range di 1.3 - 2.4°C (Meinshausen et al., 2020). Si focalizza sulla riduzione delle emissioni di gas serra e sull'adozione di tecnologie pulite (energie rinnovabili, efficienza energetica, agricoltura sostenibile, ecc). In questo scenario si verifica una rapida transizione verso fonti energetiche rinnovabili e si promuove la conservazione delle risorse.
- **SSP 3 – 7.0 (Regional Rivalry):** Questo scenario si basa su una situazione in cui le politiche globali per affrontare il cambiamento climatico sono limitate e frammentate. Il riscaldamento atteso a livello globale è nel range di 3.0 to 6.5°C (Meinshausen et al., 2020). Ci sono tensioni geopolitiche, instabilità regionale e una crescita economica moderata. Non c'è un forte impegno coordinato per ridurre le emissioni e la transizione verso energie pulite è più lenta. Questo scenario prevede una maggiore disuguaglianza sociale e un'attenzione minore verso la sostenibilità ambientale.

Diversi livelli di intensità di gestione dei boschi sono stati considerati nelle simulazioni:

Basso: gestione dei boschi che mira alla rinaturalizzazione, alla riduzione dell'utilizzo della produzione legnosa e alla conversione ad alto fusto dei boschi cedui e selvicoltura con tagli selettivi per i boschi ad alto fusto

Medio: gestione delle risorse forestali più conservative, con adozione di pratiche di gestione tradizionale dei boschi cedui (ceduazione a sterzo) e tagli successivi con turni lunghi per i boschi convertiti ad alto fusto.

Alto: gestione delle risorse forestali per la produzione di materiale legnoso, con ripresa della ceduazione nei boschi di ceduo abbandonati, ceduazione con rilascio di matricine nel ceduo attivo, e tagli successivi per i boschi convertiti ad alto fusto.

Nella tabella 2 si possono trovare in dettaglio le percentuali di prelievo e i turni utilizzati per le diverse gestioni a diverse intensità.

Tabella 2: diversi scenari di simulazione e relative gestioni per il faggio e le specie in mix con esso

	Intensità di gestione		
	Bassa	Media	Alta
<i>Ceduo Attivo</i>	Ceduo con turno allungato	Ceduo con turno allungato	Ceduo matricinato
	Turno 45 anni 90% classe diametrica piccola e media 80% classe diametrica grande	Turno 30 anni 95% classe diametrica piccola e media 80% classe diametrica grande	Turno 30 anni 95% classe diametrica piccola e media 90% classe diametrica grande
<i>Ceduo invecchiato</i>	Conversione ad alto fusto	Ceduo a sterzo	Ceduo matricinato
	Turno 20 anni 2 tagli al 15% 1 taglio 20%	Turno 30 anni 30% classe diametrica piccola e media 10% classe diametrica grande	Turno 30 anni 95% classe diametrica piccola e media 80% classe diametrica grande
<i>Ceduo convertito ad alto fusto</i>	Tagli a scelta selettiva	Tagli successivi	Tagli successivi
	Turno 20 anni Tagli 8%	Taglio di sementazione 30% a 110anni di età Taglio di sgombero 100% a 140 anni di età	Taglio di sementazione 30% a 100anni di età Taglio di sgombero 100% a 120 anni di età
<i>Ceduo invecchiato in mix con latifoglie</i>	Conversione ad alto fusto	Ceduazione a sterzo	Ceduazione con matricine
	Turno 20 anni 2 tagli al 15% 1 taglio 20%	Turno 30 anni 30% prelievi	Turno 30 anni 90% prelievi
<i>Ceduo invecchiato in mix con abete</i>	Taglio selettivo e conversione	Tagli successivi e ceduo a sterzo	Tagli successivi e ceduo matricinato
	Taglio selettivo degli abeti (turno 20 anni, prelievo 8%) Conversione ad alto fusto del faggio (Turno 20 anni, 2 tagli al 15%, 1 taglio al 20%)	Tagli successivi abeti (taglio sementazione 80y.o. 30%, utilizzazione 70% a 120y.o.) Ceduazione del faggio a sterzo (turno 30anni; 30% prelievi)	Tagli successivi abeti (taglio sementazione 70y.o. 30%, sgombero 100% a 100y.o.) Ceduazione del faggio (turno 30anni; 90% prelievi)

Risultati

Concentrazione di carbonio e azoto e stock di carbonio nel suolo

Come si può vedere dai risultati presentati in Figura 3, la bulk density non sembra essere influenzata dalla gestione: nessuna differenza significativa si osserva tra le diverse gestioni (CC $0.61 \pm 0.19 \text{ g*cm}^{-3}$, CCv_A $0.56 \pm 0.23 \text{ g*cm}^{-3}$, CCv_L $0.77 \pm 0.17 \text{ g*cm}^{-3}$, CCv_P $0.63 \pm 0.14 \text{ g*cm}^{-3}$, CF $0.64 \pm 0.10 \text{ g*cm}^{-3}$). Un problema, però, è stato individuato nella metodologia. La bulk density è stata campionata nei primi 5 cm superficiali del suolo, risultando legata alla presenza di lettiera (Figura A1). La diminuzione della bulk density con l'aumento della lettiera è un risultato atteso (Zhao et al, 2015), ma un campionamento così superficiale restituisce dei risultati sottostimati di bulk density, andando a influire anche sugli stock di C nel suolo.

Anche la lettiera forestale non è correlata alla gestione del bosco o al mix (CC $206 \pm 43 \text{ g}$, CCv_A $212 \pm 61 \text{ g}$, CCv_L $240 \pm 120 \text{ g}$, CCv_P $207 \pm 67 \text{ g}$, CF $213 \pm 57 \text{ g}$). Questo può essere spiegato da altri fattori che possono influenzare significativamente la presenza di lettiera al suolo, primo fra tutto la pendenza del plot.

Per la concentrazione di carbonio organico nel suolo, il mix con abete risulta favorevole allo stoccaggio di C nel suolo ($7.5 \pm 5.2 \%$, Figura 3C) (es. Dawud et al., 2016; Chen et al., 2020). Le altre gestioni, invece, non sembrano influenzare il contenuto di C nel suolo (CC $3.7 \pm 1.2 \%$, CCv_L $3.9 \pm 1.4 \%$, CCv_P $4.1 \pm 0.9 \%$, CF $4.0 \pm 0.6 \%$). Il contenuto di N nel suolo, invece dipende sia dal livello di mix con altre specie (con il mix abete che ha la concentrazione maggiore: $0.41 \pm 0.3 \%$) e dalla gestione, con il ceduo in turno che presenta la minore concentrazione di N nel suolo (0.20 ± 0.03 , Figura 3D). Le altre gestioni non presentano differenze significative tra loro (CCvL $0.27 \pm 0.08 \%$, CCv_P $0.25 \pm 0.06 \%$, Cf $0.25 \pm 0.05 \%$).

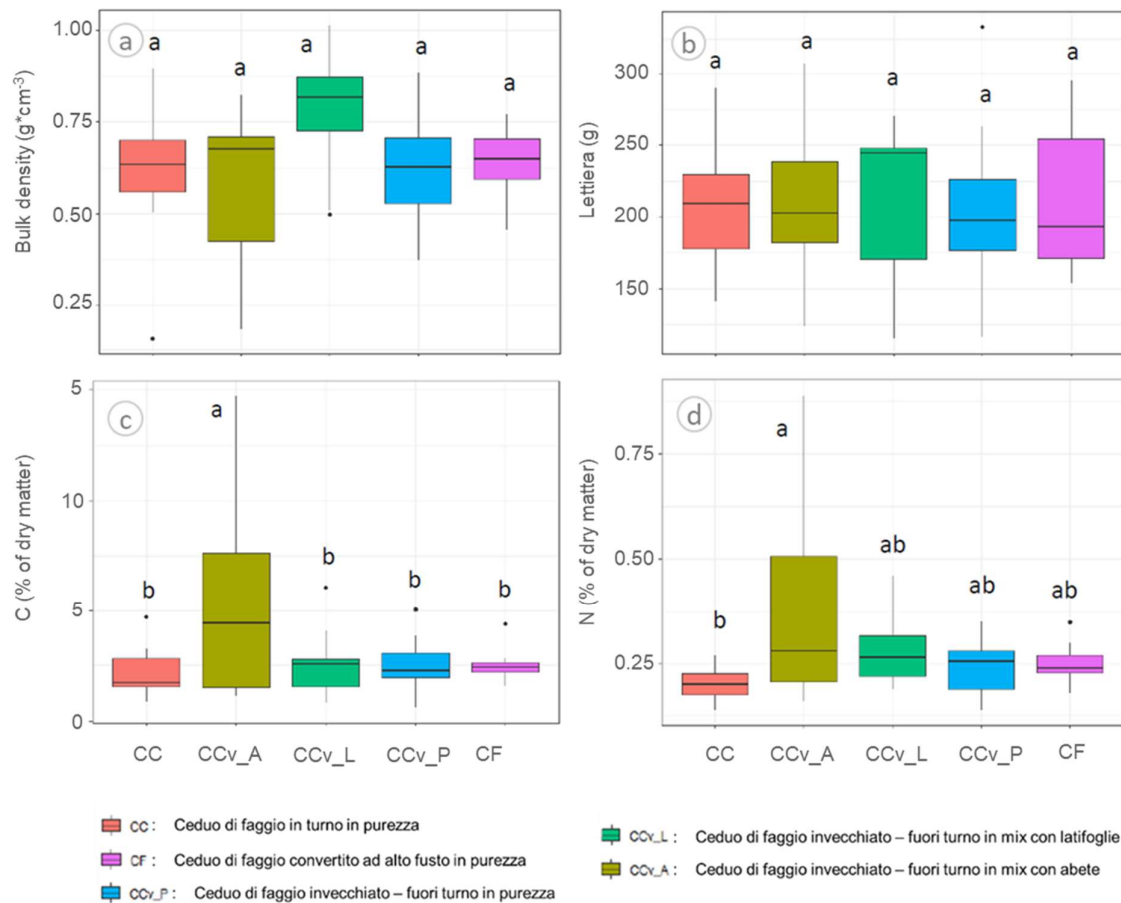


Figura 3: I grafici presentano i valori delle diverse variabili di suolo per diverse gestioni e mix di *F. sylvatica* all'interno del PNATE. A) bulk density (g cm⁻³), b) lettiera (g per un area di campionamento di 1600 cm²), C) carbonio in %, d) azoto in %.

Il rapporto C:N è uno degli indicatori più importante di potenziale di stoccaggio di C nel suolo e, in generale, di fertilità e salute del suolo. I risultati ottenuti dalle analisi mostrano come il mix con l'abete risulti comunque il più favorevole per la salute del suolo (18.68 ± 3.0 , Figura 4), mentre il mix con le latifoglie abbia un rapporto C:N minore (15.1 ± 3.37 , Figura 4). Questo può potenzialmente portare ad una minore efficienza di uso delle risorse nel suolo e, nel lungo termine, ad una diminuzione del potenziale di stoccaggio del carbonio. Le altre gestioni non presentano differenze significative (CC 18.35 ± 3.10 , CCv_P 16.87 ± 2.50 , CF 15.86 ± 1.45). Ad oggi, comunque, non risultano presenti situazioni critiche all'interno del parco per quello che riguarda la salute del suolo.

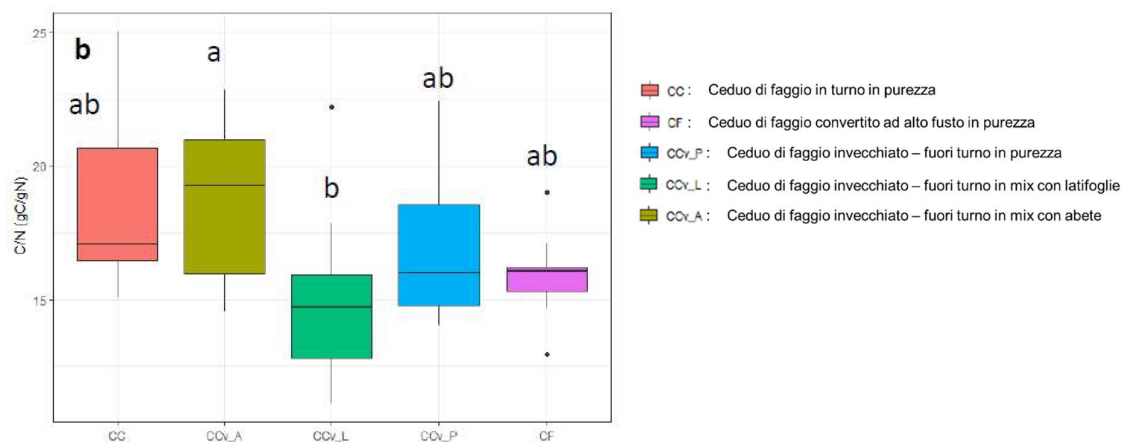


Figura 4: rapporto C:N per diverse gestioni e mix nei boschi di *F. sylvatica* del PNATE

Gli stock di carbonio nel suolo sono stati stimati usando le misure prese in campo di densità del suolo sulla profondità 0-5cm e la funzione pedotransfer di Ferrè et al. (2023) per la profondità 5-20. I valori sono stati poi mediati ponderando per la profondità, dando valori medi di stock nel suolo per i primi 0-20cm di profondità. Gli stock di carbonio nei primi 20 cm di suolo (Fig. 5) variano da un minimo di $52 \pm 9 \text{ Mg C ha}^{-1}$ nel ceduo e $78 \pm 38 \text{ Mg C ha}^{-1}$ nel mix con abete bianco. Gli stock di carbonio nel suolo nel mix con latifoglie, nel ceduo convertito in alto fusto e nel ceduo invecchiato sono rispettivamente di $57 \pm 13 \text{ MgC ha}^{-1}$, $56 \pm 5 \text{ MgC ha}^{-1}$ e $56 \pm 9 \text{ MgC ha}^{-1}$. Il mix con abete bianco ha mostrato stock di carbonio organico statisticamente più elevati rispetto al ceduo. Il GLM finale per lo stock di carbonio organico include solo la gestione (fattore) e l'azoto totale del suolo come predittori significativi. Quando i risultati sono stati predetti utilizzando il modello GLM, hanno mostrato l'assenza di effetti della gestione sugli stock di carbonio nel suolo (Fig. 5).

I valori sono in linea con la tesi di Mazzoni (2022). Vanno però discusse le problematiche relative al territorio dell'appennino, che portano ad un'incertezza elevata sui valori, soprattutto riguardo i boschi di faggio in mix con l'abete bianco. Nei boschi alle quote maggiori, sono spesso presenti rocce affioranti, che fanno sì che la lettiera si concentri in "hotspot" di carbonio al suolo. Spesso i campioni sono stati presi in questi punti, data l'alta eterogeneità delle zone e la presenza di rocce affioranti che rende impossibile il prelievo di campioni di suolo. I risultati andrebbero quindi corretti non solo per lo scheletro trovato all'interno dei campioni, ma anche per la quantità di suolo presente nelle stazioni forestali al netto di rocce affioranti. Attuando queste correzioni, il valore medio di carbonio ad ettaro per le faggete a quote più elevate (come quelle in mix con l'abete) andrà a diminuire.

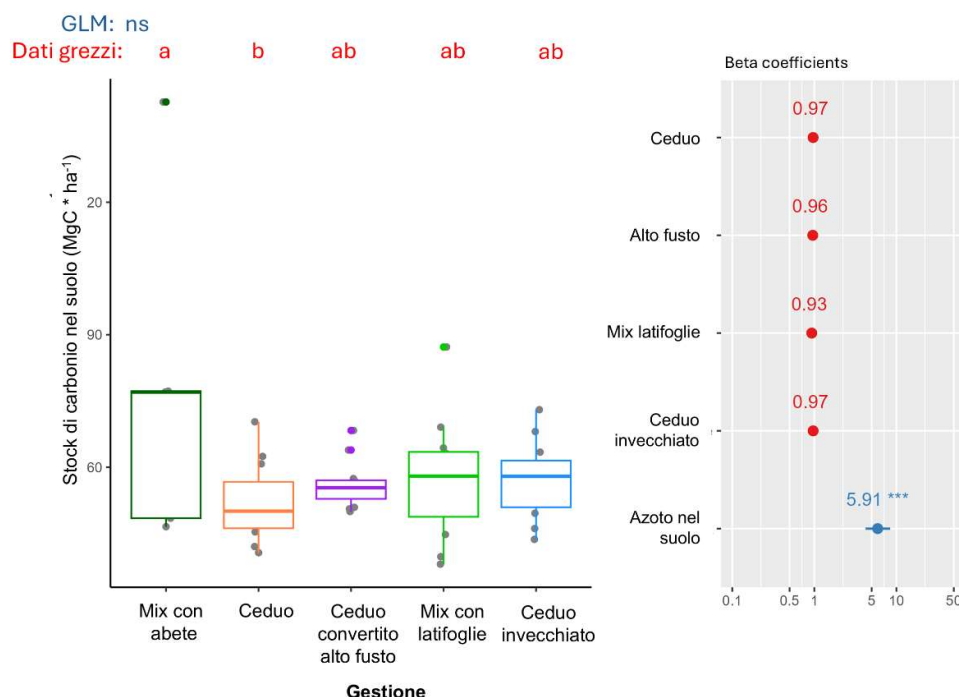


Figura 5: Stock di carbonio in MgC ha⁻¹ nei primi 0-20 cm di suolo. Il boxplot mostra il valore medio +/- la deviazione standard. Le lettere sopra il boxplot indicano la differenza significativa tra i risultati osservati (dati grezzi, rosso) e i risultati previsti dal modello GLM (GLM, blu), mantenendo costanti gli effetti delle variabili significative, consentendo una più chiara comprensione della relazione tra gestione e risultati degli stock di carbonio. Le lettere diverse sopra le caselle indicano differenze significative (ad esempio, a-b), mentre l'inclusione di una lettera comune non indica differenze significative (ad esempio, a-a; a-ab; b-ab). Le tabelle dei coefficienti beta mostrano il peso stimato assegnato alle variabili predittive nel modello di regressione (coefficienti beta) come la variazione della variabile di risposta associata a una variazione di un'unità della variabile predittiva, mantenendo costanti tutte le altre variabili. I numeri blu sono le variabili che mostrano un effetto significativo e gli asterischi indicano il livello di significatività.

Stock di carbonio nella biomassa forestale

Gli stock di carbonio forestale sono stati stimati come media per pianta e ad ettaro a partire dai dati di campo. Usando questi dati grezzi, però, non è possibile comparare l'effetto di mix e gestione sugli stock e sink di carbonio senza incorrere in possibili errori di interpretazione. Questo perché molteplici fattori hanno un effetto sugli stock e i sink di carbonio, i principali sono l'esposizione del plot, la pendenza, l'altitudine, l'età media delle piante, il contenuto di C e N nel suolo (Figura A3 correlazioni per il sink a pianta, Figura A4 correlazioni per i sink a ettaro). Per questo motivo, sono stati utilizzati dei modelli misti generalizzati che normalizzassero i risultati di stock tenendo conto dell'influenza di queste variabili. I risultati riportati di seguito mostrano prima i dati grezzi rilevati in campo e poi quelli modellizzati con l'utilizzo dei GLM a parità di altri fattori ambientali. I risultati mostrano prima gli stock di carbonio a pianta e successivamente gli stock di carbonio ad ettaro. Questa distinzione permette di apprezzare l'effetto della gestione sullo sviluppo delle singole piante (stock a pianta) e sullo sviluppo della foresta (stock a ettaro). Ai fini gestionali, gli stock a ettaro sono più significativi per quantificare il contributo delle foreste del PNATE alla mitigazione al cambio climatico.

Stock di carbonio a pianta

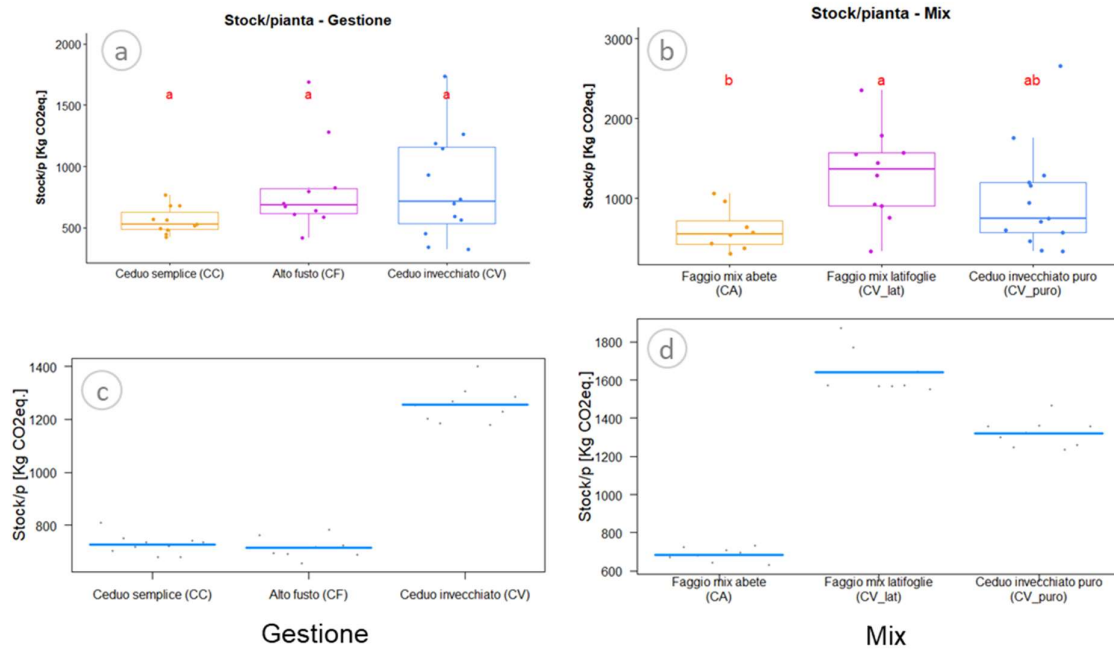


Figura 6: Risultati grezzi di stock di carbonio medio a pianta per a) diverse gestioni e b) diversi mix con il *F. sylvatica* e risultati modellati con GLMM per escludere l'effetto di variabili ambientali per c) diverse gestioni e d) diversi mix con il *F. sylvatica*

In figura 6 sono riportati i valori per lo stock di CO₂ equivalente a pianta. Si può notare come la gestione non abbia un effetto significativo sullo sviluppo delle piante e relativo stock, anche se il ceduo invecchiato presenta un valore maggiore rispetto alla quantità di CO₂ stoccata nella biomassa (726.41 kgC, Fig.6a). Per il mix, invece, i boschi di ceduo invecchiato in mix con le latifoglie presentano lo stock maggiore a pianta (1364 kgC), seguiti dai boschi puri (751.82 kgC) e dai faggi in mix con l'abete bianco (547.44, Fig.6b). Anche togliendo l'effetto delle variabili ambientali, i trend risultano gli stessi, con valori più accentuati (Figura 6c,d).

Stock di carbonio nella biomassa ad ettaro

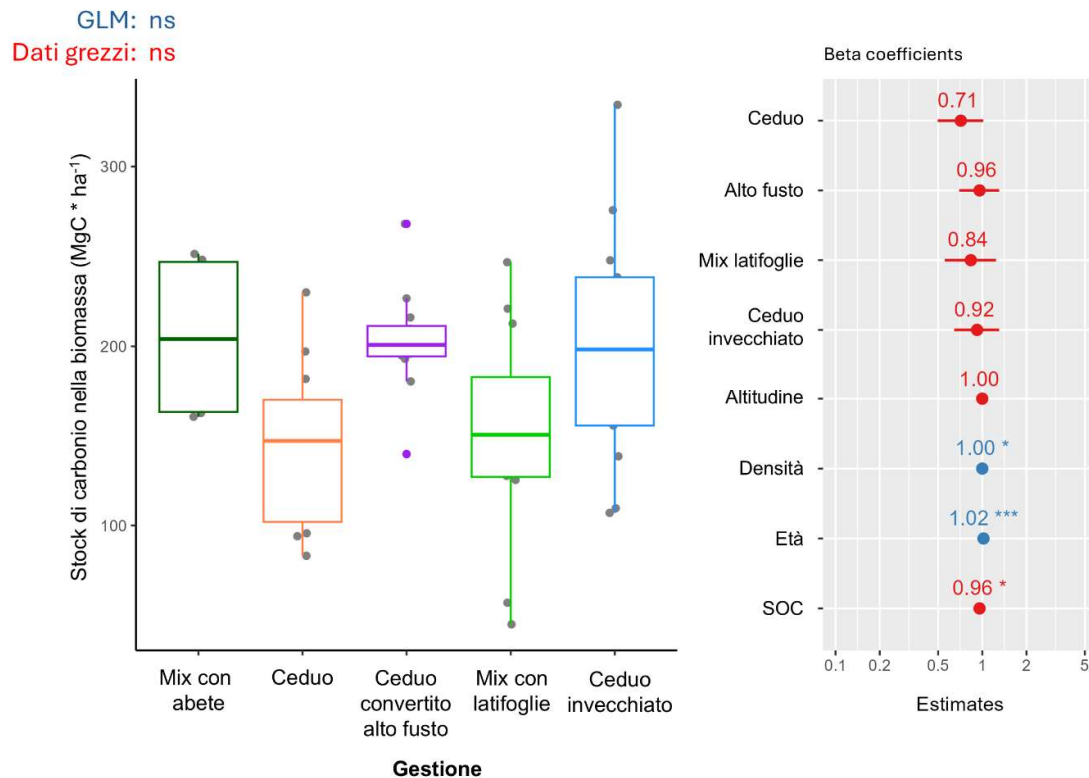


Figura 7: Stock di carbonio nella biomassa (MgC ha⁻¹) Il boxplot mostra il valore medio +/- la deviazione standard. Le lettere sopra il diagramma indicano differenze significative tra i risultati osservati (dati grezzi, rosso) e i risultati previsti con il modello GLM (GLM, blu), mantenendo costante l'effetto delle variabili significative, consentendo una comprensione più chiara della relazione tra gestione e risultati delle scorte di carbonio. Lettere diverse sopra le scatole indicano differenze significative (ad es., a-a; a-ab; b-ab). Le tabelle dei coefficienti beta mostrano il peso stimato assegnato alle variabili predittive nel modello di regressione (coefficienti beta) come il cambiamento nella variabile di risposta associato a una variazione di un'unità nella variabile predittiva, mantenendo costanti tutte le altre variabili. I numeri blu rappresentano le variabili che mostrano un effetto significativo, con asterischi che indicano il livello di significatività.

In base ai dati raccolti sul campo, gli stock di carbonio nella biomassa (Fig. 7) mostrano un minimo di 145 ± 47 MgC ha⁻¹ nei cedui e un massimo di 211 ± 65 MgC ha⁻¹ nei cedui a sterzo. I cedui convertiti a fustaia hanno immagazzinato 202 ± 30 MgC ha⁻¹, i boschi in mix con latifoglie 151 ± 60 MgC ha⁻¹ e le miste con abete bianco 196 ± 474 MgC ha⁻¹. Non è stata osservata alcuna differenza statisticamente significativa tra i trattamenti.

Il modello GLM finale per le scorte di carbonio nella biomassa ha incluso i seguenti predittori significativi (Fig. 2a): gestione (fattore), altitudine, densità degli alberi, età media degli alberi e carbonio organico del suolo (SOC). Il contenuto totale di azoto del suolo era altamente collineare con il SOC e pertanto è stato escluso. Anche prevedendo i valori basati sui risultati del modello GLM, non è stata osservata alcuna differenza significativa nelle scorte di carbonio nella biomassa tra i trattamenti.

La differenza rispetto agli stock a pianta è particolarmente significativa rispetto al mix: il mix con l'abete, nonostante abbia gli stock a pianta minori, risulta invece avere gli stock a ettaro maggiori. Questo sottolinea come lo stock del singolo albero non possa essere preso come misura della capacità di una gestione di stoccare carbonio. La densità degli alberi risulta fondamentale per determinare la capacità di stock di CO₂ equivalente di un bosco.

Sink di carbonio nella biomassa forestale

Come per lo stock, anche per il sink verranno presentati i risultati grezzi per il sink di carbonio e corretti con l'utilizzo di GLMM basandosi sulle correlazioni più importanti tra sink di carbonio e variabili ambientali (Figura A5,6). Come per gli stock, i risultati sono stati divisi in sink medio a pianta, per studiare l'effetto della gestione sulla fenologia delle singole piante, e ad ettaro, per quantificare il potenziale di mitigazione di cambio climatico.

Sink di carbonio a pianta

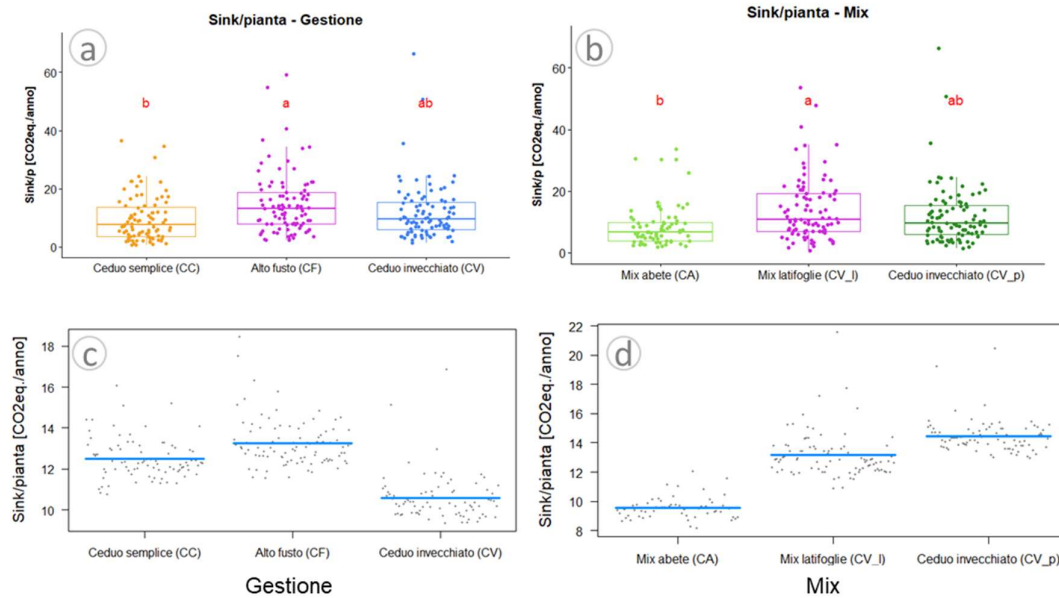


Figura 8: Risultati grezzi di sink di carbonio medio a pianta per a) diverse gestioni e b) diversi mix con il *F. sylvatica* e risultati modellati con GLMM per escludere l'effetto di variabili ambientali per c) diverse gestioni e d) diversi mix con il *F. sylvatica*

Sia la gestione che il mix con altre specie sembrano influenzare lo sviluppo del faggio nel PNATE, modificando il sink medio a pianta per le diverse gestioni/mix. L'alto fusto è la gestione con il sink a pianta più alto (13.6 kgCO₂eq. anno⁻¹), seguito dal ceduo invecchiato (9.6 kgCO₂eq. anno⁻¹) e dal ceduo in turno (7.5 kgCO₂eq. anno⁻¹, Figura 8a). Il mix con le latifoglie ha un valore di sink a pianta (9.3 kgCO₂eq. anno⁻¹) significativamente più alto rispetto al ceduo invecchiato e al mix con l'abete (6.4 kgCO₂eq. anno⁻¹, Figura 8b). La normalizzazione con i modelli misti generalizzati cambia questi risultati. Togliendo l'effetto delle variabili ambientali e dell'età, il ceduo semplice ha un livello di sink a pianta più elevato del ceduo invecchiato, mentre l'alto fusto rimane la gestione con il sink a pianta più alto (Figura 8c). Riguardo al mix, invece, il ceduo invecchiato puro ha un sink a pianta più alto rispetto al mix con le latifoglie e al mix con l'abete (Figura 8d).

Sink di carbonio nella biomassa ad ettaro

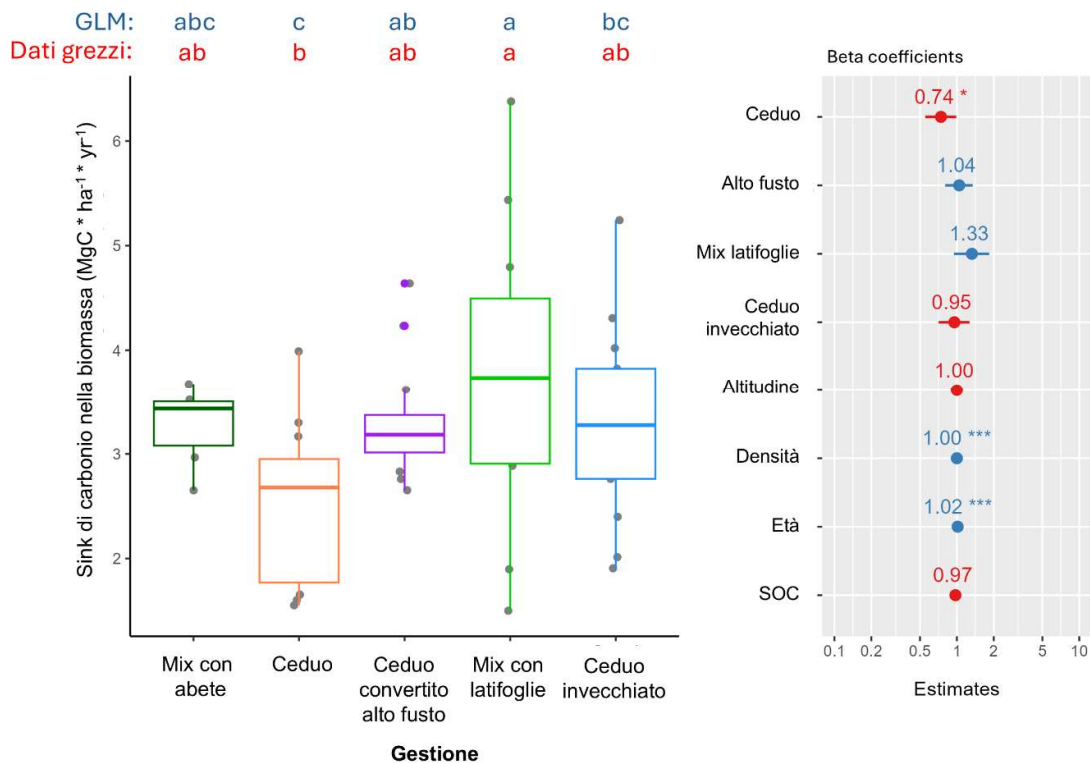


Figura 9: sink di carbonio di biomassa in $\text{MgC ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$. Il boxplot mostra il valore medio $\pm$ la deviazione standard. Le lettere sopra il riquadro indicano differenze significative tra i risultati osservati (dati grezzi, rosso) e i risultati previsti con il modello GLM (GLM, blu), mantenendo costanti gli effetti delle variabili significative, consentendo una più chiara comprensione della relazione tra gestione e risultati degli stock di carbonio. Le lettere diverse sopra le caselle indicano differenze significative (ad esempio, a-b), mentre l'inclusione di una lettera comune non indica differenze significative (ad esempio, a-a; a-ab; b-ab). Le tabelle dei coefficienti beta mostrano il peso stimato assegnato alle variabili predittive nel modello di regressione (coefficienti beta) come la variazione della variabile di risposta associata a una variazione di un'unità della variabile predittiva, mantenendo costanti tutte le altre variabili. I numeri blu sono le variabili che mostrano un effetto significativo e gli asterischi indicano il livello di significatività.

I sink di carbonio nella biomassa (Fig. 9) sono significativamente influenzati dalla gestione. Il faggio misto a latifoglie ha il sink più alto, con un assorbimento pari a $3.7 \pm 1.4 \text{ MgC ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$. L'alto fusto, il faggio misto ad abete bianco e il ceduo invecchiato hanno un assorbimento di carbonio pari a 3.3 ± 0.6 , $3.2 \pm 0.4 \text{ MgC ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$, e $3.5 \pm 0.9 \text{ MgC ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$. Infine, il ceduo in turno ha un sink di carbonio significativamente inferiore, pari a $2.5 \pm 0.8 \text{ MgC ha}^{-1} \text{ anno}^{-1}$. I risultati hanno mostrato un assorbimento significativamente più elevato nel faggio misto a latifoglie rispetto al ceduo. Il GLM finale per l'assorbimento di C nella biomassa includeva gli stessi predittori del GLM dello stock di C nella biomassa (Fig. 7): gestione (fattore), altitudine, densità degli alberi, età media degli alberi e SOC. L'azoto totale del suolo è altamente collineare con il SOC e quindi è stato rimosso. I valori di previsione basati sui risultati del GLM hanno mostrato che i cedui in turno hanno un pozzo di carbonio statisticamente più basso rispetto al mix con latifoglie, e i cedui invecchiati un sink più basso rispetto al mix con le latifoglie e alla foresta convertita ad alto fusto.

Gli effetti positivi della gestione a mix sui sink di carbonio sono riportati in diversi lavori. I bassi livelli di sink del ceduo, invece, posso essere dati dal suo stato di invecchiamento: il ceduo in turno è prossimo alla fine turno, e solo di poco più giovane del ceduo invecchiato (vedere report "Interventi per l'adattamento al cambiamento climatico di cedui e fustaie transitorie di faggio su proprietà

demaniali”). I sink di carbonio nel ceduo aumentano nel periodo post taglio ma tendono poi a diminuire velocemente, data la alta densità dei boschi gestiti a ceduo rispetto ad altre gestioni. La competizione fa sì che i sink forestali diminuiscano sensibilmente con l’invecchiamento del ceduo, risultando in valori di sink bassi. Una ceduazione più frequente può aumentare i valori di sink rispetto al ceduo, come si può vedere nel successivo lavoro di modellazione, ma non gli stock che risultano maggiori nei boschi convertiti ad alto fusto.

Stock di carbonio ad ettaro totali (biomassa + suolo)

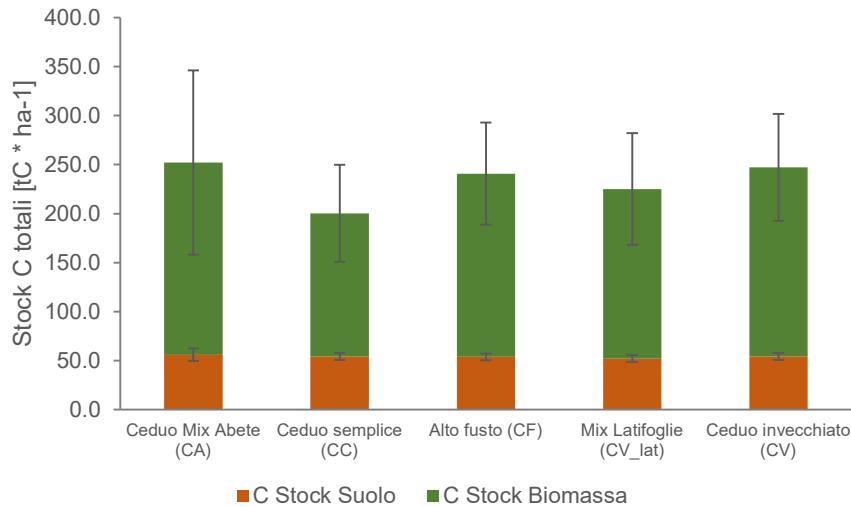


Figura 10: stock di carbonio totali in biomassa e suolo per diverse gestioni dei boschi di faggio nel Parco nazionale dell'Appennino Tosco Emiliano

Gli stock di carbonio totali sono più alti nel ceduo invecchiato in mix con l’abete (252.2 tC * ha⁻¹, Figura 10), seguiti, a diminuire, dal ceduo invecchiato (247.3 tC * ha⁻¹), dal ceduo convertito ad alto fusto (240.8 tC * ha⁻¹), e dal ceduo invecchiato in mix con le latifoglie (225.2 tC * ha⁻¹), mentre i valori minori si trovano nel ceduo semplice in turno (200.3 tC * ha⁻¹).

Simulazione dello stock e sink di carbonio nella biomassa forestale

Andamento degli stock di carbonio nel periodo 2020 - 2100 in diversi scenari climatici

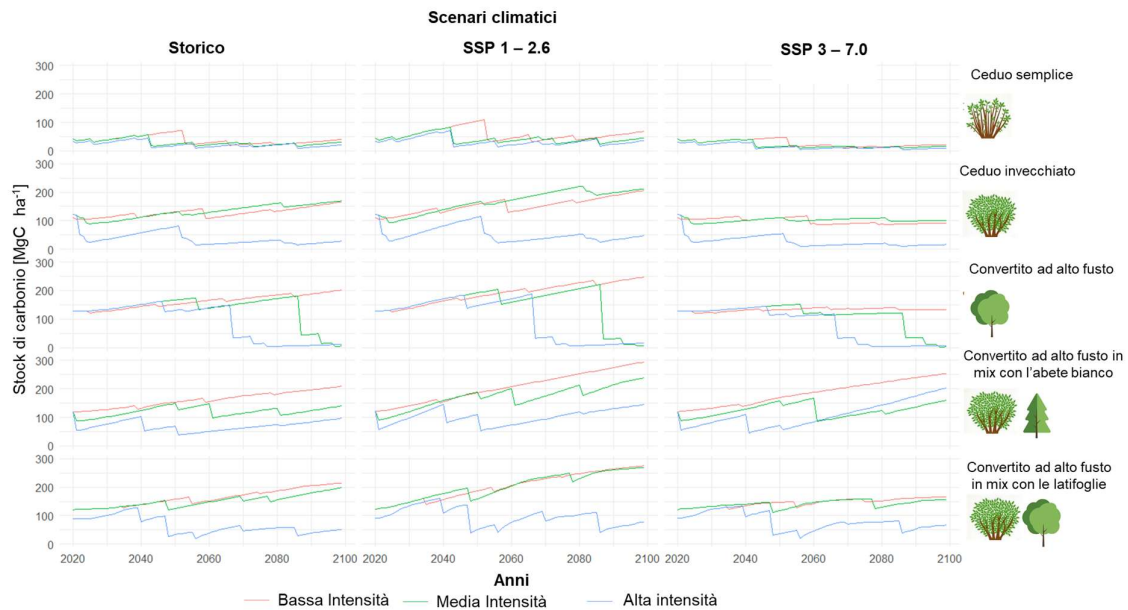


Figura 11: andamento degli stock di carbonio nella biomassa forestale in stand di faggio puri all'interno del PNATE secondo le modellazioni 3PG

I trend di accrescimento e i relativi stock di carbonio dipendono fortemente dai diversi scenari climatici e dalle gestioni (Figura 11).

Riguardo agli scenari climatici, considerando lo scenario SSP 1 – 2.6 gli stock di carbonio nella biomassa forestale di foreste di faggio aumentano rispetto allo scenario storico, indipendentemente dalla gestione iniziale e dall'intensità di gestione dei diversi scenari. La letteratura che tratta gli effetti degli aumenti di temperatura e siccità sulla crescita del faggio mostra risultati diversi e alle volte in contraddizione tra loro. Diversi studi riferiscono di aumenti della crescita delle foreste e quindi degli stock di carbonio nella biomassa: Hacket-Pain & Friend (2017) hanno osservato aumenti sul tasso di crescita dei faggi nel loro limite meridionale a seguito di un aumento di temperatura, così come Tegel et al. (2013). E' interessante notare che entrambi gli studi sono stati svolti in ambiente mediterraneo. Gli studi svolti a scala più ampia, invece, mostrano tassi di crescita del faggio solitamente correlati negativamente all'aumento delle temperature e della siccità (e.g. del Castillo et al., 2022; Latte et al. 2015; Zimmermann et al., 2015). I risultati del nostro studio possono essere spiegati tenendo conto delle caratteristiche della stazione presa in considerazione (del Castillo et al., 2022). L'area del parco e le foreste di faggio campionate si trovano nel limite superiore del faggio, >1000 m s.l.m. E' stato osservato da diversi studi come l'aumento di temperature possa aumentare l'accrescimento del faggio in stazioni ad altitudini elevate (> 500 m s.l.m, Pavlovic' et al., 2019) andando a favorire cambiamenti nella vegetazione in queste zone ecotonali (Calderaro et al., 2020). L'aumento di temperature nello scenario SSP 1.2 – 6 può quindi rendere la zona appenninica un 'rifugio climatico' per le foreste di faggio, aumentando la sua presenza e quindi la competizione e mescolanza con l'abete. Questo risultato è supportato anche dalle simulazioni fatte tramite *species distribution models* nello studio 'Interventi per l'adattamento al cambiamento climatico di cedui e fustaie transitorie di faggio su proprietà demaniali'.

Nello scenario SSP 3.7 – 0 l'accrescimento delle foreste si riduce sensibilmente, andando a influire negativamente sugli stock di carbonio. Questi risultati sottolineano l'esistenza di una soglia climatica al di là del quale il faggio non riesce ad adattarsi e risulta fisiologicamente inadatto alle nuove condizioni della stazione, come confermato da numerosi studi (e.g. del Castillo et al., 2022; Latte et al. 2015; Zimmermann et al., 2015). Queste limitazioni sono principalmente dovute alla aumentata necessità di risorse idriche del faggio data dall'incremento della temperatura unita a una riduzione della disponibilità d'acqua nel suolo (del Castillo et al., 2022). Da un punto di vista fisiologico, i meccanismi che con più probabilità implicano questa riduzione della crescita sono i) la maggior perdita di carbonio respiratorio e, di conseguenza, la ridotta disponibilità di carboidrati per la crescita, e ii) una maggiore richiesta atmosferica di vapore acqueo, che potrebbe deteriorare lo stato idrico nei tessuti fogliari e nel fusto (Latte et al. 2015).

Quando si considerano i boschi in mix con l'abete nel limite superiore del PNATE, questi risultano avere degli aumenti di stock in entrambi gli scenari climatici, (SSP 1.2 – 6 e 3.7 – 0, Figura 11) se comparati al clima storico. Diversi studi corroborano i risultati, con le specie di *Abies* che mostrano un aumento dell'areale potenziale in diversi scenari di climate change (López-Tirado et al., 2023). Il mix con le latifoglie aumenta la produttività e quindi degli stock di carbonio nello scenario SSP 1.2 – 6. Lo scenario SSP 3.7 – 0, invece, non risulta significativamente differente dallo scenario storico.

Bilancio di stock di carbonio nel periodo 2020 - 2100 in diversi scenari climatici

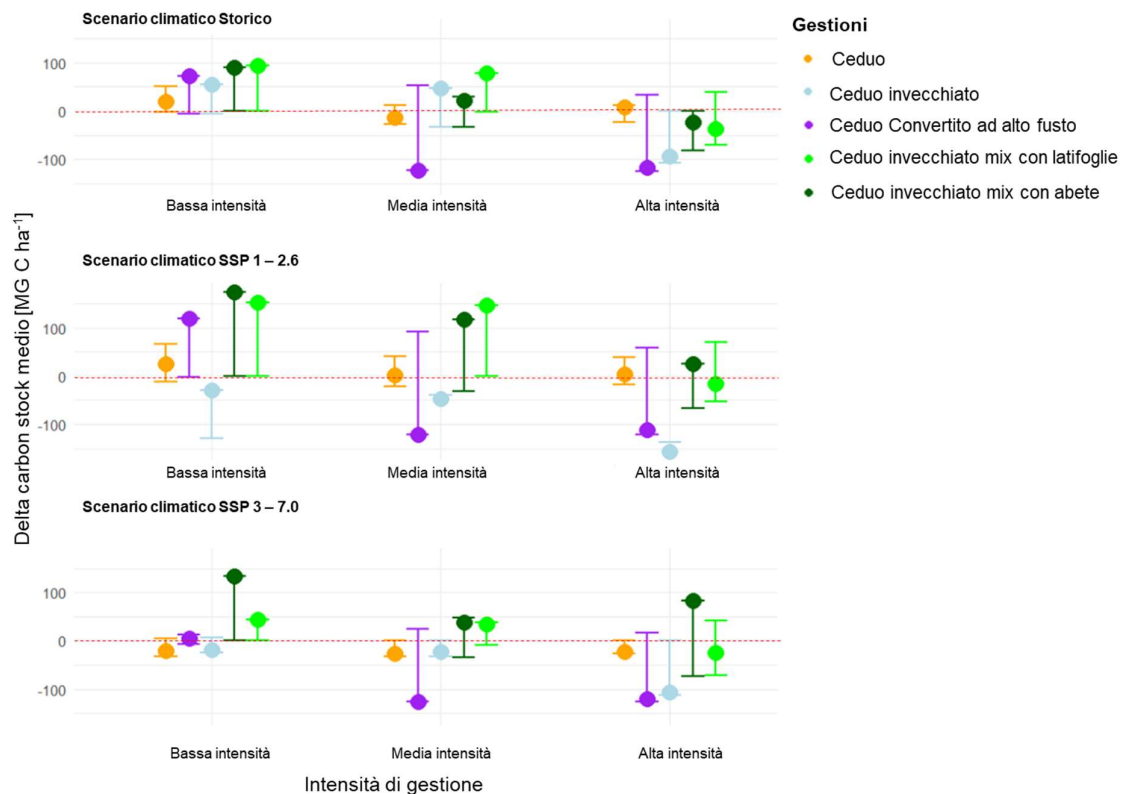


Figura 12: Differenze di stock di carbonio nella biomassa forestale tra la quantità di stock odierna al 2020 e i) il 2060, ii) tra il 2060 e il 2100 nei tre scenari climatici e per le tre intensità di gestione

Tabella 3: Differenze di stock di carbonio nella biomassa forestale tra la quantità di stock odierna al 2020 e i) il 2060, ii) tra il 2060 e il 2100 e iii) sul periodo totale 2020 – 2100 nei tre scenari climatici e per le tre intensità di gestione

		2020 - 2060			2060 - 2100			TOTAL 2020 - 2100		
Gestione oggi	Intensità gestione futura	Hist	1.2 - 6	3.7 - 0	Hist	1.2 - 6	3.7 - 0	Hist	1.2 - 6	3.7 - 0
[tC * ha ⁻¹]										
<i>Ceduo in turno</i>	Alta	-2.8	-11.1	-24.0	11.5	14.3	1.4	8.7	3.2	-22.5
	Media	-22.4	-8.6	-30.3	9.8	9.2	3.5	-12.6	0.6	-26.7
	Bassa	8.3	1.3	-23.8	11.5	23.7	2.7	19.8	25.0	-21.1
<i>Ceduo invecchiato</i>	Alta	-104.7	-201.5	-110.0	10.9	43.9	4.0	-93.8	-157.6	-106.0
	Media	7.1	105.6	-20.3	40.4	85.2	-1.6	47.5	190.8	-22.0
	Bassa	-1.7	44.0	-20.3	57.4	159.1	1.6	55.7	203.1	-18.8
<i>Convertito ad alto fusto</i>	Alta	11.5	44.0	-14.0	-128.4	-155.7	-107.2	-116.9	-111.7	-121.3
	Media	10.1	30.7	-7.3	-133.2	-151.9	-118.3	-123.1	-121.2	-125.6
	Bassa	38.2	70.3	11.0	35.1	48.8	-5.9	73.3	119.1	5.1
<i>Ceduo invecchiato mix con latifoglie</i>	Alta	-50.9	-14.9	-45.0	13.1	-0.2	20.7	-37.8	-15.2	-24.3
	Media	26.5	81.6	25.9	51.2	65.4	8.3	77.6	147.0	34.2
	Bassa	30.9	83.3	21.4	62.4	68.9	22.6	93.2	152.3	44.0
<i>Ceduo invecchiato mix con abete</i>	Alta	-69.7	-47.6	-36.4	46.3	72.1	119.4	-23.4	24.5	83.0
	Media	27.1	79.4	46.9	-6.1	37.7	-8.3	21.1	117.1	38.7
	Bassa	35.5	87.8	67.7	53.9	85.8	65.3	89.4	173.6	133.0

Storico

Per lo scenario storico del cambiamento climatico, il ceduo mostra un bilancio del carbonio simile tra i diversi trattamenti ed è l'unico trattamento con un aumento netto del carbonio positivo con un'alta intensità di gestione (+8.7 MgC * ha⁻¹, Figura 12, Tabella 3). Il ceduo invecchiato ha un delta positivo del carbonio con bassa e media intensità, mentre mostra una perdita di delta C nella gestione ad alta intensità. Il ceduo convertito ad alto fusto ha un bilancio del carbonio positivo solo con una gestione a bassa intensità, mentre le intensità medie e alte hanno le perdite nette di C più alte rispetto ad altri trattamenti e intensità (rispettivamente -123.1 MgC * ha⁻¹, -116.9 MgC * ha⁻¹; Tabella 3, Figura 12). Faggio in mix con abete bianco mostra una diminuzione dello stoccaggio del carbonio nel periodo 2020-2100 con l'aumento dell'intensità di gestione, risultando in una perdita di carbonio solo con alta intensità (-23.4 MgC * ha⁻¹). Le migliori performance in termini di stoccaggio del carbonio delta sono osservate con Faggio mista con latifoglie con gestione a bassa e media intensità (rispettivamente +96.2 e 77.6 MgC * ha⁻¹). La miscela con latifoglie con gestione ad alta intensità ha una perdita netta di C.

SSP 1 - 2.6

Rispetto allo scenario storico, la tendenza dei diversi tipi di gestione a seguito di un aumento dell'intensità rimane la stessa, tuttavia lo scenario climatico risulta più favorevole allo sviluppo del faggio con un aumento netto degli stock di carbonio rispetto allo scenario climatico storico (Tabella 3, Figura 12). Il ceduo non differisce significativamente dagli scenari storici, con bassa variazione nello stoccaggio del carbonio aumentando l'intensità, tuttavia tutti i valori di delta carbonio sono positivi con i minori stoccaggi di C con una gestione di intensità media (+0.6 MgC * ha⁻¹). Il ceduo invecchiato mostra il più alto delta positivo di carbonio con bassa e media intensità (+203.1 MgC * ha⁻¹ e +190.8 MgC * ha⁻¹ rispettivamente), ma anche la più alta diminuzione degli stock di C con la gestione ad alta intensità (-157 MgC * ha⁻¹). Il ceduo convertito a alto fusto ha la stessa tendenza del clima storico, con un delta positivo di C solo con gestione a bassa intensità, ed importanti perdite di stock di C con gestione a media e alta intensità. La miscela con latifoglie e abete bianco ha tendenze simili con importanti aumenti positivi di stock di C con gestione a bassa e media intensità (Tabella 3) e perdite di C con alta intensità per il mix con latifoglie, mentre il mix con abete bianco ha un delta C positivo anche con alta intensità di gestione (+24.5 MgC * ha⁻¹, Tabella 3).

SSP 3 - 7.0

Con lo scenario di cambiamento climatico più grave, il bilancio complessivo del carbonio diminuisce drasticamente, e i soli delta positivi di carbonio li possono osservare con il faggio in mix con latifoglie e abete bianco (Tabella 3, Figura 12). Con SSP 3 -7.0 Il faggio in mix con abete bianco ha una performance migliore rispetto al clima storico, con il maggiore aumento del delta di carbonio con gestione a bassa intensità (+133 MgC * ha⁻¹). Il mix con latifoglie ha un delta C negativo con gestione ad alta intensità e un bilancio positivo con gestione a media e bassa intensità (+34.2 e +44 MgC * ha⁻¹ rispettivamente). Il ceduo in turno ha la tendenza che rimane uguale a quella degli altri scenari climatici analizzati, ma il bilancio di carbonio è sempre negativo, indipendentemente dall'intensità di gestione (Tabella 3). Il ceduo invecchiato mostra un bilancio del carbonio lievemente negativo con gestione a bassa e media intensità (Figura 12), mentre con una gestione ad alta intensità le perdite di delta C aumentano (-106 MgC * ha⁻¹). Infine, il ceduo convertito ad alto fusto ha le perdite di stock di C più elevate con gestione a media e bassa intensità (-125.6 e 121.3 MgC * ha⁻¹ rispettivamente), mentre ha un delta C lievemente positivo con gestione a bassa intensità.

Modellazione di sink di carbonio nella biomassa forestale

Andamento dei sink di carbonio forestali nel periodo 2020 - 2100 in diversi scenari climatici

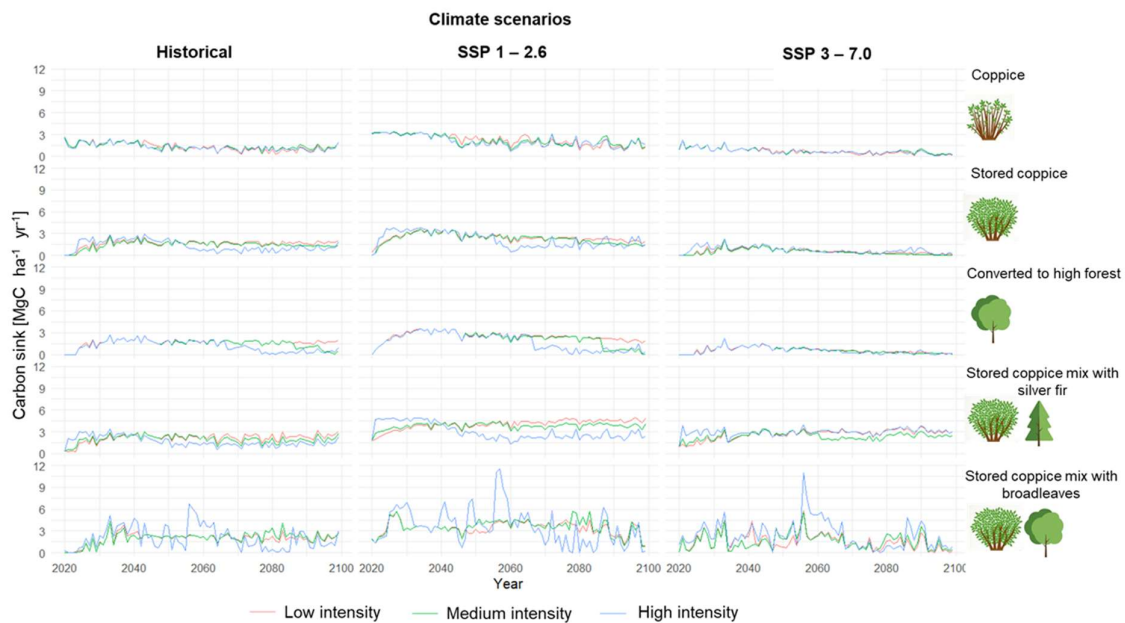


Figura 13: andamento dei sink di carbonio nella biomassa forestale in stand di faggio puri all'interno del PNATE secondo le modellazioni 3PG

I sink di carbonio forestali risultano aumentare con lo scenario SSP 1.2 – 6 rispetto allo storico, diminuendo invece nello scenario SSP 3.7 – 0 (Figura 13). Di nuovo, questi risultati illustrano come uno scenario di cambio climatico con un futuro in cui ci sono politiche e azioni globali efficaci per affrontare i cambiamenti climatici con incrementi ridotti di temperatura vada a favorire i sink forestali nelle foreste pure di faggio, mentre uno scenario con ridotti sforzi comuni per il mitigamento del cambio climatico (SSP 3.7 – 0) risulti in una sensibile diminuzione dei sink di carbonio forestali (e.g. del Castillo et al., 2022; Latte et al. 2015; Zimmermann et al., 2015).

Possiamo anche osservare come i sink forestali tendano a diminuire con il passare del tempo (Figura 13). Questa diminuzione può dipendere da diversi processi a seconda della gestione. Nella gestione a

bassa intensità, l'età e i processi di senescenza hanno un ruolo preponderante nell'andamento dei sink. In accordo con l'ipotesi di sviluppo degli ecosistemi di Odum, i sink hanno un rapido aumento iniziale nella produzione netta dell'ecosistema durante le prime fasi della successione, che si riduce poi in fase tardiva della successione per l'aumento di competizione e invecchiamento di piante a breve ciclo di vita (Odum, 1969). L'ipotesi di Odum è stata però ridimensionata da successivi studi, che mostrano come in stadi maturi il bosco abbia un sink di carbonio forestale positivo e non pari a zero o negativo (Curtis & Gough, 2018). I nostri risultati sono in linea con queste osservazioni, mostrando una riduzione del sink forestale data dall'invecchiamento che non diminuisce sensibilmente grazie ai tagli selettivi (Figura 13d) e alla conversione ad alto fusto della foresta (Figura 13g), che riduce la competizione e aumenta l'efficienza dei sink.

Nelle gestioni forestali ad intensità alta e media, l'effetto degli interventi selvicolturali è più marcato, con il ceduo semplice che presenta un andamento eterogeneo dei sink di carbonio dati da i tagli che impattano su gran parte della superficie forestale (90%) (Figura 13 b-c). Nel ceduo convertito ad alto fusto, si possono vedere gli effetti dei tagli di sgombero che riducono sensibilmente i sink forestali che, dopo un periodo di 5-7 anni, tendono ad aumentare senza però tornare ai livelli pre taglio nell'arco della simulazione (Figura 13e-f). Nel ceduo invecchiato il ritorno alla ceduazione (Figura 13 i) porta ad una riduzione dei sink più sensibile rispetto ad adottare una gestione a ceduo a sterzo (Figura 13 h).

I sink di carbonio forestali delle foreste di faggio in mix con abete hanno una risposta differente rispetto ai boschi puri di faggio. L'abete ha una buona risposta a scenari di cambio climatico e soffre meno di faggio le nuove condizioni ecologiche. Questo, unito ai più alti accrescimento dell'abete rispetto al faggio, fa sì che lo scenario di clima 'storico' sia quello con accrescimenti e sink minori, mentre l'SSP 1.2 – 6, ancora, risulti in un aumento dei sink forestali (Figura, 13 a-b*c).

Il mix con le latifoglie ha sink di carbonio con andamenti eterogenei e con comportamenti diversi rispetto alle altre gestioni. Questa variabilità può avere una spiegazione nelle diverse risposte di faggio e castagno al clima. Va però sottolineato che l'elevata variabilità potrebbe essere dovuta anche alla parametrizzazione del castagno. Il castagno non ha una parametrizzazione standard, e il modello è stato parametrizzando utilizzando dati da letteratura per il "*light model*", "*transpiration model*" e "*physiological model*". Il modello risultante è stato poi calibrato utilizzando i dati di sink storici osservati tramite le analisi dei tasselli legnosi. La parametrizzazione delle specie forestali è ancora un importante ostacolo per i modelli basati sui processi come il 3PG, e dovrebbe essere meglio indagata sul campo, creando un ampio database di specie parametrizzate (van Oijen 2017; Forrester et al., 2021). Gli andamenti dei sink nel ceduo in mix con le latifoglie Aumentano nello scenario climatico SSP 1.2 – 6. Nello scenario climatico più grave 3.7 – 0 hanno una diminuzione minore rispetto ai boschi puri di faggio.

Sink forestali medi nel periodo 2020 - 2100 in diversi scenari climatici

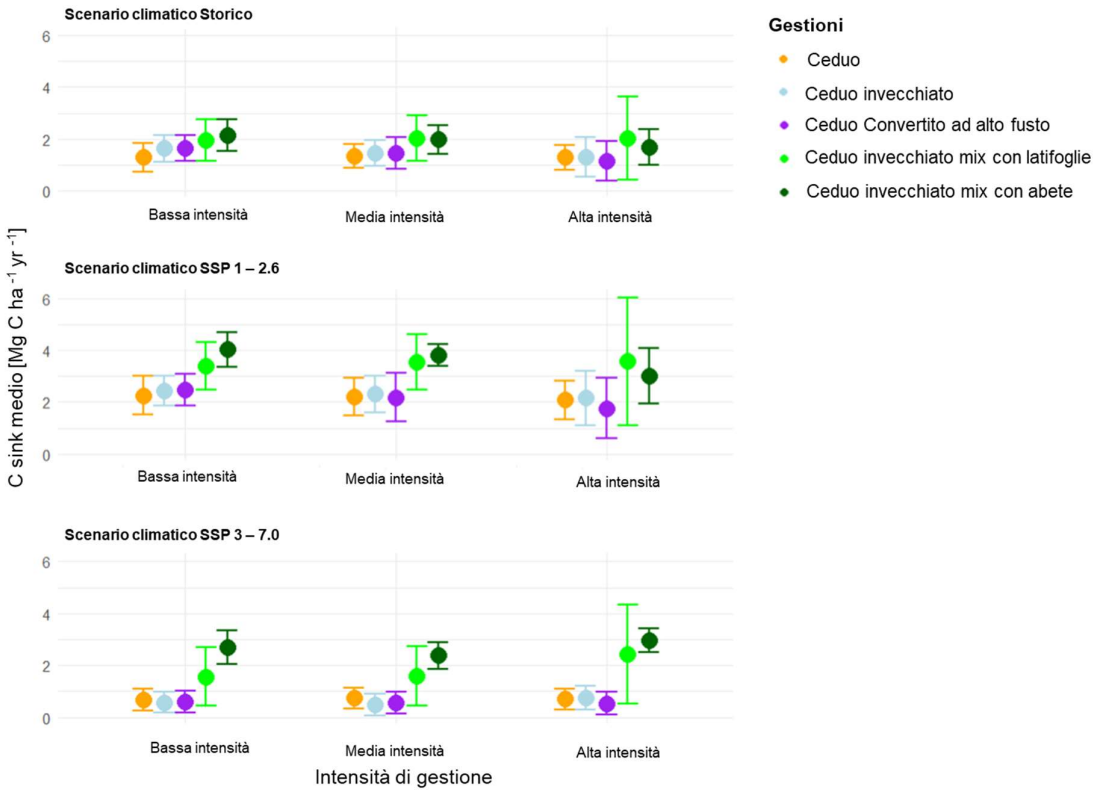


Figura 14: Sink medi di carbonio nella biomassa forestale nei periodi i) dal 2020 al 2060 e ii) tra il 2060 e il 2100 nei tre scenari climatici e per le tre intensità di gestione

Tabella 4: Sink medi di carbonio nella biomassa forestale tra i) il 2020 e il 2060, ii) tra il 2060 e il 2100 e iii) sul periodo totale 2020 – 2100 nei tre scenari climatici e per le tre intensità di gestione

		2020 - 2060			2060 - 2100			TOTAL 2020 - 2100		
Gestione oggi	Intensità gestione futura	Hist	1.2 - 6	3.7 - 0	Hist	1.2 - 6	3.7 - 0	Hist	1.2 - 6	3.7 - 0
[tC * ha ⁻¹ * yr ⁻¹]										
Ceduo in turno	Alta	1.5	2.5	0.9	1.0	1.7	0.5	1.3	2.1	0.7
	Media	1.6	2.6	0.9	1.1	1.8	0.5	1.3	2.2	0.7
	Bassa	1.6	2.8	0.9	0.9	1.7	0.4	1.3	2.3	0.7
Ceduo invecchiato	Alta	1.8	2.9	1.0	0.8	1.4	0.5	1.3	2.2	0.7
	Media	1.4	2.6	0.7	1.5	2.0	0.3	1.5	2.3	0.5
	Bassa	1.6	2.7	0.8	1.7	2.2	0.4	1.6	2.4	0.6
Convertito ad alto fusto	Alta	1.6	2.6	0.8	0.7	0.9	0.3	1.1	1.8	0.5
	Media	1.6	2.6	0.8	1.4	1.7	0.3	1.5	2.2	0.6
	Bassa	1.6	2.7	0.8	1.7	2.3	0.4	1.6	2.5	0.6
Ceduo invecchiato mix con latifoglie	Alta	2.4	4.7	3.0	1.6	2.5	1.9	2.0	3.6	2.4
	Media	1.8	3.6	1.8	2.3	3.5	1.4	2.0	3.6	1.6
	Bassa	1.9	3.4	1.9	2.0	3.4	1.3	2.0	3.4	1.6
Ceduo invecchiato mix con abete	Alta	2.1	3.7	2.8	1.3	2.4	3.1	1.7	3.0	3.0
	Media	2.1	3.8	2.4	1.9	3.8	2.3	2.0	3.8	2.4
	Bassa	2.0	3.6	2.3	2.3	4.5	3.0	2.2	4.0	2.7

Storico

L'assorbimento di carbonio del ceduo in turno non risponde in maniera significativa all'aumento dell'intensità di gestione e ha un assorbimento costante di C di 1.3 MgC * ha⁻¹ * anno⁻¹ (Figura 14,

Tabella 4). Il ceduo invecchiato e il ceduo convertito ad alto fusto diminuiscono l'assorbimento di C con l'aumento dell'intensità, passando da $1.6 \text{ MgC} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{anno}^{-1}$ con gestione a bassa intensità a 1.3 e $1.1 \text{ MgC} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{anno}^{-1}$ rispettivamente. Il ceduo invecchiato in mix con latifoglie ha un assorbimento di carbonio costante di $2 \text{ MgC} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{anno}^{-1}$ indipendentemente dall'intensità di gestione. Il ceduo invecchiato misto con abete bianco presenta il più alto assorbimento di C pari a $2.2 \text{ MgC} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{anno}^{-1}$ con gestione a bassa intensità, che diminuisce con l'aumento dell'intensità a 2 e $1.7 \text{ MgC} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{anno}^{-1}$ con intensità di gestione rispettivamente media e bassa.

SSP 1 - 2.6

Nello scenario climatico 1 - 2.6, il ceduo mostra un aumento di assorbimento di C rispetto allo scenario climatico storico che diminuisce con l'intensità da 2.3 a $2.1 \text{ MgC} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{anno}^{-1}$ con bassa e alta intensità rispettivamente (Figura 14, Tabella 4). L'assorbimento di carbonio modellato per il ceduo invecchiato ha simili valori e risposta alla gestione (Fig 14, Tabella 4). Il ceduo convertito ad alto fusto ha una maggiore variabilità ma una tendenza simile, con $2.5 \text{ MgC} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{anno}^{-1}$ con gestione a bassa intensità e $1.8 \text{ MgC} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{anno}^{-1}$ con gestione ad alta intensità. I valori medi di assorbimento di C più elevati e costanti sono del ceduo invecchiato misto con latifoglie ($3.4 \text{ MgC} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{anno}^{-1}$ per bassa intensità e $3.6 \text{ MgC} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{anno}^{-1}$ per intensità media e alta). Ancora una volta, la miscela con abete bianco mostra il più alto potenziale di assorbimento di C con gestione a bassa intensità ($4 \text{ MgC} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{anno}^{-1}$), diminuendo con l'aumento dell'intensità di gestione (3.8 e $3 \text{ MgC} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{anno}^{-1}$ per media e alta intensità).

SSP 3 - 7.0

Lo scenario di cambiamento climatico 3 - 7.0 ha i valori più bassi di assorbimento di carbonio rispetto ai due precedenti scenari (Fig 14, Tabella 4). Il ceduo attivo ha un assorbimento costante di C di $0.7 \text{ MgC} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{anno}^{-1}$ indipendentemente dall'intensità di gestione. Il ceduo invecchiato mostra un aumento degli assorbimenti di carbonio con l'aumento dell'intensità di gestione ($0.6 \text{ MgC} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{anno}^{-1}$ con bassa intensità, $0.7 \text{ MgC} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{anno}^{-1}$ con alta intensità di gestione). Il ceduo convertito ad alto fusto mostra un assorbimento di C piuttosto costante con l'aumento dell'intensità di gestione ($0.6 \text{ MgC} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{anno}^{-1}$ per bassa e media intensità, $0.5 \text{ MgC} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{anno}^{-1}$ per alta intensità). La miscela con latifoglie e la miscela con abete bianco sono le gestioni che si comportano meglio e aumentano l'assorbimento di C con l'aumento dell'intensità di gestione. Il ceduo invecchiato in miscela con latifoglie passa da $1.6 \text{ MgC} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{anno}^{-1}$ con intensità di gestione media e bassa a $2.4 \text{ MgC} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{anno}^{-1}$ con alta intensità di gestione. La miscela con abete bianco passa da $2.7 \text{ MgC} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{anno}^{-1}$ con bassa intensità a $3 \text{ MgC} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{anno}^{-1}$ con alta intensità di gestione, il valore più alto per questo scenario climatico.

Scenari futuri per la gestione delle foreste del PNATE in ottica di massimizzazione degli stock e dei sink forestali

Il destino delle foreste di faggio all'interno del PNATE dipenderà in larga misura dalla gravità del cambio climatico futuro. Lo scenario di cambiamento climatico SSP 1 - 2.6 favorisce i sink di carbonio delle foreste e, con una intensità di gestione bassa, anche la conservazione degli stock di carbonio. Questo comportamento è stato osservato da precedenti lavori di modellazione, che mostrano come l'aumento della concentrazione di CO₂ sia positivamente correlato all'efficienza fotosintetica e alla produzione di biomassa, il cosiddetto "effetto di fertilizzazione della CO₂" (Reyer et al., 2014). Tuttavia, questa dinamica si perde nello scenario SSP 3 - 7.0. Diversi autori sottolineano come nell'Europa meridionale un effetto più intenso dei cambiamenti climatici possa influenzare la produttività delle foreste di faggio a causa di cambiamenti nei driver ambientali (Schelhaas et al., 2015; Zimmermann et al., 2016). È interessante notare che, con l'aumento dell'intensità dei cambiamenti climatici, gli effetti della gestione sono meno pronunciati (come differenza tra gestione a bassa intensità e alta intensità sul bilancio degli stock di carbonio e sui sink di carbonio medi). La diminuzione della crescita correlata allo stress nello scenario SSP 3 - 7.0 è quindi più evidente rispetto a quella causata dall'intensità della gestione, e riduce la possibilità di aumentare i sink di carbonio delle foreste con opzioni di gestione meno intense.

Il ceduo in turno mostra la minore variabilità degli stock di carbonio e dei sink di carbonio medi con l'aumento degli effetti dei cambiamenti climatici. Questo effetto potrebbe essere dovuto ai brevi turni della ceduzione del faggio (30 - 45 anni) che diminuiscono sensibilmente l'impatto della competizione, migliorando il recupero dallo stress da siccità e la riduzione della crescita dovuta ai cambiamenti climatici. La riduzione della densità può ridurre le diminuzioni della crescita durante la siccità, tuttavia gli effetti sulla crescita dopo lo stress sono incerti poiché i processi a scala locale giocano un ruolo fondamentale nell'influenzare queste risposte (Castagneri et al., 2022). Il ceduo in turno è anche meno sensibile a un aumento dell'intensità della gestione. Allungare il turno non sembra aumentare significativamente lo stoccaggio di carbonio nella foresta di ceduo. Tuttavia, l'aumento massimo del turno che può essere considerato è di 45 anni, poiché un ceduo più vecchio dovrebbe essere convertito ad alto fusto (Regione Emilia Romagna, 2018). Per questo motivo, nei boschi gestiti a ceduo ancora in turno, potrebbe essere preferibile aumentare l'intensità della gestione e dare priorità ad altri servizi ecosistemici (ad esempio, la produttività) rispetto allo stoccaggio del carbonio, poiché nei limiti legislativi il ceduo attivo non sembra mostrare margini elevati di aumento degli stock di carbonio.

I cedui invecchiati mostrano sink di carbonio della biomassa abbastanza costanti nel periodo modellato, anche se gli stock di carbonio cambiano drasticamente tra gestione a bassa/media intensità e gestione ad alta intensità. Il ritorno alla gestione attiva del ceduo ha un effetto drammatico sul bilancio degli stock di carbonio, tuttavia influisce solo marginalmente sui sink di carbonio. È interessante notare come una gestione con intensità media (ad esempio, la ceduzione a sterzo) abbia valori di bilancio di carbonio e sink medi vicini a quelli della bassa intensità (conversione ad alto fusto). Questo risultato sottolinea la possibilità di riprendere la gestione con intensità media, per preservare i sink e gli stock di carbonio senza perdere il valore culturale ed economico della gestione a ceduo. Come previsto, la conversione ad alto fusto ha la massima sensibilità alla gestione: i tagli selettivi ad albero hanno prestazioni migliori in termini di sink e stock di carbonio rispetto ai sistemi a tagli successivi, come confermato dalla maggior parte della letteratura (ad esempio, Gusti 2020; Ameray et al., 2021, 2023). L'aumento della durata del turno contribuisce ad aumentare le scorte di carbonio nelle foreste (Kaipainen et al., 2004; Couture e Reynaud, 2011; Yan, 2018). Tuttavia, è interessante notare che, nello scenario SSP 3 - 7.0, quindi in scenari di cambiamento climatico più estremi, l'effetto

della gestione è meno intenso, probabilmente a causa dello stress legato ai fattori ambientali che prevalgono sull'effetto della gestione. È importante sottolineare, ancora una volta, che per valutare meglio il ruolo delle foreste per la mitigazione della crisi climatica è fondamentale considerare anche gli stock di carbonio nei prodotti legnosi e il loro destino. Inoltre, i processi di rinnovazione naturale sono ostacolati dai cambiamenti climatici, in particolare nei boschi ad alto fusto (Cullotta et al., 2016).

I mix di faggio con abete bianco e latifoglie hanno dimostrato di avere le migliori prestazioni in termini di sink di carbonio medio e bilancio di stock di carbonio. Le migliori prestazioni delle formazioni forestali miste in termini di sink e stock di carbonio e la loro resilienza ai cambiamenti climatici sono supportate da un'ampia letteratura (ad esempio, Zimmermann, 2016; Paul et al., 2019a, 2019b; Pretzsch, 2020). Inoltre, è stato osservato che gli abeti nei mix con il faggio presenteranno diametri maggiori rispetto ai faggi in una prospettiva di cambio climatico (Thurm & Pretzsch, 2016). A causa della sensibilità del faggio alle siccità (Zimmermann, 2016), l'abete bianco tende a sostituire gli esemplari di faggio nel mix, con una futura predominanza di specie di conifere nel mix con il faggio. A quote più basse, in mix con le latifoglie, ci si aspetta che il Faggio perda capacità competitiva nei grandi alberi dominanti (poiché faticano ad affrontare le siccità), tuttavia gli alberi più piccoli potrebbero ancora essere forti competitori, mantenendo inalterata la composizione della foresta (Zimmermann, 2016). Quando in mix con latifoglie, la conversione da alto fusto ha le migliori prestazioni in termini di stock di carbonio, ma i sink di carbonio medi risultano simili, ad eccezione dell'opzione di gestione ad alta intensità nello scenario SSP 3 - 7.0 che ha valori di sink medio maggiori rispetto alla gestione ad intensità bassa e media. Questo risultato sottolinea che l'aumento dell'intensità della gestione ha effetti di riduzione minori (e talvolta positivi) sugli stock di carbonio in un'ottica di cambio climatico, come osservato da altri studi (ad esempio, Krug 2019; Ameray et al., 2021). Questo effetto è probabilmente dovuto a una minore concorrenza, a un contributo più proporzionato di tutte le dimensioni degli alberi ai sink di carbonio, a un miglioramento dell'efficienza nell'uso delle risorse (Krug 2019). Tuttavia, una maggiore intensità della gestione comporta un maggiore prelievo di biomassa, quindi una diminuzione degli stock di carbonio. È necessario, quindi, considerare il destino dei prodotti derivati dal legno, il loro ciclo di vita e l'effetto di sostituzione per comprendere realmente l'effetto di un aumento della intensità di gestione sugli stock di carbonio e sulla mitigazione dei cambiamenti climatici (Profft et al., 2009; Jordan et al., 2018).

È importante sottolineare che nella nostra modellazione non è stata inclusa l'occorrenza di disturbi. I disturbi probabilmente diventeranno un importante driver per la dinamica dello stoccaggio di carbonio nelle foreste del PNATE. L'effetto della gestione e del mix sul loro tempo di ritorno dovrebbe essere considerato per comprendere meglio il potenziale di mitigazione climatica di queste foreste (Seidl et al., 2014; Müller et al., 2019).

Suggerimenti di gestione

Obiettivi di Gestione

Alla luce delle campagne di censimento degli stock e sink di carbonio dei boschi di faggio all'interno del PNATE e la successiva modellazione, si suggerisce una strategia gestione forestale che possa contribuire all'ottenimento di tre obiettivi principali

- Conservazione e protezione degli stock di carbonio forestale esistente
- Aumento dei sink di carbonio forestali considerando il trade - off tra aumento dei sink di carbonio e diminuzione degli stock
- Creazione di una filiera di prodotti forestali che valorizzino gli stock di carbonio nei prodotti legnosi, favorendo un utilizzo a cascata del legname

Per ogni tipologia di gestione, si suggeriscono degli obiettivi specifici che riescano a massimizzare i due principali servizi ecosistemici considerati (mitigazione del cambio climatico e produzione) considerando il trade - off presente tra essi (Figura 15)

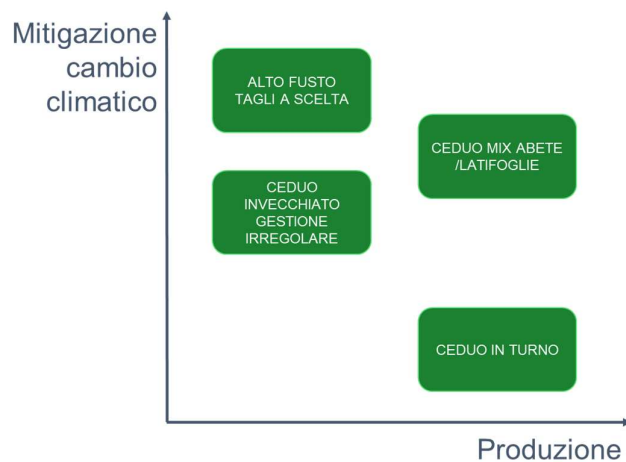


Figura 15: tradeoff tra mitigazione del cambio climatico e produzione per le diverse gestioni dei boschi di faggio del Parco nazionale dell' Appennino Tosco Emiliano

- Ceduo in turno: Il bosco ceduo può essere preservato poiché è la gestione che mostra la minore variabilità dovuta ai cambiamenti climatici in termini di sink medio di carbonio e variazione dei carbon stock. Inoltre, fornisce importanti servizi di approvvigionamento e culturali. Inoltre, il turno breve permette di avere sink di carbonio costanti assicurando la rinnovazione del bosco. Vari studi suggeriscono un uso a filiera corta del legname per bioenergia che permetta un allontanamento dai combustibili fossili e un riassorbimento veloce delle emissioni da combustione grazie ai turni brevi del bosco. Favorire un utilizzo legato all'autosufficienza energetica potrebbe essere quindi una strategia vincente per preservare il valore culturale del ceduo e pratiche di mitigazione del cambio climatico.
- Ceduo invecchiato: il ceduo invecchiato all'interno del PNATE ha la potenzialità, tramite una gestione con intensità "media" di preservare lo stock di CO₂ nel lungo periodo e garantire valori di sink importanti. Per questa ragione, è suggerito un utilizzo a ceduo a sterzo o una parziale conversione ad alto fusto per ottenere un bosco a ceduo composto, che possa massimizzare i sink e gli stock di carbonio forestale. Nella gestione a ceduo composto, si consiglia quindi di gestire a ceduo il 40% delle ceppaie presenti, e convertire il restante 60% in alberi ad alto fusto, favorendo un utilizzo locale della legna. La selezione deve essere fatta ad albero. Seguendo le linee guida AForClimate, questa gestione si inserisce nel filone della strategia alternativa a trattamento irregolare dei cedui invecchiati di faggio (Wolynski, 2002 a, b). Questo tipo di trattamento prevede interventi non uniformi all'interno della foresta, con obiettivi differenziati per gli individui di alta qualità (selvicoltura d'albero) e per gli altri individui. Quest'approccio supera la distinzione netta tra ceduo e fustaia, perseguendo diversi obiettivi: i) Valorizzare i tipi di legname pregiato, ii) Migliorare la biodiversità specifica attraverso il rilascio delle specie sporadiche, iii) Evitare interventi dispersivi a macchiatico negativo.
- Ceduo convertito ad alto fusto: questa gestione è la più delicata in termini di protezione degli stock di carbonio. Una gestione a tagli successivi (intensità medio/alta) risulterebbe in una perdita di stock di carbonio forestale importante data dalle alte utilizzazioni legnose (ad eccezione dello scenario climatico SSP 3.7 – 0 in cui il faggio risulta comunque in sofferenza. Di nuovo, è importante considerare quale sia il destino dei prodotti legnosi. Se i prodotti

legnosi sono destinati a un uso manifatturiero, una analisi LCA potrebbe aiutare a approfondire il reale impatto di mitigazione dell'alto fusto inteso come filiera produttiva. Per questa ragione si suggerisce un taglio a scelta culturale e una conservazione dello stock, unita ad un rilascio di necromassa che possa indirizzare questi boschi alla massimizzazione della biodiversità. Il diradamento deve essere eseguito dall'alto eseguito nelle condizioni di bosco maturo con struttura stabile (Garfi & Torreggiani, 2023).

- Ceduo in mix con abete: il ceduo in mix con abete risulta essere la gestione più resistente al cambio climatico, aumentando sensibilmente i sink e gli stock di carbonio. Dati i buoni risultati anche con intensità alte di gestione, si suggerisce nei boschi con facile accesso una gestione a intensità media: ceduo matricinato per il faggio e a tagli successivi con turni estesi per l'abete. Nei boschi difficilmente raggiungibili, una gestione a bassa intensità con tagli a scelta o anche un invecchiamento del bosco possono garantire di preservare gli stock di carbonio senza una riduzione sensibile dei sink.
- Ceduo in mix con le latifoglie: Il mix di faggio e latifoglie mostra valori di sink di carbonio e variazioni di stock positive anche con gestioni intense e una maggiore resilienza al cambio climatico. Come linee guida generali, quindi, vanno favoriti i boschi in mix faggio – latifoglie. Le migliori performance si ottengono con un'intensità di gestione media o bassa. Si suggerisce, quindi, nei boschi di facile accesso, un utilizzo tramite ceduo a sterzo o comunque asportando il 30% della biomassa forestale. In questo modo si garantisce una massimizzazione dei sink senza impattare in modo troppo significativo sugli stock di carbonio nella biomassa. Un'altra opzione è la conversione parziale del bosco per andare a creare boschi a ceduo composto, con il 40% gestito a ceduo e il 60% convertito ad alto fusto. Nelle aree di difficile accesso è consigliata una conversione all'alto fusto per i) massimizzare la biodiversità e conservare gli stock di carbonio e ii) diminuire la frequenza degli interventi.

Strategie e Azioni

A seguito del rapporto AForClimate sull'adattamento delle faggete al cambio climatico (Garfi & Torreggiani, 2023) si consiglia di adottare alcune buone pratiche indipendentemente dalla tipologia di gestione, per favorire il rinnovo del bosco e l'adattamento al cambio climatico:

- Creare alcune aperture per consentire una migliore penetrazione della luce (tagli di luce), favorendo un equilibrio nel popolamento. Queste aperture incoraggiano i) la crescita di alberi con diverse altezze (aumentando il sink di carbonio), ii) facilitano la rinnovazione della foresta e iii) semplificano le operazioni di raccolta del legname
- Ripetere i trattamenti in diverse zone a distanza di qualche anno per favorire l'aumento della diversità a livello paesaggistico
- aumentare il legno morto e mantenere gli alberi vecchi e senescenti (aumento di biodiversità e trasferimento di carbonio nel pool stabile del suolo)
- Promuovere l'impiego di legno e biomasse come alternativa a materiali ad elevato impatto ambientale, anche per il riscaldamento e la produzione di energia ma solo a filiera corta (strategia di sostituzione).

Per ogni gestione, si suggeriscono poi interventi specifici:

- **Ceduo in turno:** Taglio a ceduo con turno di 45 anni. Prelievo del 90% dei fusti di classe diametrica piccola e media (diametro 0-15cm) e 80% degli alberi di classe diametrica grande (>15cm di diametro). E' possibile prevedere una riduzione del prelievo e una matricinatura più intensa (vedere gestione di intensità 'media') per aumentare la protezione degli stock di carbonio e la protezione idrogeologica. Favorire l'utilizzo in loco per bioenergia. Nel caso di

parti del bosco non raggiungibili o a macchiatico negativo, si consiglia di lasciare a evoluzione naturale il ceduo, per favorire la biodiversità e il mosaico delle gestioni.

- **Ceduo invecchiato:** Taglio a ceduo a sterzo con periodo di curazione di 15 anni. Prelievo del 30% dei polloni scegliendo quelli di classe dimetrica superiore. Nel caso di difficoltà nella gestione a sterzo, prediligere il ceduo composto, con turni pari al 'ceduo in turno' per la percentuale di piante gestite a ceduo e tagli di conversione per le piante gestite ad alto fusto.
- **Ceduo convertito ad alto fusto:** Taglio a scelta colturale, prelievo dell'8% della biomassa con turno di 15/20 anni. Il taglio deve essere fatto per favorire lo sviluppo degli esemplari migliori e garantire legname di alta qualità per produzione di prodotti con lungo ciclo di vita, atti a massimizzare l'effetto di sostituzione e il relativo stock di carbonio. Seguendo le linee guida AForClimate per il trattamento irregolare, la gestione inizia con l'identificazione delle aree più fertili e degli alberi con elevate potenzialità future. Successivamente, si procede con il taglio e la raccolta nelle zone meno fertili e con l'eliminazione delle piante concorrenti rispetto agli individui selezionati. In altre parole, l'applicazione di questo tipo di trattamento inizia con il riconoscimento delle caratteristiche e delle funzioni specifiche di ciascuna pianta o gruppo di piante, per poi passare a forme di raccolta che possono includere tagli selettivi, tagli a gruppi successivi, e forme intermedie come il taglio saltuario a gruppi o combinazioni diverse di tali tecniche di raccolta.
- **Ceduo in mix con abete:** nei boschi facilmente raggiungibili si suggerisce una gestione a tagli successivi per l'abete e una ripresa del ceduo nel faggio. Abete: taglio di sementazione a 70 anni con prelievo del 30% della biomassa forestale, taglio di sgombero a 100 anni con prelievo del 100% della biomassa forestale rimanente. Faggio: taglio a ceduo del faggio con turno 30 anni e prelievo del 90% della biomassa forestale. Nel caso di parti del bosco non raggiungibili o a macchiatico negativo, si consiglia di lasciare a evoluzione naturale il ceduo, per favorire la biodiversità e il mosaico delle gestioni. Favorire comunque la mescolanza di specie.
- **Ceduo in mix con le latifoglie:** Taglio a ceduo a sterzo con periodo di curazione di 15 anni. Prelievo del 30% dei polloni scegliendo quelli di classe dimetrica superiore. Nel caso di difficoltà nella gestione a sterzo, prediligere il ceduo composto, con turni pari al 'ceduo in turno' per la percentuale di piante gestite a ceduo e tagli di conversione per le piante gestite ad alto fusto. Seguire le linee guida dei 'trattamenti irregolari' per la scelta delle piante.

L'eterogeneità del paesaggio è essenziale per potenziare i servizi ecosistemici (Catullo et al., 2017), con aree di differenti mix di specie e foreste di diverse età. Con questo lavoro, aggiungiamo che anche differenti tipologie di gestione possono fornire un importante beneficio per la fornitura di servizi ecosistemici. Conservare differenti tipologie di gestione può aumentare l'uso sostenibile delle risorse forestali e, in ultima analisi, la resilienza ai cambiamenti climatici. La mitigazione ai cambiamenti climatici deve andare di pari passo con l'adattamento, e poter contare su diversi servizi ecosistemici forniti dalla componente forestale di un'area è un elemento fondamentale per riuscire ad avere un impatto positivo sulla gestione di un territorio. In questo lavoro, quindi, ispirandoci al concetto di 'mosaico di ecosistemi', centrale per la biodiversità, vogliamo introdurre il concetto di 'mosaico di gestione forestale', atto alla massimizzazione dei servizi ecosistemici in maniera olistica e armonizzata. La convivenza di particelle a diversa gestione contribuisce a favorire anche la biodiversità, secondo le linee guida del progetto AForClimate (Garfi & Torreggiani, 2023).

Conclusioni

I nostri risultati sottolineano il ruolo delle faggete come pozzi di carbonio in un clima che cambia ed evidenziano come diverse strategie di gestione, tra cui la mescolanza con altre specie o diversi approcci selvicolturali, influenzino la loro capacità di rispondere al clima.

L'analisi degli stock e dei pozzi di carbonio evidenzia come la mescolanza del faggio con altre specie possa aumentare significativamente gli stock e i pozzi di carbonio negli Appennini. Ciò sottolinea l'importanza di promuovere un certo grado di diversità nelle pratiche di gestione forestale locale, non solo per la resilienza ecologica ma anche per aumentare la fornitura di un ampio spettro di servizi ecosistemici. Le simulazioni di crescita futura sottolineano ancora una volta questo risultato, evidenziando come la mescolanza con abeti o altre latifoglie mostri differenze significative nelle capacità di stoccaggio e sequestro del carbonio rispetto alle foreste di faggio puro.

L'approccio dei gestori deve favorire un 'mosaico gestionale' atto a aumentare i possibili servizi ecosistemici forniti dalla foresta, con particolare attenzione a mitigazione del cambio climatico, biodiversità, e produttività. Le linee guida generali per la gestione sono:

- Aumentare la mescolanza di faggete con latifoglie alle quote più basse e con abete bianco ai limiti superiori per aumentare il potenziale di mitigazione del clima e lo stock di carbonio.
- I cedui attivi possono essere conservati in quanto è la gestione che mostra la minore variabilità dovuta ai cambiamenti climatici in termini di assorbimento medio di carbonio e di stock di carbonio delta. Inoltre, fornisce importanti servizi di approvvigionamento e culturali.
- Le foreste ad alto fusto dovrebbero essere protette e la gestione dovrebbe essere ridotta al minimo, per fornire servizi alla biodiversità e proteggere gli stock di carbonio.
- Per i boschi cedui abbandonati, si suggerisce una conversione a alto fusto o una gestione a media intensità (per esempio, ceduo a sterzo), che può essere adattata alle esigenze locali. Favorire la gestione a 'trattamenti irregolari'.

Bibliografia

- Ameray, A., Bergeron, Y., Cavard, X., 2023. Modelling the potential of forest management to mitigate climate change in Eastern Canadian forests. *Sci Rep* 13. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-41790-2>
- Ameray, A., Bergeron, Y., Valeria, O., Montoro Girona, M., Cavard, X., 2021. Forest Carbon Management: a Review of Silvicultural Practices and Management Strategies Across Boreal, Temperate and Tropical Forests. *Current Forestry Reports*. <https://doi.org/10.1007/s40725-021-00151-w>
- Bayat, A. T., van Gils, H., & Weir, M. (2012). Carbon Stock of European Beech Forest; A Case at M. Pizzalto, Italy. *APCBEE Procedia*, 1(January), 159–168. <https://doi.org/10.1016/j.apcbee.2012.03.026>
- Castagneri, D., Vacchiano, G., Hacket-Pain, A., DeRose, R.J., Klein, T., Bottero, A., 2022. Meta-analysis Reveals Different Competition Effects on Tree Growth Resistance and Resilience to Drought. *Ecosystems* 25. <https://doi.org/10.1007/s10021-021-00638-4>
- Castillo, E., Zang, C.S., Buras, A., Hacket-Pain, A., Esper, J., Serrano-Notivol, R., Hartl, C., Weigel, R., Klesse, S., Resco de Dios, V., Scharnweber, T., Dorado-Liñán, I., van der Maaten-Theunissen, M., van der Maaten, E., Jump, A., Mikac, S., Banzragch, B.E., Beck, W., Cavin, L., Claessens, H., Čada, V., Čufar, K., Dulamsuren, C., Gričar, J., Gil-Pelegrín, E., Janda, P., Kazimirovic, M., Kreyling, J., Latte, N., Leuschner, C., Longares, L.A., Menzel, A., Merela, M., Motta, R., Muffler, L., Nola, P., Petritan, A.M., Petritan, I.C., Prislan, P., Rubio-Cuadrado, Á., Rydval, M., Stajić, B., Svoboda, M., Toromani, E., Trotsiuk, V., Wilmking, M., Zlatanov, T., de Luis, M., 2022. Climate-change-driven growth decline of European beech forests. *Commun Biol* 5. <https://doi.org/10.1038/s42003-022-03107-3>
- Chen, X., Chen, H.Y.H., Chen, C., Ma, Z., Searle, E.B., Yu, Z., Huang, Z., (2020). Effects of plant diversity on soil carbon in diverse ecosystems: a global meta-analysis. *Biological reviews*, 95, 167–183, doi: 10.1111/brev.12554
- Chianucci, F., Salvati, L., Giannini, T., Chiavetta, U., & Cutini, A. (2016). Long-term response to thinning in a beech forest. *Forest Ecology and Management*, 380, 1–9.
- Couture, S., Reynaud, A., 2011. Forest management under fire risk when forest carbon sequestration has value. *Ecological Economics* 70. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2011.05.016>
- Cullotta, S., La Placa, G., Maetzke, F.G., 2016. Effects of traditional coppice practices and microsite conditions on tree health in a European beech forest at its southernmost range. *IForest* 9, 673–681. <https://doi.org/10.3832/for1603-008>
- Curtis, P. S., & Gough, C. M. (2018). Forest aging, disturbance and the carbon cycle. *New Phytologist*, 219(4). Retrieved from <https://doi.org/10.1111/nph.15227>
- Dawud, S.M., Raulund-Rasmussen, K., Domisch, T., Fine, L., Jaroszewicz, B., Vesterdal, L. (2016). Is tree species diversity or species identity the more important driver of soil carbon stocks, C/N ratio, and pH? *Ecosystems*, 19, 645–660. <https://doi.org/10.1007/s10021-016-9958-1>
- Dormann, C.F., Elith, J., Bacher, S., Buchmann, C., Carl, G., Carré, G., Marquéz, J.R.G., Gruber, B., Lafourcade, B., Leitão, P.J., Münkemüller, T., McClean, C., Osborne, P.E., Reineking, B., Schröder, B., Skidmore, A.K., Zurell, D. and Lautenbach, S. (2013), Collinearity: a review of methods to deal with it and a simulation study evaluating their performance. *Ecography*, 36: 27–46. <https://doi.org/10.1111/j.1600-0587.2012.07348.x>
- Easdale, T. A., Richardson, S. J., Marden, M., England, J. R., Gayoso-Aguilar, J., Guerra-Cárcamo, J. E.,

- ... & Brandon, A. M. (2019). Root biomass allocation in southern temperate forests. *Forest Ecology and Management*, 453, 117542.
- ESGF, 2023. ESGF Node at DKRZ - CoG version v4.0.1 [WWW Document]. ESGF P2P Version v2.8.1-master-release. URL <https://esgf-data.dkrz.de>
- Ferré, C., Mascetti, G., Gentili, R. et al. Soil climate regulation services: high SOC stock in Podzols and Umbrisols in an alpine grassland (Valle Adamé, Italy). *Environ Earth Sci* 82, 534 (2023). <https://doi.org/10.1007/s12665-023-11228-z>
- Forrester, D.I., Hobi, M.L., Mathys, A.S., Stadelmann, G., Trotsiuk, V., 2021. Calibration of the process-based model 3-PG for major central European tree species. *Eur J For Res* 140. <https://doi.org/10.1007/s10342-021-01370-3>
- Fox, J., Weisberg, S., Price, B., Adler, D., Bates, D., Baud-Bovy, G., Bolker, B., Ellison, S., Firth, D., Friendly, M., Gorjanc, G., Graves, S., Heiberger, R., Krivitsky, P., Laboissiere, R., Maechler, M., Monette, G., Murdoch, D., Nilsson, H., Ogle, D., Ripley, B., Short, T., Venables, W., Walker, S., Winsemius, D., Zeileis, A., R-Core, 2023. Package “car”. Companion to Applied Regression. CRAN. URL <https://cran.r-project.org/web/packages/car/index.html>
- Garfi V., Torreggiani L., 2023 (a cura di) - Linee Guida per l’adattamento delle faggete all’emergenza climatica. Compagnia delle Foreste (AR), 132 pp. ISBN: 978-88-98850-48-8
- Gusti, M., Di Fulvio, F., Biber, P., Korosuo, A., Forsell, N., 2020. The Effect of alternative forest management models on the forest harvest and emissions as compared to the forest reference level. *Forests* 11. <https://doi.org/10.3390/F11080794>
- Hackett Pain, A., & Friend, A. (2017). Increased growth and reduced summer drought limitation at the southern limit of *Fagus sylvatica* L., despite regionally warmer and drier conditions. <https://doi.org/10.17863/CAM.8017>
- Hilmers, T., Avdagi, A., Bartkowicz, L., Bielak, K., Binder, F., Bonina, A., Dobor, L., Forrester, D. I., Hobi, M. L., Ibrahimspahi, A., Jaworski, A., Kłopi, M., Matovi, B., Nagel, T. A., Petr, R., Del Rio, M., Staji, B., Uhl, E., Zlatanov, T., ... Pretzsch, H. (2020). The productivity of mixed mountain forests comprised of *Fagus sylvatica*, *Picea abies*, and *Abies alba* across Europe. *Forestry*, June, 512–522. <https://doi.org/10.1093/forestry/cpz035>
- Hulvey, K. B., Hobbs, R. J., Standish, R. J., Lindenmayer, D. B., Lach, L., & Perring, M. P. (2013). Benefits of tree mixes in carbon plantings. *Nature Climate Change*, 3(10), 869–874. <https://doi.org/10.1038/nclimate1862>
- INFC2015 – Inventario Nazionale delle Foreste e dei Serbatoi Forestali di Carbonio. Arma dei Carabinieri – Comando Unità Forestali Ambientali e Agroalimentari & CREA – Centro di ricerca Foreste e Legno. https://www.inventarioforestale.org/statistiche_INFC
- Jordan, C.M., Hu, X., Arvesen, A., Kauppi, P., Cherubini, F., 2018. Contribution of forest wood products to negative emissions: Historical comparative analysis from 1960 to 2015 in Norway, Sweden and Finland. *Carbon Balance Manag* 13. <https://doi.org/10.1186/s13021-018-0101-9>
- IPCC, 2006. Guidelines for national greenhouse gas inventories. Vol. 4, Agriculture, forestry and other land use (AFOLU). Institute for Global Environmental Strategies, Hayama, Japan.
- Jonsson, M., Bengtsson, J., Gamfeldt, L., Moen, J., & Snäll, T. (2019). Levels of forest ecosystem services depend on specific mixtures of commercial tree species. *Nature Plants*, 5(2), 141–147. <https://doi.org/10.1038/s41477-018-0346-z>
- Kaipainen, T., Liski, J., Pussinen, A., Karjalainen, T., 2004. Managing carbon sinks by changing rotation length in European forests. *Environ Sci Policy* 7, 205–219. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2004.03.001>

- Kramer, K., Degen, B., Buschbom, J., Hickler, T., Thuiller, W., Sykes, M. T., & de Winter, W. (2010). Modelling exploration of the future of European beech (*Fagus sylvatica* L.) under climate change-Range, abundance, genetic diversity and adaptive response. *Forest Ecology and Management*, 259(11), 2213–2222. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.12.023>
- Krug, J.H.A., 2019. How can forest management increase biomass accumulation and CO2 sequestration? A case study on beech forests in Hesse, Germany. *Carbon Balance Manag* 14. <https://doi.org/10.1186/s13021-019-0132-x>
- LANDSBERG, J.J., AND R.H. WARING. 1997. A generalised model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. *For. Ecol. Manage.* 95:209-228.
- Latte, N., Lebourgeois, F., & Claessens, H. (2015). Increased tree-growth synchronization of beech (*Fagus sylvatica* L.) in response to climate change in northwestern Europe. *Dendrochronologia*, 33, 69-77. <https://doi.org/10.1016/j.dendro.2015.01.002>.
- López-Tirado, J., Moreno-García, M., Romera-Romera, D. et al. Forecasting the circum-Mediterranean firs (*Abies* spp., Pinaceae) distribution: an assessment of a threatened conifers' group facing climate change in the twenty-first century. *New Forests* 55, 143–156 (2024). <https://doi.org/10.1007/s11056-023-09972-y>
- Maxwell, R.S., Larsson, L.-A., 2021. Measuring tree-ring widths using the CooRecorder software application. *Dendrochronologia* (Verona) 67, 1125–7865. <https://doi.org/10.17632/r3v7236kkz.1>
- Mazzoni, E. (2022). Effetto del taglio ceduo di faggeta sul suolo: approccio multicriterio in una cronosequenza (Tesi di laurea magistrale, Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agro-Alimentari, Campus di Bologna, Corso di Laurea Magistrale in Progettazione e gestione degli ecosistemi agro-territoriali, forestali e del paesaggio). Relatrice: Prof.ssa Falsone, G.; Correlatore: Prof. Di Bonito, M. Bologna, Italia.
- Meinshausen, M., Nicholls, Z. R. J., Lewis, J., Gidden, M. J., Vogel, E., Freund, M., Beyerle, U., Gessner, C., Nauels, A., Bauer, N., Canadell, J. G., Daniel, J. S., John, A., Krummel, P. B., Luderer, G., Meinshausen, N., Montzka, S. A., Rayner, P. J., Reimann, S., Smith, S. J., van den Berg, M., Velders, G. J. M., Vollmer, M. K., and Wang, R. H. J.: The shared socio-economic pathway (SSP) greenhouse gas concentrations and their extensions to 2500, *Geosci. Model Dev.*, 13, 3571–3605, <https://doi.org/10.5194/gmd-13-3571-2020>, 2020.
- Mokany, K., Raison, R. J., & Prokushkin, A. S. (2006). Critical analysis of root: shoot ratios in terrestrial biomes. *Global change biology*, 12(1), 84-96.
- Müller, F., Augustynczik, A.L.D., Hanewinkel, M., 2019. Quantifying the risk mitigation efficiency of changing silvicultural systems under storm risk throughout history. *Ann For Sci* 76. <https://doi.org/10.1007/s13595-019-0884-1>
- Nocentini, S. (2009). Structure and management of beech (*Fagus sylvatica* L.) forests in Italy. *IForest*, 2(JUNE), 105–113. <https://doi.org/10.3832/ifor0499-002>
- Odum, Eugene P. "The Strategy of Ecosystem Development." *Science*, vol. 164, no. 3877, 1969, pp. 262–70. JSTOR, <http://www.jstor.org/stable/1726720>. Accessed 28 Feb. 2024.
- Paul, C., Brandl, S., Friedrich, S., Falk, W., Härtl, F., Knoke, T., 2019a. Climate change and mixed forests: how do altered survival probabilities impact economically desirable species proportions of Norway spruce and European beech? *Ann For Sci* 76. <https://doi.org/10.1007/s13595-018-0793-8>
- Paul, C., Reith, E., Salecker, J., Knoke, T., 2019b. How Integrated Ecological-Economic Modelling Can Inform Landscape Pattern in Forest Agroecosystems. *Current Landscape Ecology Reports* 4.

<https://doi.org/10.1007/s40823-019-00046-4>

- Pretzsch, H., Hilmers, T., Biber, P., Avdagić, A., Binder, F., Bončina, A., Bosela, M., Dobor, L., Forrester, D.I., Lévesque, M., Ibrahimspahić, A., Nagel, T.A., Río, M. Del, Sitkova, Z., Schütze, G., Stajić, B., Stojanović, D., Uhl, E., Zlatanov, T., Tognetti, R., 2020. Evidence of elevation-specific growth changes of spruce, fir, and beech in European mixed mountain forests during the last three centuries. *Canadian Journal of Forest Research* 50. <https://doi.org/10.1139/cjfr-2019-0368>
- Profft, I., Mund, M., Weber, G.E., Weller, E., Schulze, E.D., 2009. Forest management and carbon sequestration in wood products. *Eur J For Res* 128, 399–413. <https://doi.org/10.1007/s10342-009-0283-5>
- R Core Team, 2022. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Reyer, C., Lasch-Born, P., Suckow, F., Gutsch, M., Murawski, A., Pilz, T., 2014. Projections of regional changes in forest net primary productivity for different tree species in Europe driven by climate change and carbon dioxide. *Ann For Sci* 71. <https://doi.org/10.1007/s13595-013-0306-8>
- Rockel, B., & Geyer, B. (2008). The performance of the regional climate model CLM in different climate regions, based on the example of precipitation. *Meteorologische Zeitschrift*, 17(4), 487–498. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2008/0297>
- Schelhaas, M.J., Nabuurs, G.J., Hengeveld, G., Reyer, C., Hanewinkel, M., Zimmermann, N.E., Cullmann, D., 2015. Alternative forest management strategies to account for climate change-induced productivity and species suitability changes in Europe. *Reg Environ Change* 15. <https://doi.org/10.1007/s10113-015-0788-z>
- Seidl, R., Schelhaas, M.J., Rammer, W., Verkerk, P.J., 2014. Increasing forest disturbances in Europe and their impact on carbon storage. *Nat Clim Chang* 4. <https://doi.org/10.1038/nclimate2318>
- Tabacchi G., Di Cosmo L., Gasparini P., Morelli S. (2011) Stima del volume e della fitomassa delle principali specie forestali italiane. Equazioni di previsione, tavole del volume e tavole della fitomassa arborea epigea. Consiglio per la Ricerca e la sperimentazione in Agricoltura, Unità di Ricerca per il Monitoraggio e la Pianificazione Forestale. Trento. 412 pp.
- Tegel W., Seim A., Hakelberg D., Hoffmann S., Panev M., Westphal T., Büntgen U., 2013 - A recent growth increase of European beech (*Fagus sylvatica* L.) at its Mediterranean distribution limit contradicts drought stress. *European Journal of Forest Research*, 133: 61-71. <http://dx.doi.org/10.1007/s10342-013-0737-7>
- Thurm, E.A., Pretzsch, H., 2016. Improved productivity and modified tree morphology of mixed versus pure stands of European beech (*Fagus sylvatica*) and Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) with increasing precipitation and age. *Ann For Sci* 73, 1047–1061. <https://doi.org/10.1007/s13595-016-0588-8>
- van Oijen, M., 2017. Bayesian Methods for Quantifying and Reducing Uncertainty and Error in Forest Models. *Current Forestry Reports*. <https://doi.org/10.1007/s40725-017-0069-9>
- Wolynski A., 2002a - Sul trattamento irregolare delle fustaie di faggio (1). *Sherwood - Foreste ed Alberi Oggi* 74: 9-14.
- Wolynski A., 2002b - Sul trattamento irregolare delle fustaie di faggio (2). *Sherwood - Foreste ed Alberi Oggi* 75: 5-13.
- Yan, Y., 2018. Integrate carbon dynamic models in analyzing carbon sequestration impact of forest biomass harvest. *Science of the Total Environment* 615. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.09.326>

Zimmermann, J., Hauck, M., Dulamsuren, C., Leuschner, C., 2015. Climate Warming-Related Growth Decline Affects *Fagus sylvatica*, But Not Other Broad-Leaved Tree Species in Central European Mixed Forests. *Ecosystems* 18. <https://doi.org/10.1007/s10021-015-9849-x>

Zimmermann, J., The impact of drought and climate warming on Central European broad-leaved mixed forests, 2016. Doctoral dissertation, Niedersächsische Staats-und Universitätsbibliothek Göttingen.

Appendici

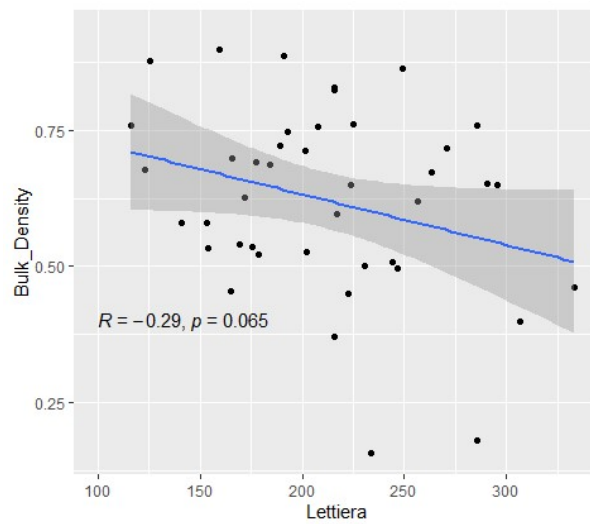


Figura A1: Correlazione tra quantità di lettiera al suolo e soil bulk density

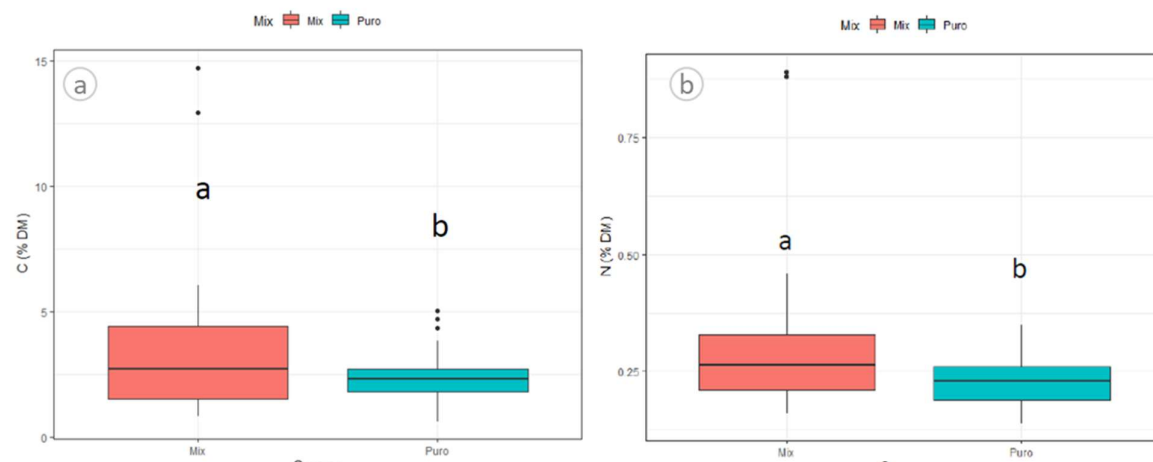
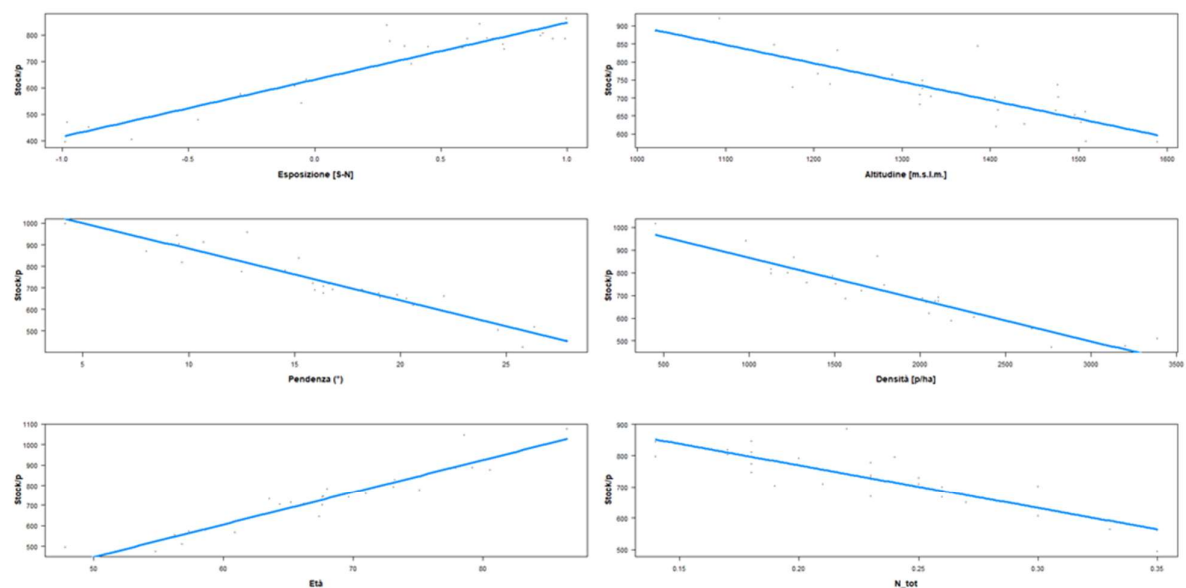


Figura A2: Effetto del mix su a) concentrazione di carbonio nel suolo e b) concentrazione di azoto nel suolo

A - Gestione



B - Mix

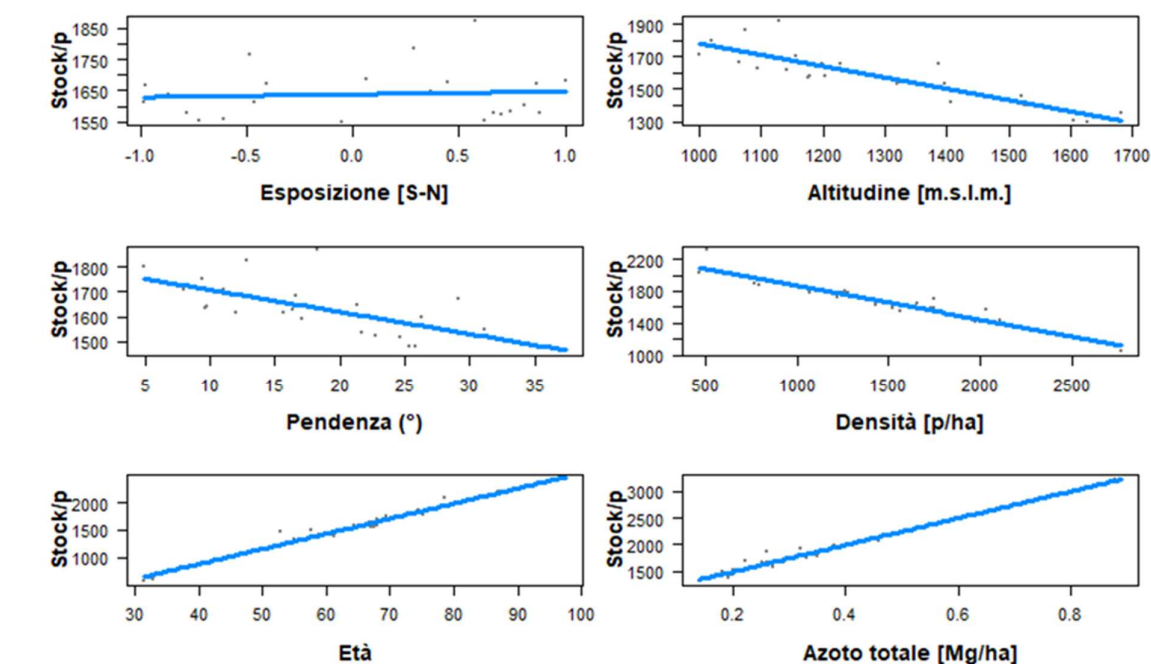
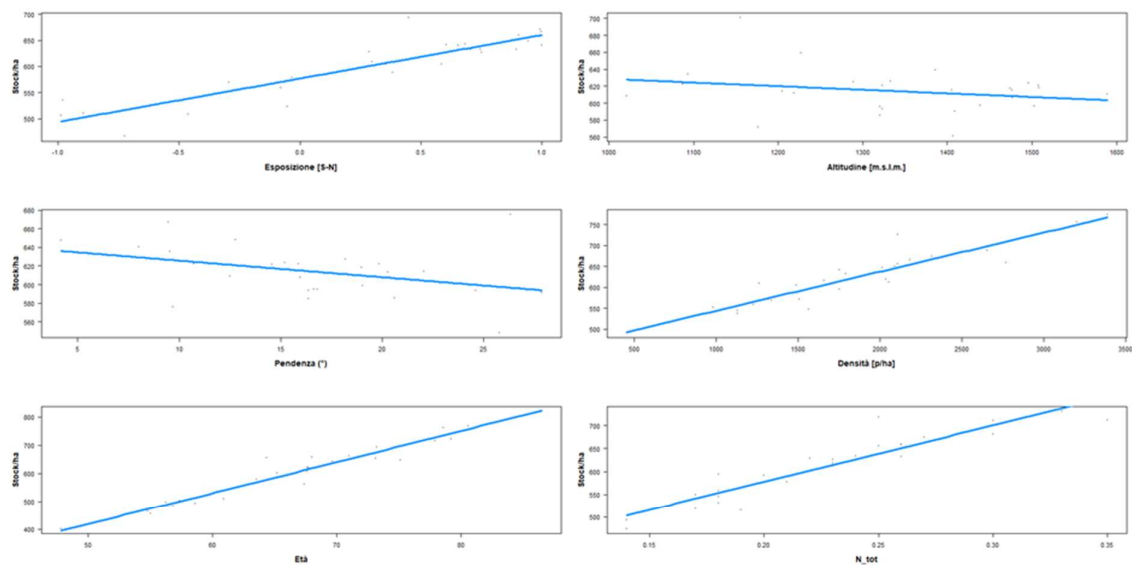


Figura A3: correlazione tra stock a pianta e driver ambientali per A - plot con diverse gestioni e B - plot con diversi mix

A - Gestione



B - Mix

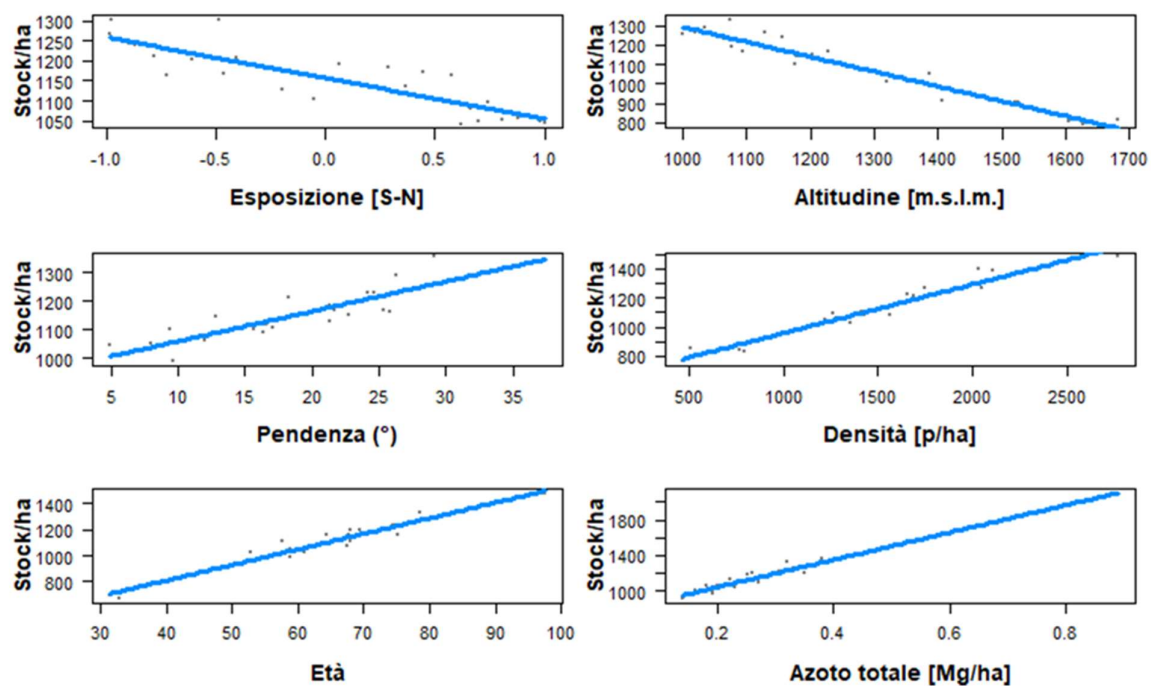
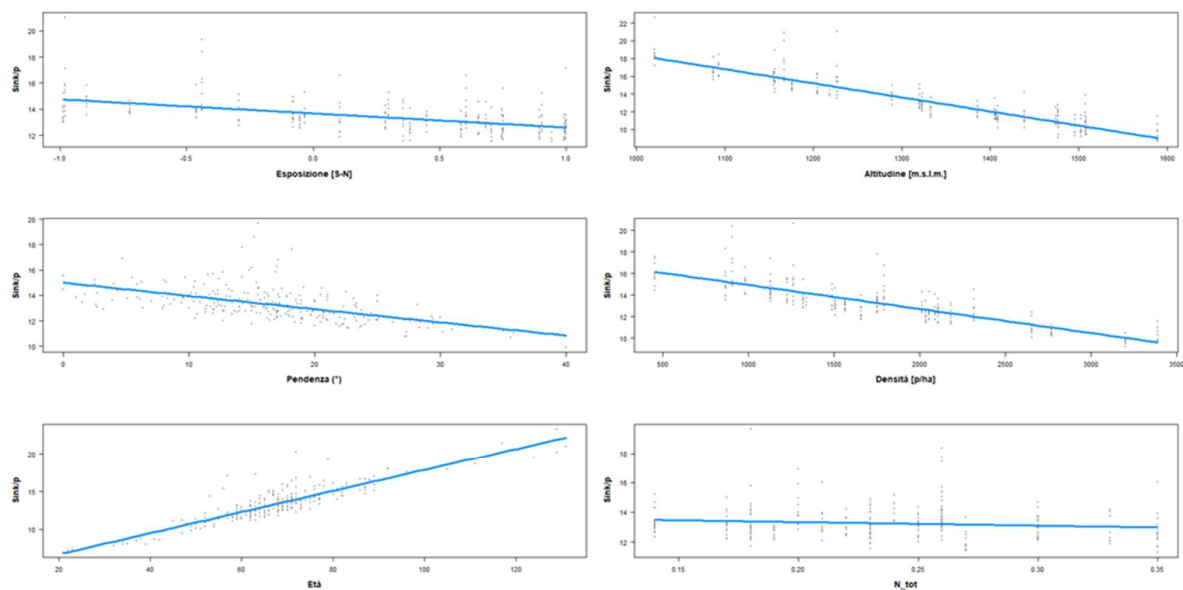


Figura A4: correlazione tra stock per ettaro e driver ambientali per A - plot con diverse gestioni e B - plot con diversi mix

A - Gestione



B - Mix

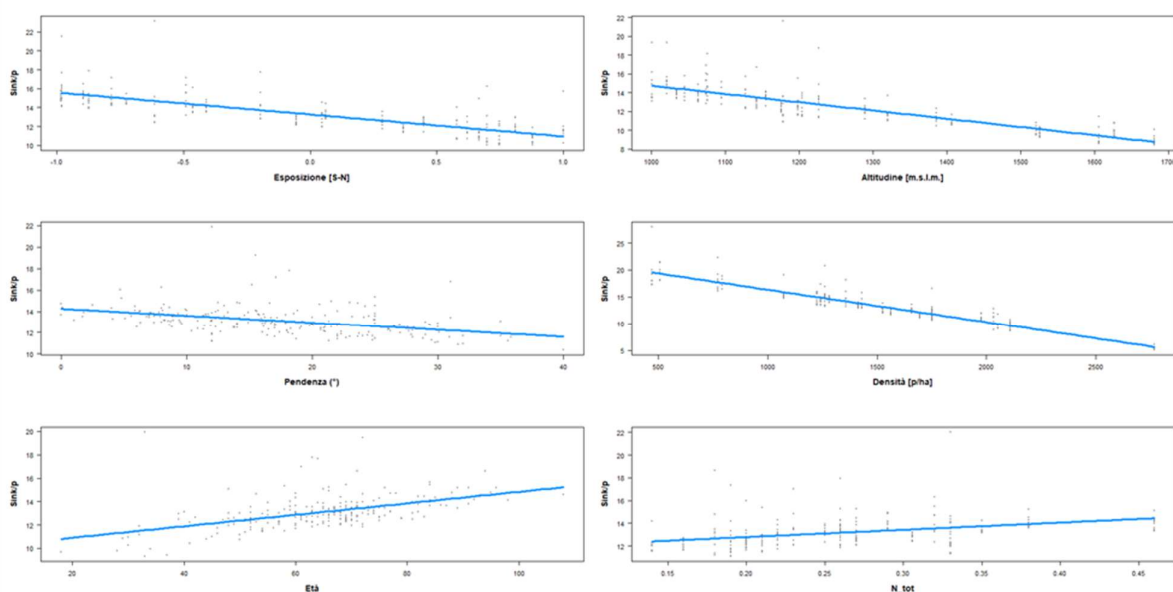


Figura A5: correlazione tra sink a pianta e driver ambientali per A - plot con diverse gestioni e B - plot con diversi mix

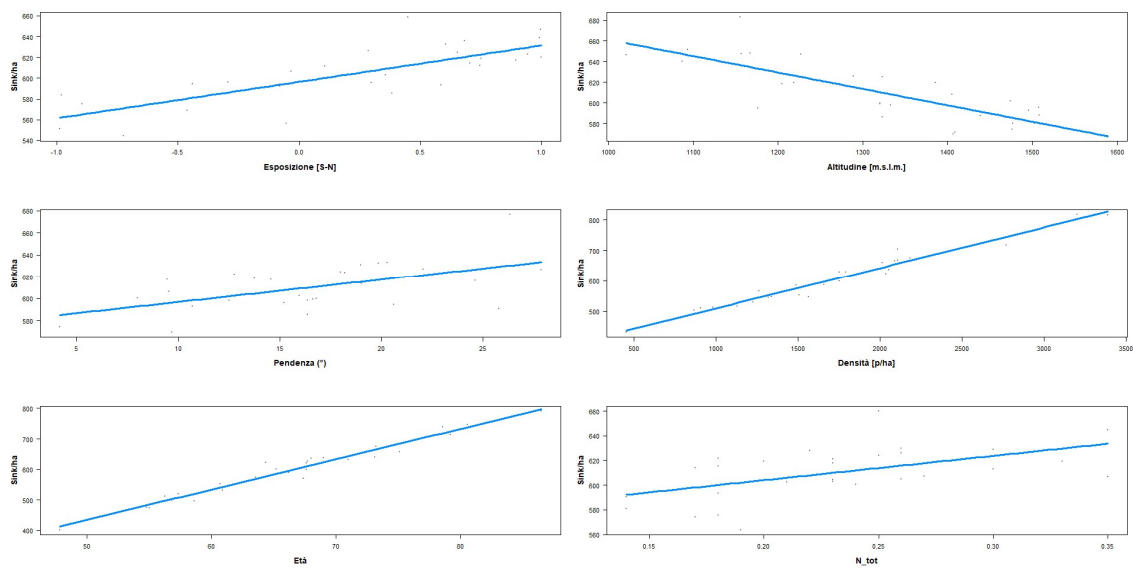


Figura A6: correlazione tra sink a ettaro e driver ambientali per plot con diverse gestioni