



RECUPERO DI PINETE DEGRADATE PER IL RIPRISTINO
DELLA SOSTENIBILITÀ AMBIENTALE E LA
MITIGAZIONE DEI CAMBIAMENTI CLIMATICI

Manuale LIFE FoResMit



LIFE14 CCM/IT/905

01/09/2015-31/08/2019



HELLENIC REPUBLIC
DECENTRALIZED ADMINISTRATION of
MACEDONIA & THRACE
GENERAL DIRECTORATE of FOREST &



Questo progetto è co-finanziato dall'Unione Europea all'interno del programma LIFE

A cura di Alessandra Lagomarsino (CREA-AA)
con il contributo di:

Paolo Cantiani (CREA-FL)
Ugo Chiavetta (CREA-FL)
Gianluigi Mazza (CREA-FL)
Isabella De Meo (CREA-AA)
Alessandro Paletto (CREA-FL)

CREA-AA: Consiglio per la Ricerca in Agricoltura e l'analisi
dell'economia agraria - Centro di ricerca Agricoltura e Ambiente

CREA-FL: Consiglio per la Ricerca in Agricoltura e l'analisi
dell'economia agraria - Centro di ricerca Foreste e Legno

INDICE

1. Le pinete mediterranee peri-urbane	4
2. Il progetto FoResMit	7
3. Protocolli di monitoraggio	13
4. I Tagli Di Diradamento	23
5. Effetti dei diradamenti	25
6. Produzione di bioenergia	34
7. Il sequestro e i crediti di carbonio	36
8. Indirizzi di gestione forestale partecipati	38
9. Conclusioni e prospettive gestionali	43

1. LE PINETE MEDITERRANEE PERI-URBANE

Obiettivo dei rimboschimenti, al momento della loro realizzazione, era ricostituire la copertura boschiva laddove la scarsa fertilità stagionale associata alla gestione troppo intensa dei soprassuoli forestali, agricoli e pascolivi montani aveva portato alla sterilità del suolo. Il pino nero (pianta frugale, particolarmente adatta alla funzione di specie pioniera delle stazioni montane appenniniche) ha perfettamente assolto a questa finalità.



Figura 1. Monte Morello negli anni '30 prima del rimboschimento e oggi

La valenza economica diretta delle pinete è scarsa per il valore limitato delle produzioni possibili, tanto che la gestione attiva di queste formazioni è generalmente episodica e limitata soprattutto alle stazioni con maggior accessibilità, dove i costi per la selvicoltura si contengono. D'altro canto, le pinete assolvono ancora in modo ottimale la funzione protettiva per la quale erano state concepite. Le pinete localmente assolvono anche ad ulteriori funzioni non meno importanti, quali la valenza di testimonianza storica della selvicoltura appenninica (veri e propri paesaggi culturali) e la funzione "turistico-ricreativa" soprattutto nelle realtà peri-urbane e laddove l'esclusiva presenza del ceduo rende monotono il paesaggio montano. Il forte impegno di investimento pubblico che ha portato alla loro realizzazione può però essere vanificato dall'assenza o dalla non corretta esecuzione degli interventi colturali necessari: le pinete in mancanza di gestione attiva possono presentare forme di degrado.



Figura 2. Esempi di bosco degradato a Monte Morello

Per boschi degradati si intendono popolamenti forestali che hanno perso la capacità di resilienza, ovvero la capacità di recupero delle proprie capacità strutturali e funzionali in seguito a un disturbo o per assenza di cure colturali. Un bosco degradato dimostra perdita di produttività e di densità, riduzione di biomassa in piedi e aumento di alberi morti in piedi e di necromassa al suolo. La degradazione nelle pinete artificiali può essere irreversibile quando in fase molto avanzata, ad esempio in conseguenza di fenomeni scatenanti ripetuti, quali passaggi di incendi ripetuti nel tempo, o reversibile, quando derivante da assenza di cure colturali in popolamenti ancora in fase relativamente giovanile. Il pino nero si è dimostrato infatti una specie molto plastica e capace di reagire a interventi anche quando questi non sono stati tempestivamente effettuati.

Organizzazione	Definizione di degradazione
FAO/FRA (Forest Resources Assessments)	Cambiamenti nella foresta che influiscono negativamente sulla struttura o le funzioni del bosco o del sito, e quindi ne diminuiscono la capacità di fornire prodotti e/o servizi.
ITTO (International Tropical Timber Organization)	Riduzione della capacità di una foresta di produrre beni e servizi, compreso il mantenimento dei servizi ecosistemici. Una foresta degradata fornisce un ridotto quantitativo di beni e servizi da un determinato sito e mantiene una limitata diversità biologica. Ha perso la struttura, le funzioni, la composizione specifica e/o la normale produttività associata alla tipologia forestale attesa in un determinato sito.
IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change)	Una perdita di lungo termine dello stock di carbonio e dei servizi forestali causata dalle attività antropiche e non qualificabile come deforestazione.
IUFRO (International Union of Forest Research Organizations)	Danneggiamento delle proprietà chimiche, biologiche e fisiche di un suolo (degradazione del suolo) e della foresta (degradazione forestale) in conseguenza di una gestione non corretta e che, se non migliorata, porterebbe alla riduzione o alla distruzione del potenziale produttivo di un ecosistema forestale.

Tabella 1. Principali definizioni di foresta degradata

La scelta gestionale prioritaria per le pinete di pino nero, laddove è ammissibile, è quella di tendere ad una progressiva “rinaturalizzazione” dei soprassuoli artificiali tramite trattamenti selvicolturali appropriati. Le pinete possono avvantaggiarsi da diradamenti mirati espressamente al miglioramento del loro grado di stabilità. I diradamenti, se di tipo selettivo e di intensità adeguata, inducono, infatti, ad un aumento della stabilità meccanica, favoriscono la diversità strutturale e concorrono a creare condizioni ecologiche idonee all’insediamento della rinnovazione di specie più esigenti.

I primi diradamenti nei rimboschimenti protettivi hanno la finalità di “allevare” il soprassuolo, con l’obiettivo prioritario di migliorare la stabilità strutturale; nel processo di “rinaturalizzazione” rappresentano quindi una fase iniziale. Con i primi tagli intercalari non si deve ipotizzare un ingresso spontaneo massiccio di semenzali di specie autoctone, perché la struttura del soprassuolo e del suolo non è ancora pronta al fenomeno della rinnovazione. È essenziale valutare anche la qualità delle specie di ingresso, che potrebbero essere rappresentate in una fase “immatura” della pineta da “latifoglie minori” di scarsa importanza ecologica ed economica. Il senso dei primi tagli intercalari è quello di “ricaduta in termini di efficienza funzionale del bosco predisponendo il popolamento alla futura rinnovazione naturale”.

2. IL PROGETTO FORESMIT

2.a Obiettivi del progetto

Il progetto LIFE FoResMit nasce dalla necessità di individuare opzioni gestionali adatte al recupero di pinete degradate in ambiente mediterraneo. L’obiettivo generale del progetto è il miglioramento della produttività, della stabilità, del potenziale ecologico e delle potenzialità di mitigazione dei cambiamenti climatici di questi ecosistemi. Il progetto ha testato e verificato l’efficacia di due diversi tipi di diradamento nel ripristino delle funzioni ecosistemiche di foreste di conifere degradate in Italia e Grecia. L’approccio multidisciplinare del progetto ha fornito dati sulla struttura della vegetazione, l’incremento della biomassa, l’accumulo di carbonio in tutte le componenti rilevanti della vegetazione e del suolo, le emissioni di anidride carbonica (CO₂) e di altri gas ad effetto serra, dando così un quadro completo del potenziale di mitigazione delle diverse pratiche di gestione. Al tempo stesso, il progetto ha contribuito a mantenere e migliorare i servizi ecosistemici offerti dal bosco. contribuito a mantenere e migliorare i servizi ecosistemici offerti dal bosco.

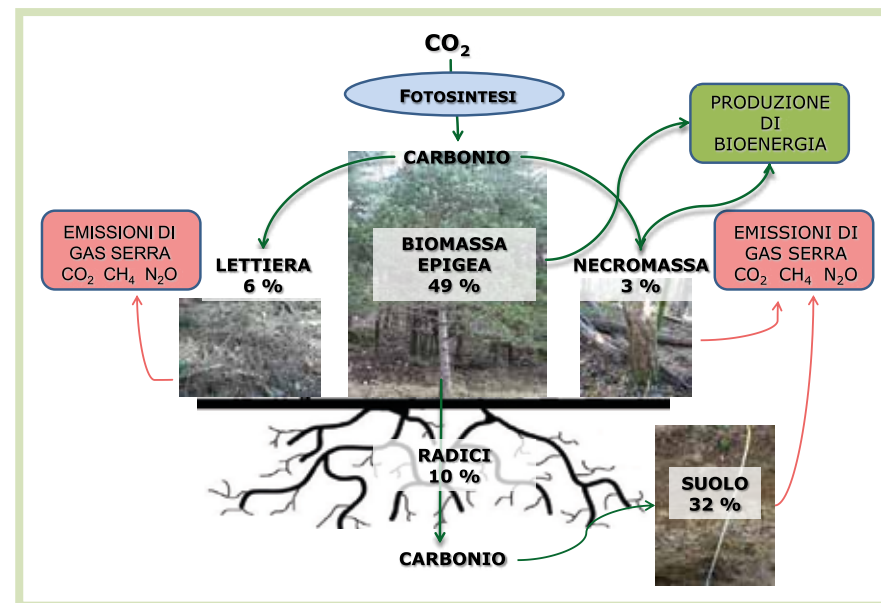


Figura 3. Schema concettuale

Il ruolo delle foreste nella mitigazione dei cambiamenti climatici

A partire dalla rivoluzione industriale l'uomo ha modificato il clima attivamente, mediante l'immissione in atmosfera di miliardi di tonnellate di gas ad effetto serra. Questo sta determinando oggi l'aumento delle temperature, del livello dei mari e una maggiore frequenza di fenomeni estremi (siccità, alluvioni, ondate di caldo o freddo).

I gas ad effetto serra emessi sia dalle attività antropiche sia dai processi naturali che avvengono nel suolo sono l'anidride carbonica (CO₂), il metano (CH₄) e il protossido di azoto (N₂O).

Le foreste ogni anno assorbono il 30% della CO₂ emessa dai combustibili fossili a livello globale e sono enormi serbatoi di carbonio. Infatti, le piante mediante la fotosintesi fissano il carbonio della CO₂ e rilasciano ossigeno. Il carbonio viene poi trasferito al suolo attraverso le radici e i residui vegetali, come la lettiera (piccoli rami, foglie e frutti caduti a terra) e la necromassa (alberi morti in piedi o a terra). Nel suolo una parte del carbonio rimane immagazzinato per centinaia o migliaia di anni ed una parte torna in atmosfera come CO₂ a causa

della decomposizione della sostanza organica. Questo è un processo naturale che è essenziale per fornire alle piante gli elementi nutritivi (azoto ed altri minerali) di cui hanno bisogno.

C'è un continuo scambio (in entrata e in uscita) di questi gas tra suolo, pianta ed atmosfera, in tutti i sistemi naturali. Quando una foresta è sana, il bilancio è positivo, perché la CO₂ sottratta all'atmosfera mediante la fotosintesi e accumulata negli alberi e nel suolo è maggiore di quella emessa dalla decomposizione. Quando una foresta è degradata non cresce e quindi non sottrae una quantità di CO₂ dall'atmosfera sufficiente a compensare le emissioni di gas serra dovute alla decomposizione degli alberi morti e della sostanza organica del suolo. I diradamenti rappresentano una corretta gestione per avere un bosco più sano e stabile, con lo scopo di mitigare il clima sottraendo CO₂ dall'atmosfera e accumulandola nelle piante e nel suolo.

Inoltre, le piante che tagliamo con i diradamenti sono una fonte di energia rinnovabile e possono essere utilizzate per produrre energia "pulita" e sostituire i combustibili fossili (petrolio). Quando l'equilibrio viene disturbato da eventi esterni (ad esempio incendi, cattiva gestione, siccità etc.).

2.b Le aree dimostrative

Il progetto si sviluppa in due foreste periurbane coetanee di circa 50 anni, una in Italia (Monte Morello in Toscana) e l'altra in Grecia (Xanthi in Tracia). In entrambi i siti sono state localizzate casualmente nove aree dimostrative: tre delle quali sottoposte a diradamento tradizionale, tre a diradamento selettivo e tre al non intervento. All'interno di ciascuna replica dimostrativa sono state individuate due sub-aree di monitoraggio circolari di 13 m di raggio, dove sono stati raccolti tutti i dati relativi a suolo e vegetazione.

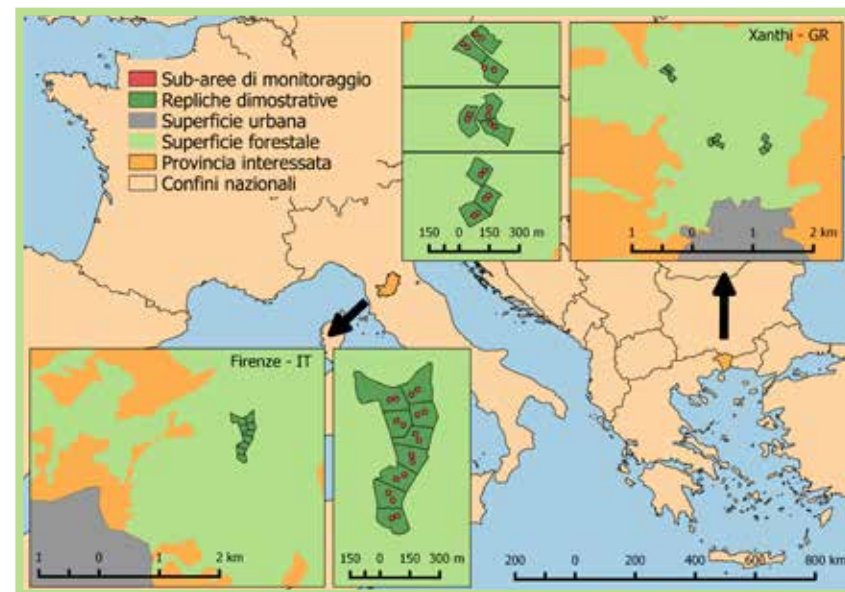


Figura 4. Le aree dimostrative in Italia e Grecia

Monte Morello

La foresta di Monte Morello è stata piantata durante gli anni 1910-1980 su suoli degradati a causa di pascolo e sfruttamento eccessivo con lo scopo di ristabilire la copertura forestale. La vegetazione forestale nelle aree dimostrative è tipica di una piantagione artificiale di conifere, più dell'80% della biomassa è caratterizzata da pini (*Pinus nigra* e *Pinus brutia*) e cipressi (*Cupressus sempervirens* e *Cupressus arizonica*). Inoltre, è presente un ulteriore 10% di cerro (*Quercus cerris*). In termini di frequenza, la composizione complessiva ha prodotto una predominanza dell'orniello (*Fraxinus ornus*) nello strato sottoposto.

Il clima è tipicamente mediterraneo, con precipitazioni concentrate nel periodo che va dall'autunno all'inizio della primavera e un'estate secca. Luglio è il mese

più secco, mentre ottobre e, soprattutto, novembre sono i mesi più piovosi. Dai primi anni '80 le precipitazioni annuali totali sono di circa 1000 mm mentre la temperatura media annuale è di 13,9 °C. Negli ultimi trenta anni si è verificata una significativa riduzione delle precipitazioni invernali- primaverili del 20% circa rispetto a quella del periodo precedente. Inoltre, confrontando questi due periodi di tempo, durante la stagione estiva si è verificato un periodo di siccità significativo caratterizzato da un deficit idrico che nei precedenti trent'anni era trascurabile.

Da un punto di vista geomorfologico, il substrato è costituito da flysch calcarei (turbiditi), formati da un'alternanza di calcari, calcari marnosi, marne e argilliti (Alberese) e subordinatamente arenarie. La tipologia di suolo è di tipo Calcaric Cambisols e Cambic Calcisols, con regime termico mesico e regime di umidità udico. I suoli presentano tessitura limoso-argillosa, una reazione moderatamente alcalina e concentrazioni alte o molto alte di carbonati. La profondità è variabile da meno di 50 a più di 100 cm. Il contenuto di sostanza organica del sito è tipico di un ambiente Mediterraneo, con una marcata distribuzione verticale di azoto e carbonio organico.



Figura 5. Profili di suolo per la caratterizzazione pedologica

Xanthi

La foresta di Xanthi fa parte del territorio pubblico che comprende i distretti forestali di Xanthi–Gerakas – Kimerion, nella regione della Tracia. L'attività di rimboschimento della zona ha avuto inizio nel 1936 ed è continuata periodicamente fino al 2007, anche se per la maggior parte fino al 1973. Il P. brutia è stata la specie maggiormente utilizzata, oltre a P. maritima, P. pinea, Cupressus spp. e P. nigra, come conifere e Robinia pseudoacacia come latifolia. In molte aree si ritrova un piano dominato costituito da altre latifoglie quali in particolare Quercus spp. e Carpinus orientalis.

Il clima è tipicamente mediterraneo, caratterizzato da inverni miti e piovosi ed estati calde e secche. Dalle serie meteorologiche del periodo 1960-2002 appare un periodo xertermico che va dalla metà di giugno alla fine di settembre. Durante il periodo di monitoraggio le temperature sono state in media con il periodo di riferimento, mentre le precipitazioni sono diminuite, fino al 50 %.

La formazione geologica della foresta peri-urbana di Xanthi fa parte della formazione delle montagne di Rodopi, che consistono prevalentemente di rocce metamorfiche, Gneiss e para-Gneiss. I suoli sono profondi circa 60 cm e ben drenati ad una profondità di 10 cm. La tipologia pedologica è di tipo Campisols con un pH moderatamente acido (5.6) e un basso contenuto di carbonati (6,3 %). La tessitura varia da sabbiosa-argillosa a franco-sabbiosa-argillosa, con contenuti medi di sabbia e argilla rispettivamente del 60 e 18 %. La sostanza organica del suolo ha mostrato una chiara distribuzione verticale, con la diminuzione dei contenuti di carbonio e azoto lungo il profilo.

	Monte Morello (IT)	Xanthi (GR)
Clima (1980-2014)		
Min – Media – Max T (°C)	9,3 – 13,3 – 17,9	8,5 – 13,3 – 18,0
Precipitazioni (mm)	876	526
PDSI ; SPEI	-0,53 ; -0,04	-0,73 ; -0,12
Caratteristiche del popolamento (pre-diradamento)		
Tipo di vegetazione	Piantagioni di specie native (codici EEA-EFTS: 6.14.1)	
Età (anni)	55-65	50-60
Densità media (alberi ha ⁻¹)	980	2626
Area basimetrica (m ² ha ⁻¹)	62,9	38,8
Altezza media (m)	17,1	10,7
Caratteristiche del suolo (pre-diradamento)		
Tipologia di suolo	Calcaric Cambisols and Cambic Calcisols	Cambisols
pH – Carbonati (%)	8,1 – 8,2	5,6 – 6,2
Sabbia (%) – Argilla (%)	38,4 – 27,1	60,0 – 17,5

Tabella 2. Caratteristiche dei due siti. Clima: precipitazioni medie annue e temperature per il periodo considerate, l'indice PDSI (Palmer drought severity index) e l'indice SPEI (Standardised Precipitation–Evapotranspiration Index).

2.c Partners del progetto

In ciascuno dei due siti sono previsti un ente gestore, responsabile dell'implementazione dei tagli, e un ente scientifico responsabile dell'attività di monitoraggio.

Il coordinatore del progetto è il CREA (Consiglio per la Ricerca in Agricoltura e l'analisi dell'economia agraria), il principale Ente di ricerca italiano con competenze scientifiche nei settori agricolo, zootecnico, ittico, forestale, agroindustriale, nutrizionale, fino all'ambito socioeconomico, vigilato dal Ministero delle politiche agricole, alimentari, forestali e del turismo (Mipaaf). Il CREA partecipa con due Centri di ricerca: Agricoltura e Ambiente (Firenze) e Foreste e Legno (Arezzo e Trento). I due Centri hanno competenze sulle funzioni del suolo e sulla loro conservazione, sulla gestione sostenibile delle foreste e sui loro servizi ecosistemici.

Gli altri partner del progetto sono:

la Città Metropolitana di Firenze è l'ente territoriale che agisce in quei settori che influiscono direttamente sullo sviluppo (pianificazione, infrastrutture per la mobilità, politiche ambientali) e le risorse provinciali, con l'obiettivo di creare sviluppo per l'occupazione e una migliore qualità della vita delle persone.

La Democritus University of Thrace (DUTH) è una grande università della Grecia, composta da oltre 18 dipartimenti, da 9 scuole e da un'amministrazione centrale. Il Dipartimento per le foreste e la gestione dell'ambiente e delle risorse naturali (FMENR) svolge attività di ricerca sullo sviluppo, il miglioramento, la protezione e la gestione delle foreste e dei terreni forestali e dell'ambiente naturale. La Decentralized Administration of Thrace (DAMT) è responsabile della protezione, dello sfruttamento e della crescita delle risorse forestali (foreste, ambienti forestali, pascoli, caccia ecc.), mirando alla copertura dei bisogni del paese nel legname e altri prodotti e servizi delle foreste. Il Directorate per la foresta di Xanthi è l'autorità superiore responsabile del controllo e del corretto funzionamento dei servizi forestali e del rispetto della politica forestale nella regione.

3. PROTOCOLLI DI MONITORAGGIO

3.a Vegetazione

La vegetazione è stata monitorata prima (2015) e due anni dopo l'intervento (2018) attraverso la misurazione di alcuni parametri fondamentali in 36 aree di monitoraggio (2 sub-aree di monitoraggio per ognuna delle 3 repliche di trattamento). I parametri principali raccolti nelle aree di saggio circolari di 13m di raggio sono stati: diametro a petto d'uomo (DBH), altezza totale (H), specie e posizione di tutte le piante con DBH > 3cm.



Figura 6.
Picchetto che identifica il centro di ciascuna area di monitoraggio.

Il volume legnoso totale del fusto e dei rami più grossi è stato stimato attraverso le tavole di cubatura dell'Inventario Nazionale delle Foreste e dei serbatoi di Carbonio (INFC) del 2005.

La biomassa epigea della vegetazione è stata stimata attraverso specifici che convertono il volume legnoso in peso secco, secondo la formula:

$$AB = GS \times BEF \times WBD$$

dove AB è la biomassa epigea, GS è il volume legnoso (m^3), BEF è il fattore di espansione di biomassa e WBD è la densità basale del legno ($t m^{-3}$).

La biomassa ipogea è stata invece derivata da quella epigea attraverso l'uso di fattori di conversione testati sperimentalmente da diversi autori per le diverse specie:

$$RB = R \times AB$$

Dove RB è la biomassa ipogea ($Mg ha^{-1}$), R è la proporzione della biomassa ipogea rispetto a quella epigea e AB è la biomassa epigea ($Mg ha^{-1}$).

Specie	WBD	BEF	R
<i>Acer campestre</i>	0,53	1,47	0,24
<i>Cedrus atlantica</i>	0,43	1,41	0,29
<i>Cornus mas</i>	0,53	1,47	0,24
<i>Crataegus spp</i>	0,53	1,47	0,24
<i>Cupressus arizonica</i>	0,43	1,41	0,29
<i>Cupressus sempervirens</i>	0,43	1,41	0,29
<i>Fraxinus ornus</i>	0,53	1,47	0,24
<i>Ostrya carpinifolia</i>	0,53	1,47	0,24
<i>Pinus brutia</i>	0,43	1,41	0,29
<i>Pinus nigra</i>	0,43	1,41	0,29
<i>Prunus spinosa</i>	0,53	1,47	0,24
<i>Quercus cerris</i>	0,69	1,45	0,24
<i>Quercus pubescens</i>	0,67	1,42	0,2
<i>Sambucus nigra</i>	0,53	1,47	0,24

Tabella 3. Valori specifici dei parametri WBD, BEF e R per le specie monitorate nel sito di Monte Morello.

3.6 Legno morto

Il rilievo del legno morto è stato condotto, prima (2015) e due anni dopo l'intervento (2018), all'interno di ciascuna sub-area di monitoraggio distinguendo tra tre componenti: legno morto a terra, legno morto in piedi e ceppaie.

Gli alberi morti in piedi comprendono anche quelli schiantati o sradicati che non abbiano ancora completamente toccato terra. Per convenzione, nel momento in cui questi ultimi passano da una posizione verticale o parzialmente inclinata (angolo di inclinazione con la verticale inferiore a 45°) ad una totalmente orizzontale rientrano nella componente legno morto a terra. Gli alberi in piedi stroncati ad un'altezza inferiore a 1.3 m vengono classificati come ceppaie.

Sono rilevati unicamente i soggetti con un diametro a petto d'uomo o con diametro, nel punto di intersezione del transect o nella sezione mediana, uguale o superiore alla soglia diametrica di 4.5 cm, considerando il restante materiale legnoso come parte integrante della lettiera.

Legno morto a terra

I rilievi concernenti il legno morto a terra sono condotti impiegando due metodi: il FAS (Fixed Area Sampling) ed il LIS (Line Intersect Sampling). Il primo prevede il campionamento totale del legno morto a terra presente nell'area di monitoraggio, mentre il secondo prevede la misura unicamente dei frammenti di legno morto intercettati da due transect disposti internamente all'area di monitoraggio.

Metodo FAS

Rilievo dimensionale di tutti i frammenti di legno morto giacenti al suolo purché aventi diametro alla sezione inferiore uguale o maggiore di 4.5cm. Per ciascun frammento si procede, in riferimento alla sola parte ricadente all'interno dell'area di saggio, con la misura del diametro della sezione minima e massima e della distanza tra le due sezioni. In corrispondenza di ciascuna sezione vanno rilevati due diametri ortogonali tra loro. Congiuntamente alle misure dimensionali dei frammenti di legno morto a terra si procede con la registrazione della specie di appartenenza e della classe di decomposizione del legno facendo sempre riferimento al sistema internazionale a 5 classi (Tabella 4 e Figura 7). La valutazione è eseguita visivamente tenendo in considerazione le seguenti caratteristiche: (1) presenza o meno di corteccia attaccata al legno; (2) presenza o meno di rami di piccole dimensioni (inferiori a 3cm); (3) tessitura del legno; (4) presenza di micelio fungino, muschio e aree necrotiche. Nel caso di frammenti fortemente decomposti e/o inglobati nel terreno (classe di decomposizione 4 o 5 della Tabella 4), dove è impossibile misurare il diametro della sezione minima e massima verticale al terreno, si procede attraverso stima a vista.

Metodo LIS

All'interno dell'area di monitoraggio

sono posizionati due transect della lunghezza di 26m ciascuno, il primo transect in direzione Nord-Sud (N-S) passante per il centro di AdS13 e il secondo in direzione Est-Ovest (E-O) perpendicolare al primo. Percorrendo entrambi i transect si procede con il rilievo dei seguenti attributi per i soli frammenti di legno morto intercettati: (a) due diametri tra loro ortogonali nell'esatto punto di contatto con il transect (cm); (b) specie di appartenenza; (c) classe di decomposizione del legno facendo sempre riferimento al sistema internazionale a 5 classi. A partire dalle misurazioni in campo il volume di legno morto presente ad ettaro è calcolato attraverso l'impiego della seguente equazione:

$$D = \sum \left(\frac{d_i^2}{8L} \right)$$

Dove:

D = volume del legno morto (m³ ha⁻¹);
L = lunghezza complessiva dei due transect in m (52m);

d_i = diametro (media delle due misure) nell'*i*-esima intersezione (cm).

A livello metodologico i risultati del presente progetto mostrano come l'impiego del metodo FAS o del metodo LIS per la stima dei volumi di legno morto a terra arrivino ad analoghi risultati. In particolare, tramite il metodo FAS sono stati stimati dei volumi medi di legno morto a terra pari a 60

m³ all'ettaro, mentre tramite il metodo LIS sono stati quantificati, nelle stesse parcelle, volumi medi pari a 65 m³ all'ettaro. Il test non-parametrico per ranghi di Wilcoxon ha evidenziato delle differenze statisticamente non significative tra i due metodi applicati ($p=0,284$, $\alpha=0,05$). Tali risultati por-

tano ad evidenziare che, lì dove sia necessario procedere con metodi di stima speditivi, nel caso di superfici estese o di quantitativi di necromassa elevati, il metodo LIS può essere utilizzato come alternativa valida al campionamento totale.

Legno morto in piedi e ceppaie

Per tutte le piante morte in piedi si procede con il rilievo dei seguenti attributi: (a) due diametri tra loro ortogonali misurati all'altezza di petto d'uomo (cm); (b) altezza dendrometrica o all'altezza di troncutura (m); (c) specie di appartenenza; (d) classe di decomposizione del legno facendo riferimento al sistema internazionale a 5 classi.

Per quanto riguarda le ceppaie, in analogia con quanto fatto per gli alberi morti in piedi, si procede con il rilievo dei seguenti attributi: (a) due diametri tra loro ortogonali misurati all'altezza di troncutura o del piano di taglio (cm); (b) altezza ceppaia o altezza di troncutura (m), nel caso di troncuture o tagli irregolari si rilevano l'altezza massima e la minima; (c) specie di appartenenza; (d) classe di decomposizione del legno facendo riferimento al sistema internazionale a 5 classi.

Stato di decadimento	Descrizione
Frammento recente (intatto)	frammento con corteccia intatta e attaccata al legno, rametti con diametro inferiore ai 3 cm presenti, tessitura del legno intatta, possibile micelio fungino sviluppato in piccole aree sotto-corteccia
Frammento parzialmente decomposto	frammento con corteccia intatta ma allentata (non ancora distaccata), rametti assenti, tessitura del legno intatta, micelio fungino presente tra la corteccia e il legno ben sviluppato, presenza di zone marcescenti che si estendono per meno di 3 cm
Frammento mediamente decomposto	frammento con tracce di corteccia, rametti assenti, tessitura del legno in larghi pezzi (piccoli blocchi), zone marcescenti estese per più di 3 cm, concomitante presenza di un nucleo consistente
Frammento fortemente decomposto	frammento con corteccia assente, rametti assenti, tessitura del legno in blocchi, zone marcescenti estese su tutto il frammento che a sua volta si presenta di consistenza molliccia e spesso di forma irregolare
Frammento totalmente decomposto	frammento con corteccia assente, rametti assenti, tessitura polverosa, legno decomposto in scaglie e molle, singole scaglie spesso coperte dal terreno, da muschio o da licheni

Tabella 4. Descrizione delle 5 classi di decomposizione del legno morto

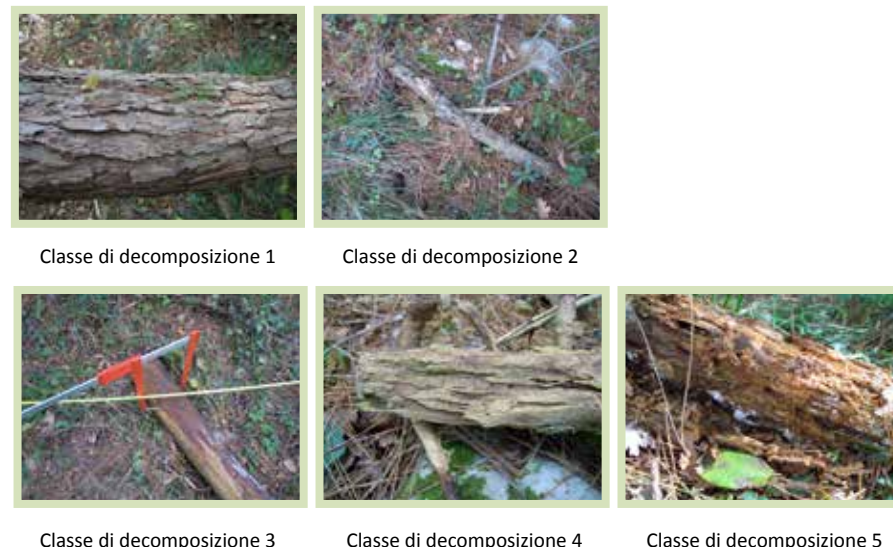


Figura 7. Le 5 classi di decomposizione della necromassa

3.c Lettieria

La formazione di nuova lettiera è stata misurata attraverso due trappole (50x50x30cm, 1m di altezza dal suolo) per ciascuna sub-area di monitoraggio posizionate vicino ai collari per la misurazione dei gas ad effetto serra (36 trappole per sito in totale). Le componenti principali della lettiera (aghi, foglie, rametti e rami con diametro < 4.5cm di diametro, strutture riproduttive e corteccia) sono state raccolte stagionalmente svuotando le trappole. Il materiale è stato separato, seccato e pesato fornendo il peso secco per unità di superficie ($g\ m^{-2}$).



Figura 8. Trappole per la raccolta di lettiera vicino ai collari per la misura delle emissioni di gas ad effetto serra

Lo strato organico di suolo “forest floor” è stato campionato annualmente utilizzando un collare di circa 700 cm² e raccogliendo tutto il materiale vegetale sopra il suolo minerale. Il materiale vegetale è stato separato manualmente mediante setacciatura nelle tre frazioni rappresentative (figura 9):

L, composta da materiale vegetale fresco e poco decomposto;

F, composta da materiale riconoscibile ma frammentato, con micelio fungino e radici;

H, composta da materiale umificato, non riconoscibile.



Figura 9. Esempio di differenti frazioni di lettiera al suolo

3.d Suolo

Il suolo minerale è stato campionato annualmente in corrispondenza dello strato organico di lettiera alle profondità di 0-10 e 10-30cm. I campioni di suolo sono stati asciugati all'aria e setacciati con vaglio a 2mm. I campioni sono stati poi omogenizzati a 0.5mm per le successive analisi di quantificazione del carbonio organico e dell'azoto.

Per la misura della densità apparente del suolo sono stati ulteriormente prelevati campioni indisturbati mediante cilindri di 100 cm³. I campioni così prelevati sono stati seccati a 105°C e la densità è stata calcolata dal rapporto tra il peso secco e il volume prelevato. Tale misura è necessaria per il calcolo dello stock di carbonio organico del suolo (kg m⁻²).



Figura 10. Campionamento della densità apparente del suolo.

3.e Le emissioni di gas serra

Gli scambi gassosi tra suolo ed atmosfera sono stati misurati mediante il metodo delle camere statiche. Questo metodo è basato sull'accumulo di gas all'interno di uno spazio chiuso installato sulla superficie del suolo. Un collare di 30cm di diametro è stato posizionato in ciascuna sub-area di monitoraggio, inserendolo nel suolo ad una profondità di almeno 5cm e lasciandolo in sede per tutta la durata del monitoraggio.

Il campionamento di gas è stato effettuato una o due volte al mese da febbraio 2016 a dicembre 2018, modificando le date e la frequenza dei campionamenti a seconda delle condizioni climatiche e di eventi specifici, come ad esempio le operazioni selvicolturali. Tutte le misurazioni sono state effettuate tra le 9.30 e le 14.30 per minimizzare i cambiamenti dei flussi e delle temperature dovuti ai cicli giornalieri. Durante ciascun campionamento il collare è stato chiuso con un coperchio per 30 minuti e il gas campionato ad intervalli di 0, 10, 20 e 30 minuti dalla chiusura con una siringa da 30mL. La temperatura dell'aria è stata

misurata ad ogni tempo di prelievo. Le concentrazioni di CO₂, CH₄ e N₂O sono state misurate mediante gas-cromatografia (GC-2014, Shimadzu Inc.) e i flussi sono stati stimati mediante una regressione lineare tra l'aumento delle concentrazioni dei gas e il tempo di chiusura. Per calcolare il flusso cumulato dei flussi di CO₂, CH₄ e N₂O i flussi giornalieri sono stati sommati nel tempo mediante interpolazione lineare. Per la stima del potenziale di riscaldamento globale dei tre gas e la loro trasformazione in CO₂ equivalenti sono stati usati i fattori di conversione di 34 e 298 per CH₄ e N₂O, rispettivamente, utilizzando la formula:

$$\text{GWP (CO}_2 \text{ eq)} = \text{CO}_2 + 34 \text{ CH}_4 + 298 \text{ N}_2\text{O}$$



Figura 11.
Collare per il prelievo di gas.

3.f Calcolo dei crediti di carbonio

Al fine di quantificare il potenziale impatto dei trattamenti selvicolturali nella mitigazione dai cambiamenti climatici e i possibili CC generabili sono stati valutati gli impatti dei due tipi di diradamento sullo stock di carbonio (C-stock) e sui flussi di carbonio (C-sequestration) rispetto allo scenario corrente caratterizzato dall'assenza di cure colturali e interventi selvicolturali (baseline scenario). Le variazioni del C-stock – considerando sia la biomassa epigea e ipogea, sia al legno morto – è stato quantificato l'anno successivo al diradamento, mentre il C-sequestration è stato stimato considerando il biennio successivo al diradamento.

Il C-stock riferito alla biomassa epigea e ipogea è stato stimato applicando la seguente equazione:

$$C_{\text{stock-biomassa}} = k \cdot [(1 - b) \cdot (V_{i,SFM} - V_{i,baseline}) \cdot BEF \cdot WDB (1 + R)]$$

Dove:

$C_{\text{stock-biomassa}}$ = quantitativo di CO₂ perso nella biomassa e convertita in bioenergia a seguito dei diradamenti (tCO₂ ha⁻¹)

k = fattore di conversione da carbonio a CO₂

$V_{i,SFM}$ = volume legnoso post-diradamento (m³ ha⁻¹)

$V_{i,baseline}$ = volume legnoso pre-diradamento (m³ ha⁻¹)

BEF = fattore di espansione della biomassa specifica per i pini (1.33)

WDB = densità basale specifica per i pini (0.47)

R = rapporto tra biomassa ipogea e epigea (0.36)

b = carbonio perso a causa di disturbi naturali non controllabili

i = tipo di diradamento (tradizionale o selettivo)

Il C-stock riferito al legno morto può essere quantificato utilizzando la seguente equazione che tiene in considerazione la distribuzione di volume tra le cinque classi di decadimento:

$$C_{\text{stock-legno morto}} = k \cdot \sum_n [(D_{i,SFM} - D_{i,baseline}) \cdot WBD]$$

Dove:

$C_{\text{stock-legno morto}}$ = quantitativo di CO₂ stoccata nel legno morto convertita in bioenergia a seguito dei diradamenti (tCO₂ ha⁻¹)

k = fattore di conversione da carbonio a CO₂

$D_{i,SFM}$ = volume di legno morto post-diradamento (m³ ha⁻¹)

$D_{i,baseline}$ = volume di legno morto pre-diradamento (m³ ha⁻¹)

WBD = densità basale del legno morto dei pini per singola classe di decadimento (kg m⁻³)

n = classi di decadimento del legno morto (5)

Il C-sequestration riferito al suolo può essere quantificato come differenza tra il quantitativo di carbonio immagazzinato nel suolo a seguito del diradamento e il quantitativo di CO₂ perso dal suolo come emissioni, considerando la somma di CO₂, CH₄ e N₂O.

L'equazione utilizzata è la seguente:

$$C_{\text{sequestration-suolo}} = k \cdot (C_{\text{soil post}} - C_{\text{soil pre}}) - \text{CO}_2 \text{ eq emitted}$$

Dove:

$C_{\text{sequestration-suolo}}$ = quantitativo di CO₂ accumulato nel suolo al netto delle emissioni di gas serra (tCO₂ ha⁻¹ a⁻¹)

k = fattore di conversione da carbonio a CO₂

$C_{\text{soil post}}$ = C stoccato nei primi 30cm di suolo due anni dopo il taglio (t ha⁻¹)

$C_{\text{soil pre}}$ = C stoccato nei primi 30 cm di suolo prima del taglio (t ha⁻¹)

CO₂_{eq} emitted = somma delle emissioni annuali del secondo anno dopo i diradamenti moltiplicate per il GWP specifico: CO₂ + 34*CH₄ + 298*N₂O (tCO₂ ha⁻¹ a⁻¹).

Il C-sequestration nella biomassa è stato stimato per ciascun tipo di diradamento sulla base della differenza nel quantitativo di CO₂ sequestrata annualmente tra lo scenario baseline e gli scenari post-diradamento:

$$\Delta C_t = C_t - C_b$$

$$\Delta C_s = C_s - C_b$$

Dove:

C_b = flusso annuale di CO₂ sequestrata nella biomassa in riferimento allo scenario baseline

C_t = flusso annuale di CO₂ sequestrata nella biomassa a seguito del diradamento tradizionale

C_s = flusso annuale di CO₂ sequestrata nella biomassa a seguito del diradamento selettivo

4. I TAGLI DI DIRADAMENTO

Il diradamento è la cura colturale fondamentale per le pinete di pino nero. Un opportuno regime di diradamenti prevederebbe di effettuare interventi frequenti (ogni 10-15 anni) e il primo intervento ad uno stadio di sviluppo giovanile dei popolamenti. Purtroppo, soprattutto per i costi, i primi interventi (i diradamenti pre-commerciali) non sono stati quasi mai effettuati nei rimboschimenti di pino, soprattutto nelle pinete di proprietà privata.

Negli ultimi decenni prove sperimentali di diradamenti su popolamenti adulti hanno dimostrato che il pino possiede una elevata plasticità e reagisce positivamente anche ad interventi effettuati su popolamenti adulti (allo stadio di giovane fustaia). Le ricerche hanno dimostrato che la frazione della struttura delle pinete sensibile effettivamente al diradamento è quella dominante. Il pino nero è specie particolarmente eliofila e il diradamento sortisce effetti positivi quando incide effettivamente sul piano delle chiome (diradamenti dall'alto). La consuetudine nei diradamenti in pinete è stata tuttavia quella di operare diradamenti dal basso di bassa-moderata intensità. Questo soprattutto per due motivi: i) per contenere i costi dell'intervento (sia di taglio sia di martellata); ii) perché il trattamento classicamente inteso prevedeva diradamenti frequenti nel tempo che avrebbero allevato il popolamento in modo graduale nel ciclo di vita del bosco. Effettuare interventi dal basso una tantum non sortisce però i vantaggi colturali attesi dall'intervento. Con interventi di scarsa intensità a carico delle sole piante dominate non si intacca positivamente la struttura del bosco; in pratica si effettua il prelievo delle sole piante che nel tempo sarebbero scomparse per mortalità naturale (autodiradamento). Interventi di questa natura oltre a non incidere positivamente sulla vigoria del bosco comportano in pratica solo un elemento di disturbo (esbosco, compattazione del suolo) non giustificabile a livello colturale.

Nel tentativo di contemperare i vantaggi del diradamento dall'alto con la semplicità e replicabilità dell'intervento, che contenga il più possibile i costi della martellata, è stato messo a punto un metodo di diradamento dall'alto il più possibile semplice ed efficace: il "diradamento selettivo".

Il metodo prevede due fasi operative:

1) Scelta delle piante candidate

Vengono scelti e marcati circa 100 soggetti per ettaro (le piante "candidate") posti ad una distanza il più possibile regolare nello spazio orizzontale (circa 10 metri di distanza tra candidate). Le piante candidate devono avere innanzitutto caratteristiche di stabilità meccanica elevata (basso valore del rapporto tra l'altezza dell'albero e il diametro del fusto, inserzione della chioma più bassa possibile, chioma regolare e armonica). La scelta della composizione specifica delle candidate dipende dalla struttura del bosco. In caso di pinete con un certo grado di mescolanza specifica nel piano do-

minante, dovranno essere privilegiate come candidate le specie di latifoglie autoctone che dimostrino vigoria e garantiscano stabilità nel tempo. Laddove ci sia un gruppo di piante candidabili contigue è possibile lasciare la coppia di candidate come fosse una singola unità di stabilità. In assenza di specie diverse dal pino, la scelta si effettuerà sui fenotipi di pino a maggior garanzia di stabilità.

2) Martellata a carico delle piante concorrenti delle candidate

Si tratta della martellata vera e propria. Attorno a ciascuna pianta candidata vengono scelte per il taglio tutte le piante concorrenti a livello della chioma. L'obiettivo è che la pianta candidata rimanga dopo il taglio con la sua chioma a contatto diretto con la radiazione solare. Prove sperimentali su giovani fustaie dimostrano che le concorrenti alle piante candidate rappresentano in media circa 3-4 piante per ciascuna candidata. Nonostante che le piante dominate contigue alle candidate non incidano culturalmente sulla candidata stessa, si raccomanda comunque di eliminarle comunque, per creare delle piccole aperture nella copertura delle chiome continue tra piano dominante e suolo, in modo da creare delle discontinuità nella radiazione solare a livello del suolo. Ciò concorre positivamente ad accrescere la biodiversità del piano arbustivo ed erbaceo (vegetazione, componente micologica, micro e meso fauna ecc.).

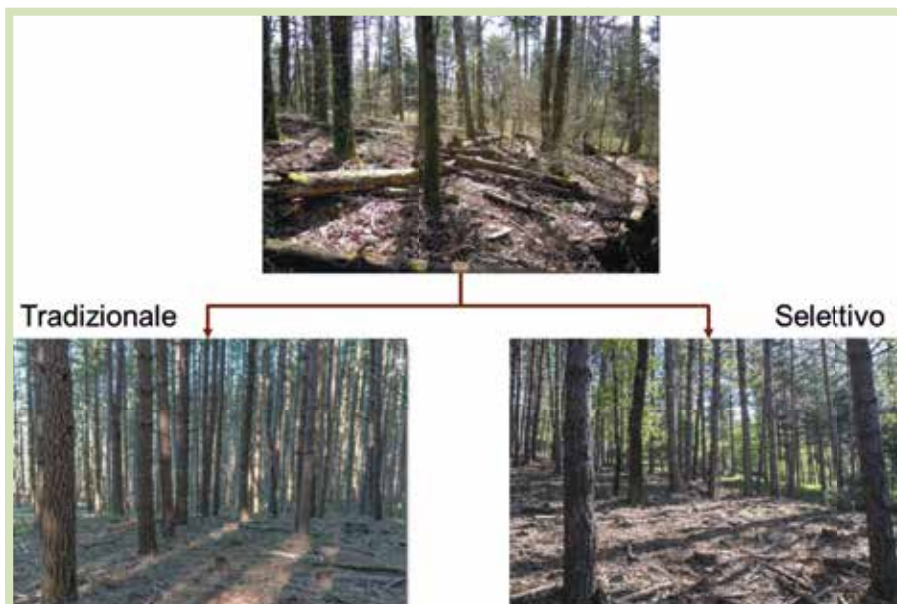


Figura 12. Bosco non diradato, diradamento tradizionale e diradamento selettivo.

5. EFFETTI DEI DIRADAMENTI

5.a Effetti sul popolamento

STRUTTURA

Considerando tutte le piante, il diradamento tradizionale ha prelevato il 35% degli alberi e il 25% dell'area basimetrica. Il diradamento selettivo ha avuto una maggiore intensità, prelevando il 42% del numero delle piante e il 40% dell'area basimetrica. Queste differenze sono sempre significative sia per tutto il popolamento che per il soprassuolo principale. Considerando tutti gli alberi, il diametro medio cambia significativamente solo tra il controllo e il diradamento tradizionale. Questo è dovuto all'asportazione di molti alberi di piccole dimensioni durante il diradamento tradizionale (riduzione del DBH medio dei soli alberi piccoli -25%) che causa un aumento del DBH medio (+ 7.5%) dell'intero popolamento.

Allo stesso tempo, è dimostrato come il diradamento selettivo non causi lo stesso effetto (+1%) a causa del rilascio della maggior parte degli alberi di piccole dimensioni. Questo aspetto ha ripercussioni anche sulla variabilità diametrica, come riportato in seguito.

Riguardo l'altezza media, i risultati sono analoghi a quanto riportato per il diametro medio. In particolare, il diradamento tradizionale riduce significativamente l'altezza media degli alberi di piccole dimensioni (-10%) e incrementa quella del soprassuolo principale (+3%). Ciononostante, questo si traduce in una variazione complessiva dell'altezza media non significativa considerando l'intero popolamento.

Infine, considerando l'eterogeneità strutturale, i risultati mostrano che sia in termini di DBH che di altezza il diradamento selettivo incrementa la variabilità significativamente (circa del 10%), mentre il diradamento tradizionale non determina una variazione significativa.

STABILITÀ

La suscettibilità ai danni da vento e neve dei popolamenti forestali a parità di specie dipende da molti fattori a scala territoriale: orografia, distribuzione spaziale dell'uso del suolo, morfologia del sito, tipo di suolo e caratteristiche climatiche. Di fondamentale importanza sono le caratteristiche strutturali del popolamento forestale (composizione

specifico, densità, distribuzione diametrica, strutturazione verticale delle piante) e le caratteristiche morfologiche e strutturali delle singole piante (sviluppo degli apparati radicali, forme dei fusti, altezze delle piante, dimensione e forme delle chiome).

I più comuni parametri morfometrici della stabilità meccanica di un albero proposti dalla letteratura scientifica

sono: il rapporto ipsodiametrico tra altezza e diametro (H/D), la profondità relativa all'altezza dell'inserzione della chioma rispetto all'altezza totale ($(H_{tot}-H_{ins})/H_{tot}$), la superficie della chioma, il grado di eccentricità della chioma (raggio di chioma maggiore/raggio di chioma minore).

Di questi parametri solo H/D presen-

ta dei valori soglia testati sperimentalmente che discriminano la stabilità e l'instabilità meccanica della singola pianta. Per questo motivo esso rappresenta il parametro di gran lunga più adottato. In letteratura scientifica le piante con rapporto H/D >100 sono considerate instabili.

L'applicazione di diversi tipi di diradamento nelle aree dimostrative del progetto ha mostrato una maggiore efficacia del diradamento selettivo rispetto al diradamento tradizionale e al controllo. Il diradamento selettivo ha mostrato una riduzione del numero di piante instabili del 33%, il diradamento tradizionale dell'11%, il controllo dello 0%.

In generale l'applicazione del diradamento selettivo ha aumentato del 4% la stabilità media delle singole piante dopo due anni dall'intervento mentre il diradamento tradizionale ha mostrato un aumento ben più modesto (0,3%).

	Variazioni percentuali rispetto al controllo	
	Diradamento tradizionale	Diradamento selettivo
Alberi asportati	-35	-42
Area basimetrica asportata	-25	-40
Incremento di biomassa	+6	+6
Incremento radiale	+35	+60
Piante instabili	-11	-33
Stabilità media	+0,3	+4
Eterogeneità strutturale	-	+10

Tabella 5. Riepilogo dei principali effetti dei diradamenti sulle caratteristiche del popolamento

RESILIENZA

La resilienza in ecologia è la capacità di un ecosistema di ritornare al suo stato iniziale dopo essere stato sottoposto ad una perturbazione che l'ha allontanato dallo stato iniziale. La perturbazione può avere origine

antropica (ad es. inquinamento, disboscamento, cambiamento climatico, l'invasione da parte di una o più specie aliene) o naturale (ad es. un evento atmosferico, un incendio, una frana o smottamento).

Attraverso un'analisi dendroecologica è stato valutato l'effetto del diradamento sulla resilienza del soprassuolo al cambiamento climatico (in particolare alla siccità) nel sito oggetto di studio. Dopo avere definito la siccità come evento straordinario (precipitazione annua meno una unità di deviazione standard), gli incrementi correnti di area basimetrica durante gli anni più siccitosi sono stati confrontati con gli anni precedenti e successivi per quantificare la riduzione e/o il recupero dell'accrescimento delle piante.

Il cerro (*Q. cerris*) ha evidenziato delle variazioni di crescita sempre positive ed i valori percentuali più bassi sono stati ottenuti confrontando gli anni siccitosi con 1 e 5 anni precedenti. Inoltre, il cerro è risultato la specie con la maggiore percentuale di piante in grado di recuperare il tasso di crescita dopo l'annata siccitosa (Figura 13a).

In generale, il cerro è risultato meno sofferente rispetto ai pini ed ha evidenziato una maggiore capacità di recupero dopo le annate più siccitose, sia nel breve che nel lungo termine.

Nel sito di Monte Morello il diradamento selettivo, avendo favorito la specie meno sofferente la siccità (*Q. cerris*, Figura 13b), è risultato quello più appropriato per aumentare o migliorare la resilienza del soprassuolo oggetto di studio a periodi di siccità più lunghi e frequenti.

5.b Effetti sul pool di carbonio

VEGETAZIONE

Prima di valutare gli effetti della selvicoltura sul sequestro di carbonio, è necessario analizzare il trend determinato dalle condizioni ambientali negli ultimi anni nel sito italiano. Infatti, tali condizioni hanno determinato, a partire dal 2014, un calo dell'accrescimento medio degli alberi. Tuttavia, dopo due anni dal taglio, è stato osservato un effetto significativo di contenimento del calo della crescita di entrambi i tipi di diradamento rispetto alla non gestione.

Rispetto all'accrescimento a livello di popolamento, cioè considerando tutti gli alberi, in entrambi i diradamenti è stato osservato un incremento relativo annuo del 6% circa, contro un incremento di circa il 2% delle aree non diradate. Questi rapporti rimangono invariati sia considerando la biomassa epigea e ipogea singolarmente sia considerando la biomassa totale. Tuttavia, ci sono delle differenze significative tra i due diradamenti se consideriamo l'accrescimento radiale degli alberi effettivamente (diradamento selettivo) o potenzialmente (diradamento tradizionale) selezionati per essere favoriti. Precisamente, attraverso il confronto degli accrescimenti radiali medi di questi alberi è stato osservato un effetto positivo sull'incremento radiale quasi doppio con il diradamento selettivo (60% più alto del controllo) rispetto al diradamento tradizionale (35% più alto del controllo).

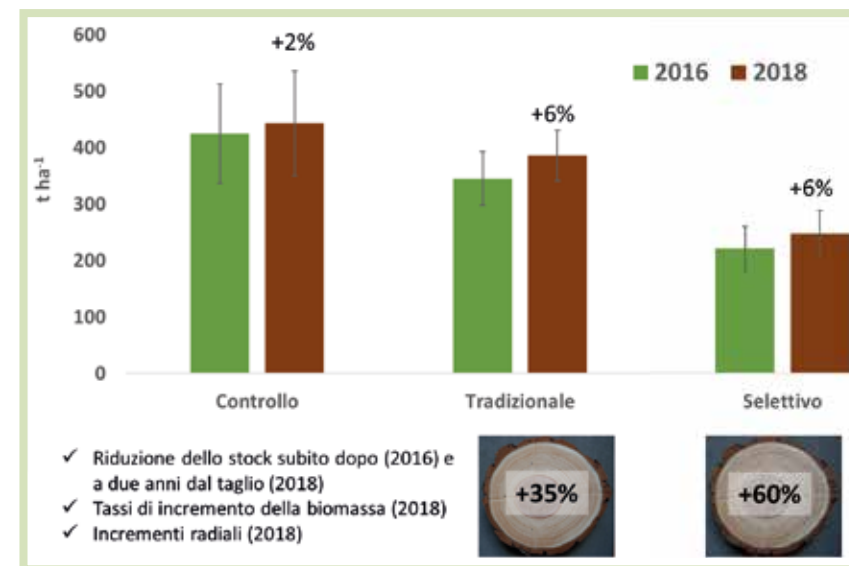


Figura 14. Variazioni dello stock e degli incrementi relativi subito dopo e a due anni dai tagli di diradamento

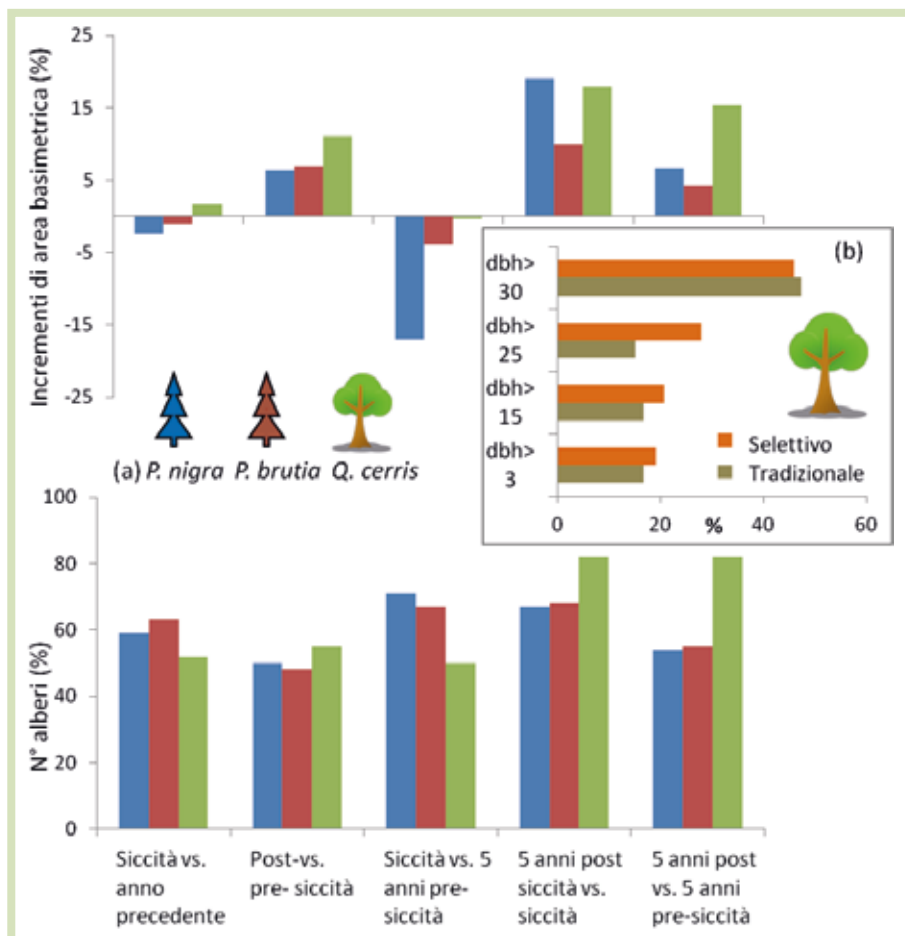


Figura 13. (a) Variazioni percentuali degli incrementi di area basimetrica (in alto) calcolati sulla base di cinque indicatori di accrescimento correlati con la siccità e percentuale di alberi (in basso) che hanno evidenziato lo stesso pattern di crescita. (b) Aumento percentuale della biomassa totale di cerro (*Q. cerris*) in differenti classi diametriche (DBH – diametro a petto d'uomo) dopo il diradamento tradizionale e selettivo.

NECROMASSA

I risultati del monitoraggio evidenziano elevati volumi di necromassa presenti nella foresta di Monte Morello prima degli interventi selvicolturali a causa dalla prolungata assenza di cure colturali e della conseguente diffusa moria delle piante. Il volume totale di legno morto è stato stimato in 75 m³ ha⁻¹ così distribuito nelle diverse componenti: 80% nel legno morto a terra, 18% negli alberi morti in piedi ed il restante 2% nelle ceppaie. Osservando poi la distribuzione dei volumi per classe di decomposizione si mette in luce come il 77% del volume totale sia concentrato nella seconda e terza classe di decomposizione.

I dati volumetrici hanno consentito di quantificare lo stock di carbonio (C-stock) presente nella componente morta della foresta di Monte Morello che è risultato pari a 10 t C ha⁻¹.

A seguito degli interventi selvicolturali si è registrato un decremento medio dei volumi di legno morto, e del conseguente C-stock, pari a 18 m³ ad ettaro nelle parcelle trattate con diradamento selettivo e di 10 m³ ad ettaro nelle parcelle trattate con diradamento tradizionale. Nello specifico durante il diradamento selettivo sono state abbattute ed asportate tutte le piante morte in piedi e rimossi i tronchi a terra con diametro maggiore di 30cm e appartenenti alla prima e seconda classe di decomposizione. Invece, nel diradamento tradizionale sono state abbattute ed asportate unicamente le piante morte in piedi, mentre il legno morto a terra non è stato prelevato.

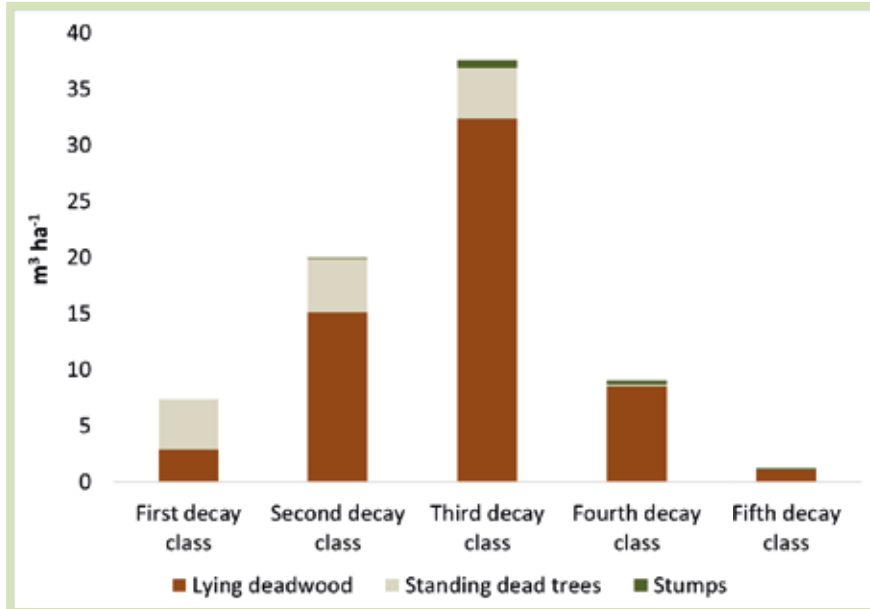


Figura 15. Distribuzione del volume di legno morto per componente e classe di decomposizione.

LETTIERA

Entrambi i tipi di diradamento hanno aumentato la lettiera al suolo immediatamente dopo le operazioni di taglio ed esbosco. L'incremento massimo è stato osservato nella frazione F (mediamente decomposta), indicando un elevato apporto di sostanza organica al suolo. Questo effetto è stato evidente nel breve termine, mentre due anni dopo il diradamento è stata osservata una riduzione della lettiera, più evidente nel diradamento selettivo.

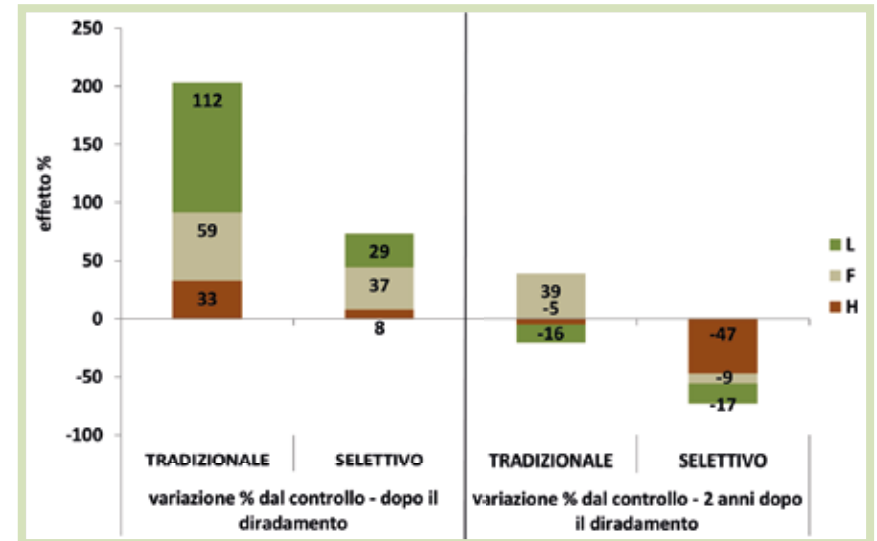


Figura 16. Effetti dei diradamenti sulla lettiera, subito e due anni dopo i tagli di diradamento.

SUOLO

Il suolo è una componente fondamentale del ciclo del carbonio, grazie alla sua capacità di stoccaggio nel lungo termine. Tuttavia, solo una frazione dei nuovi apporti di sostanza organica viene accumulata in composti recalcitranti con tempi di residenza lunghi, mentre un'altra frazione viene emessa come CO₂ tramite i processi di decomposizione.

L'effetto dei diradamenti sul contenuto di carbonio del suolo è risultato evidente due anni dopo i trattamenti, con un aumento del 29 e del 33% rispettivamente con il diradamento tradizionale e selettivo. Complessivamente, sono state sequestrate 32 e 36 t CO₂ ha⁻¹ anno⁻¹ ad una profondità di 30cm.

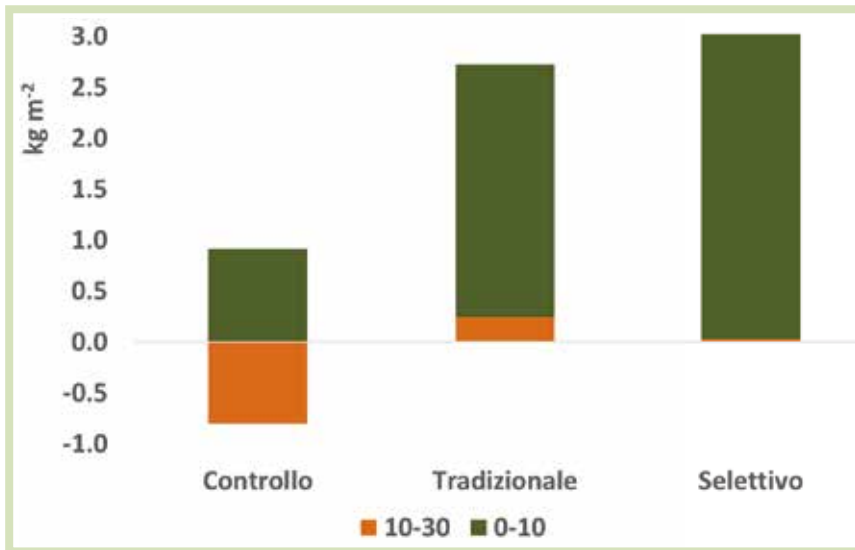


Figura 17. Variazioni del contenuto di carbonio due anni dopo i trattamenti nelle parcelle di controllo, tradizionale e selettivo. Sono riportati i risultati a 0-10 e 10-30 cm di profondità.

5.C Effetti sulle emissioni di gas serra

L'effetto dei diradamenti è stato evidente durante le operazioni selvicolturali, con un forte aumento delle emissioni di CO₂ causate dal compattamento del suolo, dall'aumento della mineralizzazione dei detriti organici freschi e delle radici morte. Questo aumento è scomparso dopo pochi mesi dagli interventi e per i due anni successivi, con valori finali di emissioni di CO₂ più bassi nel diradamento selettivo rispetto al controllo.

Il suolo è risultato essere un assorbitore netto di metano (CH₄), persistendo condizioni aerobiche durante tutto il periodo di monitoraggio che hanno favorito organismi metanotrofi. Nei due anni successivi agli interventi, l'assorbimento di CH₄ è aumentato nel diradamento selettivo rispetto al controllo e al tradizionale, grazie alle maggiori aperture nel soprassuolo.

I flussi di protossido di azoto (N₂O) non sono stati influenzati dai trattamenti e sono state vicine allo zero per tutto il periodo di monitoraggio, ad eccezione di pochi picchi stagionali.

Le emissioni di CO₂ sono state quindi la componente principale dei flussi cumulati di gas ad effetto serra, con un potenziale di riscaldamento globale (GWP) di circa 20 t CO_{2eq} ha⁻¹ anno⁻¹, mentre il contributo del N₂O è stato di 131 kg CO_{2eq} ha⁻¹ anno⁻¹ e il CH₄ di - 36 kg CO_{2eq} ha⁻¹ anno⁻¹. L'effetto dei diradamenti sul GWP è stato un aumento di breve termine, senza differenze significative a due anni dagli interventi.

Le variazioni dei flussi di gas ad effetto serra sono state mediate da fattori abio-

tici (temperatura e umidità del suolo) e biotici, principalmente dal contenuto di carbonio e azoto della lettiera e del suolo minerale. In particolare, la temperatura del suolo è stato il fattore determinante dei flussi di CO₂ e CH₄, mentre l'umidità per i flussi di N₂O.

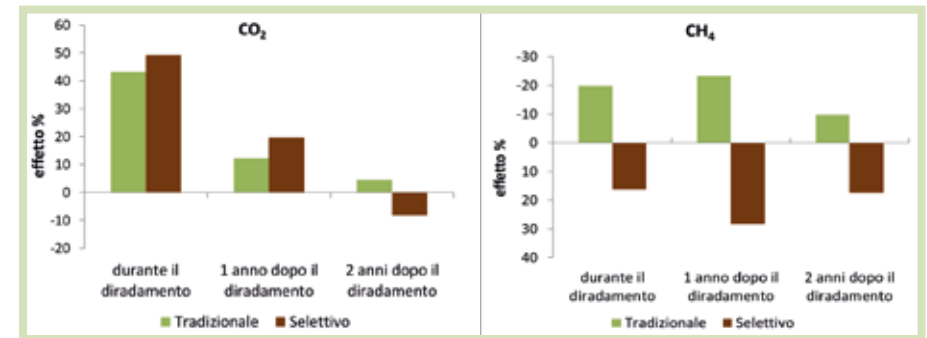


Figura 18. Effetto dei trattamenti sui flussi di CO₂ e CH₄.

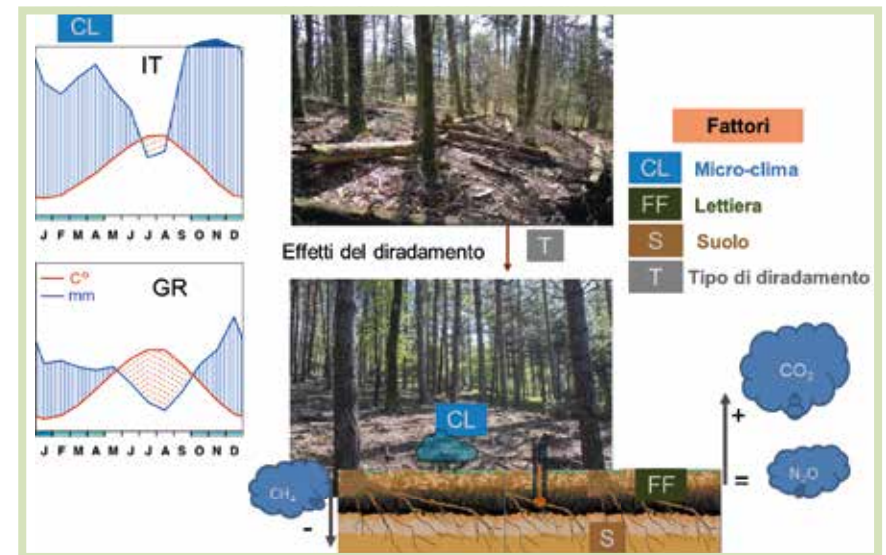


Figura 19. Schema concettuale dei fattori che hanno influenzato gli scambi gassosi.

6. PRODUZIONE DI BIOENERGIA

L'economia circolare si basa sull'allungamento della vita dei prodotti, sull'impiego di materie prime secondo tassi di utilizzo compatibili con il loro tasso di rigenerazione, sul riutilizzo dei prodotti, sulla riparazione e sulla rigenerazione attraverso l'innovazione tecnologica. L'obiettivo è la riduzione della dipendenza dalle

energie non-rinnovabili e dai prodotti a base fossile, caratterizzati da un'elevata impronta ambientale (environmental footprints), tenendo nella debita considerazione le tre dimensioni della sostenibilità: qualità ambientale, prosperità economica ed equità sociale.

La filiera foresta-legno nell'area oggetto di studio è stata analizzata seguendo i principi teorici della bioeconomia circolare. A tal fine l'indagine è stata condotta tramite un'analisi di filiera in cui sono stati ricostruiti i flussi di materiali e sull'applicazione di indicatori specifici per il settore forestale ai dati ricavati dalla precedente analisi.

Il flusso di materiale legnoso prelevato a seguito degli interventi selvicolturali è stato ricostruito per le diverse fasi della filiera: fase 1 di abbattimento ed esbosco; fase 2 di cippatura; fase 3 di trasporto del cippato; fase 4 di conversione energetica in impianto a biomasse. Tale analisi è stata realizzata al fine di valutare l'intera filiera foresta-legno a livello locale e fornire indicazioni ai pianificatori e gestori locali sulle strategie da adottare per migliorarne l'efficienza in una prospettiva di bioeconomia circolare.

Al fine di quantificare l'efficienza della produzione di bioenergia sono state sommate le emissioni di CO₂ in atmosfera durante tutte le fasi della filiera al netto delle eventuali emissioni evitate derivanti dalla conversione energetica del cippato e dal conseguente non impiego di combustibili fossili. Quest'ultimo aspetto è legato al concetto di "carbon neutrality" del sistema bioenergetico nel complessivo ciclo del carbonio. In tal modo è stato valutato se il processo produttivo è stato efficiente in termini di emissioni, in accordo con i principi base della green economy - definita un'economia a basse emissioni di CO₂, con uso efficiente delle risorse e socialmente inclusiva.

È stato anche considerato il rapporto tra la necromassa impiegata per finalità energetiche e la necromassa complessiva presente in bosco. In tal modo è stato possibile quantificare il grado di valorizzazione del legno morto presente in bosco tramite la sua conversione in energia, senza compromettere la biodiversità dell'ecosistema nel suo complesso. Nel caso della foresta di Monte Morello,

caratterizzata da quantità di legno morto assai elevate, questo indicatore risulta particolarmente consono ad esprimere il risparmio energetico derivante dalla valorizzazione di questa componente.

Fase	N° operatori	N° giornate di lavoro per operatore	N° ore di lavoro per operatore	N° ore di lavoro totali	Produttività (t ore ⁻¹)	Emissioni Kg CO ₂
Abbattimento e allestimento	Da 2 a 4	42	252	756	1,6	1080
Esbosco	Da 2 a 4	28	168	504	2,4	6144
Cippatura	2	10	60	120	10,1	6360

Tabella 6. Produttività ed emissioni nelle tre fasi nel cantiere di Monte Morello.

I risultati hanno evidenziato un bilancio favorevole per quanto riguarda le emissioni di CO₂, soprattutto in riferimento a quelle evitate impiegando fonti rinnovabili anziché fonti fossili, e nella valorizzazione energetica di una parte del legno morto presente in grande quantità nella foresta.

L'analisi ha evidenziato un bilancio favorevole in termini di emissioni di anidride carbonica: in quanto a fronte di emissioni di 7,2kg CO₂ m⁻³, derivanti dall'intero processo produttivo (dalla fase di abbattimento al trasporto alla centrale a biomasse), sono stati quantificate in 278kg CO₂ MWh⁻¹ le emissioni evitate grazie all'impiego di biomasse forestali anziché l'impiego di combustibili fossili. Analizzando in modo congiunto tutto il processo produttivo il bilancio di CO₂ per m³ di legname estratto è di circa -626kg CO₂ m⁻³. Inoltre, è stata evidenziata una discreta efficienza nella gestione forestale in quanto circa un terzo dello stock di legno morto presente in bosco è stato convertito in bioenergia. Ovviamente questa valutazione è strettamente legata ai volumi di legno morto presenti e alla sua distribuzione nelle classi di decomposizione, partendo dall'assunto che il legno morto delle ultime classi, a causa dell'elevato grado di decomposizione e umidità nonché della difficoltà di raccolta ed esbosco, non può essere convertito in energia. Il risultato positivo è quindi strettamente legato alla situazione di partenza che nel caso della foresta di Monte Morello presenta un'alta concentrazione dei volumi di legno morto nelle prime tre classi di decomposizione. L'instabilità meccanica e conseguentemente il potenziale accumulo di necromassa, tuttavia, non è una condizione rara tra i rimboschimenti di conifere mediterranee e montane dell'Appennino.

	Cippato	Metano	Gasolio
Potere Calorifico Inferiore (PCI)	3,4 MWh t ⁻¹	10 kWh m ³	11,6 MWh t ⁻¹
Rendimento impianto	0,85	0,90	0,85
Energia termica utile	3468 MWh	3468 MWh	3468 MWh
Quantità	1200 t	409929 m ³	351 t
Emissioni CO ₂	0	800 t CO ₂	1136 t CO ₂

Tabella 7. Confronto tra l'uso del cippato e fonti fossili, considerando 1,95kg CO₂ emessi per m³ di metano e 2,8kg CO₂ emessi per litro di gasolio.

7. IL SEQUESTRO E I CREDITI DI CARBONIO

I risultati del progetto LIFE FoResMit mettono in luce che i diradamenti eseguiti in pinete degradate, come la foresta di Monte Morello, portano ad un'iniziale perdita di C-stock, variabile in base all'intensità dell'intervento di diradamento (dal 20% al 35% del C-stock iniziale nel caso di Monte Morello), e ad un contestuale incremento del C-sequestration.

La capacità di sequestro del carbonio nelle foreste degradate prive di cure colturali (baseline scenario), è stato stimato in circa 17 tCO₂ ha⁻¹ anno⁻¹ nella biomassa e in 11 tCO₂ ha⁻¹ anno⁻¹ nel suolo. A distanza di due anni dagli interventi di diradamento è stato misurato l'incremento di biomassa che ha evidenziato valori di C-sequestration compresi tra 25 e 38 tCO₂ ha⁻¹ anno⁻¹, mentre per quanto concerne il suolo il bilancio tra assorbimenti e emissioni è stato pari a 12 e 18 tCO₂ ha⁻¹ anno⁻¹ a seguito dei diradamenti tradizionale e selettivo, rispettivamente. Grazie agli interventi di diradamenti, la capacità di stoccaggio di carbonio registra, per quanto concerne la biomassa, un incremento variabile dal 47 al 123%, rispetto allo scenario di controllo (baseline scenario). Per quanto riguarda il suolo, il contributo netto tra accumulo di carbonio nei primi 30 cm ed emissioni di gas ad effetto serra è stato negativo nello scenario di controllo (source di CO₂). I tagli di diradamento hanno quindi avuto l'effetto di trasformare il bosco da sorgente a sink netta di CO₂, assolvendo la sua funzione di mitigazione dei cambiamenti climatici.

Nello specifico è stato stimato che per recuperare totalmente il C-stock, prelevato durante gli interventi di diradamento e utilizzato per finalità energetiche (produzione di biomassa ad uso energetico), servono dai 3 ai 5 anni, dopodiché si inizia a generare un incremento positivo del quantitativo di carbonio stoccato comparato allo scenario baseline.

Una volta ripristinato il C-stock perso a seguito dei diradamenti, la capacità di

sequestro di carbonio della foresta su base annuale, acquisita grazie agli interventi di diradamento, può potenzialmente dar luogo a benefici economici, in termini di CC. Questi risultano compresi tra i 16 e i 43€ ha l'anno considerando l'attuale valore di mercato di 1 CC (circa 2,1 € per t CO_{2eq} in riferimento ai dati 2018 del *Voluntary Carbon Markets Insights*).

In conclusione, i risultati del progetto LIFE FoResMit mettono in evidenza come degli interventi di diradamento in boschi degradati, pur portando ad una iniziale perdita del C-stock, possono generare dei benefici ambientali ed economici nel medio-lungo periodo.

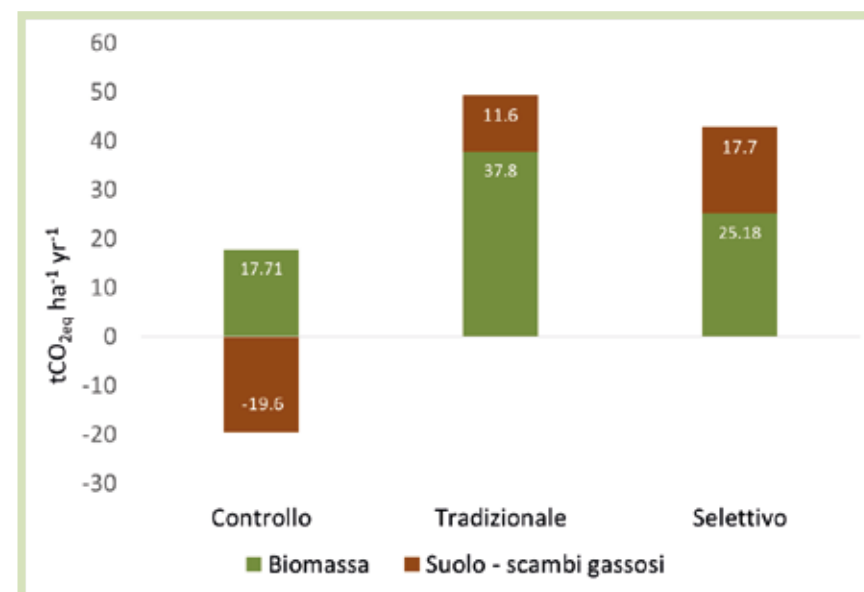


Figura 20. Variazioni dopo due anni del C-sequestration nei tre scenari gestionali della foresta di Monte Morello.

8. INDIRIZZI DI GESTIONE FORESTALE PARTECIPATI

Le foreste rivestono un ruolo di primaria importanza nel sequestro di CO₂ presente in atmosfera al fine di perseguire gli obiettivi delineati dal Paris Climate Agreement (CoP21). A livello italiano il Testo Unico in materia di foreste e filiere forestali (D.Lgs n.34 del 4 aprile 2018) prevede l'approvazione di linee guida istituzionali per generare crediti di carbonio da attività forestali ed agricole (art.7), mentre la Legge n.221 del 28 dicembre 2015 "Disposizioni in materia ambientale per promuovere misure di green economy e per il contenimento dell'uso eccessivo di risorse naturali" delega al Governo l'introduzione di un sistema di remunerazione dei servizi ecosistemici ed in particolare dei crediti generati dalla gestione forestale delle proprietà pubbliche (art.70). Alla luce di queste politiche nazionali e internazionali, le azioni forestali finalizzate a ridurre le emissioni e/o ad aumentare lo stoccaggio di CO₂ rispetto alle situazioni di partenza (baseline scenario), possono generare Crediti di Carbonio (1CC= 1tCO_{2eq}),

potenzialmente commercializzabili sul mercato volontario dei Crediti di Carbonio. Il Mercato Volontario dei crediti di carbonio nasce dalla volontà di organizzazioni profit e non-profit, amministrazioni locali e singoli cittadini nel contribuire attivamente in modo volontario alla mitigazione dei cambiamenti climatici attraverso azioni concrete di riduzione e compensazione delle proprie emissioni di gas ad effetto serra. Tra le tipologie di azioni forestali che possono generare Crediti di Carbonio rientrano, tra gli altri, i "Progetti di miglioramento della gestione forestale" (Improved Forest Management) finalizzati ad aumentare il carbonio stoccato nella foresta e nei prodotti forestali" (SFM). All'interno di questa tipologia di progetti, il progetto LIFE FoResMit si è focalizzato sullo studio degli effetti dei due tipi di diradamento (diradamento tradizionale e diradamento selettivo) per migliorare la gestione della foresta di Monte Morello allo scopo aumentare il carbonio sequestrato nel medio-lungo periodo.

Il progetto LIFE FoResMit si è posto tra i suoi obiettivi quello di identificare delle linee di intervento per una gestione sostenibile, dal punto di vista ecologico, economico e sociale, della foresta di Monte Morello. In questo contesto, il coinvolgimento delle comunità locali è stato considerato elemento prioritario del Progetto al fine di poter definire delle linee di intervento di gestione forestale in grado di tenere in considerazione le diverse istanze sociali. A tal fine sono state implementate tre fasi di coinvolgimento della comunità locale:

Fase 1 – Consultazione dei fruitori del bosco tramite somministrazione di questionario

Al fine di raccogliere le opinioni dei fruitori del bosco, turisti ed escursionisti, in merito agli interventi selvicolturali realizzati (diradamento tradizionale e selettivo) ed alle ipotesi di gestione future sono stati intervistati 201 fruitori che stavano svolgendo attività ricreative all'interno della foresta di Monte Morello (ad esempio escursioni a piedi o in bicicletta, raccolta di prodotti del sottobosco). I fruitori della foresta di Monte Morello sono stati identificati in modo casuale attraverso un campionamento sistematico nei tre punti a maggiore affluenza turistica. Tramite somministrazione assistita di un questionario semi-strutturato sono state raccolte le loro opinioni dei fruitori in merito alle principali attività ricreative svolte, all'importanza dei beni e servizi erogati dal bosco e alle loro preferenze estetico-ricreative nei confronti del paesaggio di Monte Morello a seguito dei due diradamenti applicati. A tal fine è stato mostrato un set di fotografie della foresta di Monte Morello in assenza di trattamenti selvicolturali e dopo i due diradamenti applicati chiedendo a ciascun visitatore di attribuire un punteggio, confrontando le immagini a coppie, in base alle proprie preferenze. I risultati della consultazione dei fruitori del bosco ha evidenziato una preferenza per alcuni servizi erogati dal bosco (ricreazione, biodiversità, mitigazione dai cambiamenti climatici) e un netto apprezzamento estetico per il paesaggio di Monte Morello a seguito del diradamento selettivo.



Figura 21. Consultazione dei fruitori della foresta di Monte Morello.

Fase 2 – Coinvolgimento dei gruppi organizzati tramite intervista semi-strutturate

Trentaquattro rappresentanti di gruppi organizzati (enti pubblici, associazioni no-profit, attori della filiera foresta-legno, università e centri di ricerca) sono stati intervistati, impiegando una traccia semi-strutturata, al fine di raccogliere le loro opinioni e preferenze nei confronti di possibili scenari gestionali da applicare alla foresta di Monte Morello. In particolare, agli intervistati è stato chiesto di assegnare l'ordine di priorità ai servizi ecosistemici erogati dalla foresta



Figura 22. Esempio di fotografie della foresta di Monte Morello mostrate ai fruitori.

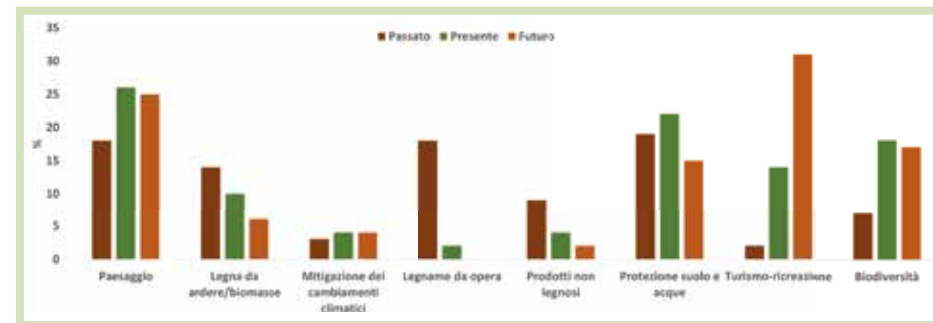


Figura 23. Importanza dei servizi ecosistemici erogati dalla foresta di Monte Morello nel frame temporale passato, presente, futuro.

utilizzando il frame temporale presente, passato e futuro. Inoltre, i rappresentanti dei gruppi organizzati hanno indicato su mappa le zone di importanza strategica per valorizzare nel prossimo decennio i servizi ecosistemici più importanti forniti dalla foresta di Monte Morello (mappatura partecipata). Le zone prioritarie indicate dagli intervistati sono state aggregate sulla base dei punteggi assegnati al fine di identificare le zone di maggiore importanza su cui concentrarsi nei futuri interventi di gestione forestale.

Fase 3 – Incontro con la cittadinanza

Nell'ultima fase di coinvolgimento della comunità locale è stato organizzato un incontro pubblico con la cittadinanza, finalizzato a condividere i risultati ottenuti nelle fasi precedenti del Progetto ed a raccogliere nuove opinioni in merito agli indirizzi di gestione forestale futuri. L'incontro ha visto la partecipazione di 85 persone, appartenenti sia a gruppi organizzati ma anche la presenza di comuni cittadini. Tramite tecniche di decisione partecipata, e la presenza di un facilitatore si sono potuti raccogliere nuovi contributi per la definizione di strategie di gestione forestale condivise. Il coinvolgimento attivo della cittadinanza e delle associazioni locali è servito per capire come intervenire allo scopo di migliorare i servizi naturali futuri forniti dalla foresta di Monte Morello nelle zone di maggior interesse.



Figura 24. Zone di maggiore importanza della foresta di Monte Morello indicate dai rappresentanti dei gruppi organizzati (mappatura partecipata)

9. CONCLUSIONI E PROSPETTIVE GESTIONALI

Complessivamente, grazie al progetto LIFE FoResMit, è stata dimostrata l'applicabilità di tagli di diradamento di tipo selettivo per la valorizzazione ed il recupero di boschi di conifere degradati.

Il monitoraggio degli effetti dei diradamenti ha permesso di evidenziare l'impatto dei tagli su una serie di fattori legati alla vegetazione, al suolo, agli scambi gassosi e alla percezione della popolazione, che riflettono i servizi ecosistemici offerti dal bosco.



Figura 25. Incontro pubblico con la cittadinanza per discutere dei futuri interventi gestionali della foresta di Monte Morello.



Figura 26. Articolo di giornale inerente il progetto LIFE FoResMit.

Tipo di servizio ecosistemico	Indicatore	Impatto del diradamento selettivo
Approvvigionamento	Produzione legnosa	+
	Produzione di bioenergia	+
Di supporto	Diversità di struttura	+
	Legno morto decomposto	-
	Stabilità e resilienza	+
Di regolazione	Carbonio stoccato nella vegetazione	-
	Incremento di carbonio nella vegetazione	+
	Incremento di carbonio nel suolo	+
	Emissioni di CO ₂	+ (breve termine) = (medio termine)
	Emissioni di CH ₄	-
Culturale	Emissioni di N ₂ O	=
	Preferenze dei visitatori	+
	Fruibilità del bosco	+

Tabella 8. Impatto del diradamento selettivo su diversi servizi ecosistemici. + aumento; - diminuzione; = nessun effetto

L'entità e la direzione di questi effetti dipendono da fattori pedologici, climatici e vegetazionali che sono sito-specifici, ma si possono fare alcune considerazioni generali riguardo i criteri guida dell'applicabilità del diradamento selettivo:

✓	Lo stato di degradazione del bosco determina le possibilità di intervento, nel senso di una diminuzione della biomassa massima asportabile in caso di bosco fortemente degradato per mantenere una copertura continua e non compromettere le sue funzioni di protezione idrogeologica.
---	--

✓	La quantità di legno morto a terra e in piedi e la sua distribuzione in classi diametriche determina la possibilità di un suo utilizzo per finalità energetica: in caso di elevata presenza di necromassa (superiore ai 50 m ³ ad ettaro) è possibile l'utilizzo parziale delle prime due classi di decomposizione per la produzione di bioenergia senza compromettere la biodiversità dell'ecosistema.
✓	Il diradamento selettivo modella la struttura del popolamento sia in termini di composizione specifica (tramite l'intervento possono essere favorite le specie consociate al pino) sia in quanto favorisce la componente dominante. Questi aspetti saranno cruciali in fase di rinnovazione del bosco, se si deciderà di optare verso trattamenti per la rinnovazione naturale (tagli successivi, tagli a buche ecc.).
✓	Lo sviluppo della componente dominante del popolamento aumenta il grado di stabilità meccanica del bosco.
✓	La struttura iniziale del popolamento determina quali specie favorire dal diradamento selettivo: in caso di presenza di specie coerenti con la vegetazione naturale, come Q. cerris, è auspicabile favorire la loro crescita potenziale, con l'obiettivo di aumentare la resilienza.
✓	Col diradamento selettivo ci si aspetta una maggiore longevità della pineta. Il pino nero è infatti specie potenzialmente assai longeva allorquando i soggetti dominanti vegetino con sufficiente spazio tra le chiome.
✓	Il contenuto iniziale di sostanza organica del suolo determina la sua capacità di sequestro della CO ² : suoli poveri di sostanza organica possono avere aumenti considerevoli di carbonio accumulato al suolo nel breve periodo, che tuttavia potrebbe rispecchiare un effetto transiente di breve periodo.

✓	La gestione dei residui più fini (lettiera inferiore ai 4,5cm di diametro) ha un grosso impatto sul ciclo del carbonio nel suolo, determinando sia un aumento transiente delle emissioni di CO ₂ sia un iniziale aumento dell'accumulo di carbonio nel suolo. Il bilancio osservato tra entrate e uscite è stato positivo a due anni dal taglio.
✓	La perdita iniziale dello stock di carbonio nella biomassa può essere recuperata in pochi anni grazie ad un maggior incremento radiale e volumetrico, più veloce in caso di forte degradazione iniziale.
✓	La possibilità di utilizzare il cippato come fonte di bioenergia è una valida alternativa nel caso in cui la qualità del legname non sia sufficiente a sostenere altri tipi di utilizzo.
✓	Le modalità di realizzazione del diradamento (macchine utilizzate, tipo di esbosco) e la durata delle operazioni selvicolturali influiscono sulle emissioni di gas serra, con un aumento proporzionale all'intensità.
✓	La vicinanza del bosco alle aree urbane e la fruizione del bosco da parte della popolazione determinano la necessità di rendere partecipe la popolazione riguardo le finalità dei tagli, anche al fine di evitare possibili contrasti.
✓	Il diradamento si è rilevato efficace su diversi tipi di substrato geologico e di suolo, indicando la sua replicabilità in ambienti mediterranei caratterizzati anche da diversi livelli di degradazione.



