

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI MILANO



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO
FACOLTÀ DI SCIENZE AGRARIE E ALIMENTARI

**Studio delle caratteristiche chimiche e biologiche
di lettiere della Val Seriana**

Elaborato finale di:

SILVIA VITE

matr. 868707

Relatrice: Prof.ssa F. Tambone

Anno accademico: 2023/2024

Riassunto.

Il ciclo del carbonio è caratterizzato dalla produzione di anidride carbonica (CO_2) la quale è prodotta dagli esseri viventi. Questa molecola è impiegata dagli organismi autotrofi per produrre sostanze organiche, come carboidrati, acidi carbossilici, acidi grassi e altre sostanze importanti per il loro ciclo di vita; formando biomassa nell'ecosistema forestale. Quando si analizza questo ciclo si tende a considerare la "foresta" (o bosco) come un unico ecosistema composto da piante, suolo e da tutti gli organismi autotrofi che vivono all'interno; non considerando nel dettaglio l'apporto degli organismi presenti sulla superficie del suolo per la produzione della CO_2 . Nello strato più superficiale del suolo, orizzonte O, si trova uno strato organico (lettiera) in cui sono presenti parti di organi morti delle piante (foglie, rami, pigne, resine, ecc.) che sono degradate dai microrganismi detritivori, producendo anidride carbonica. Questo fenomeno è composto da processi di respirazione radicale e di decomposizione della sostanza organica dai microrganismi che rappresentano una parte molto rilevante della respirazione degli ecosistemi forestali, influenzando la composizione stessa dello strato superficiale del suolo. Inoltre la respirazione del suolo è influenzata dai fattori ambientali (temperatura, umidità, precipitazioni), stagionali (stadio evolutivo del bosco o disturbi antropici) che agiscono direttamente sulla composizione della lettiera e dei microrganismi che vivono al suo interno.

Nel presente studio sono stati confrontati la composizione chimica e l'attività respirometrica di tre lettiere di tre specie vegetali differenti (*Fagus sylvatica*, *Larix decidua* e *Picea abies*) per controllare la presenza di una correlazione tra specie e produzione di anidride carbonica. In ognuno dei campioni sono stati effettuati analisi chimiche (pH, azoto totale, carbonio organico totale), analisi spettroscopiche (*Diffuse Reflectance Infrared Fourier-Transform Spectroscopy* – DRIFTS – e ^{13}C Cross Polarization magic Angle Spinning Nuclear Magnetic Resonance - ^{13}C CPMAS NMR) ed analisi respirometriche per determinare in quale modo la respirazione del suolo potesse essere influenzata dalle lettiere delle diverse specie forestali. Le misure di respirazione delle lettiere sono state svolte in laboratorio a temperature standard e con un sistema saturo che misurava la produzione di anidride carbonica.

Dai dati ottenuti si è riscontrata una correlazione dell'attività respiratoria dei campioni con il contenuto di sostanze difficilmente degradabili (es. lignina). Dallo studio effettuato è stato infatti riscontrata una correlazione tra la produzione di CO₂ e carbonio organico totale (TOC), ed una maggiore correlazione con le sostanze ligno umiche.

Dai risultati, è quindi emerso che, nel valutare la risposta della produzione dell'anidride carbonica nell'ecosistema terrestre, l'apporto dell'attività respiratoria delle lettieri è un parametro da considerare sul consumo di carbonio nella biomassa forestale fornendo inoltre utili indicazioni nei contesti di attività di riforestazione.

Sommario

1. Introduzione.....	1
1.1. L'ecosistema suolo e i principali cicli biogeochimici.....	4
2. Inquadramento territoriale	8
2.1. Il contesto territoriale.....	8
2.1.1. Microarea 1, faggeta montana.	12
2.1.2. Microarea 2, larice	13
2.1.3. Microarea 3, pecceta montana.	15
2.2. Caratteristiche delle specie studiate.....	17
2.2.1. Faggeta.	17
2.2.2. Larice	20
2.2.3. Pecceta montana.	24
3. Materiali e metodi.....	29
3.1. Preparazione dei campioni.....	29
3.2. Analisi effettuate sulla lettiera	29
3.2.1. Allestimento e monitoraggio della respirazione	29
3.2.2. pH	32
3.2.3. Determinazione dell'azoto totale.....	32
3.2.4. Determinazione del carbonio organico totale (TOC).	33
3.2.5. Determinazione della composizione della sostanza organica.....	35
3.2.6. Determinazione delle ceneri.	37
3.2.7. Determinazione della struttura chimica per mezzo della spettroscopia DRIFT.	38
3.2.8. Determinazione della struttura chimica per mezzo spettrometria ¹³ C Cross Polarization agic Angle Spinning Nuclear Magnetic Resonance - ¹³ C CPMAS NMR.	40
4. Risultati e Discussione	42

4.1. Determinazione del pH.....	42
4.2. Determinazione dell'azoto totale, del carbonio organico totale e calcolo del rapporto C/N.....	42
4.3. Caratteristiche spettroscopiche dei campioni attraverso l'analisi ¹³ C CPMAS-NMR e DRIFT.....	44
4.4. Determinazione dell'attività respiratoria di lettiera e suoli	51
5. Conclusioni.....	60
6. Bibliografia.....	61

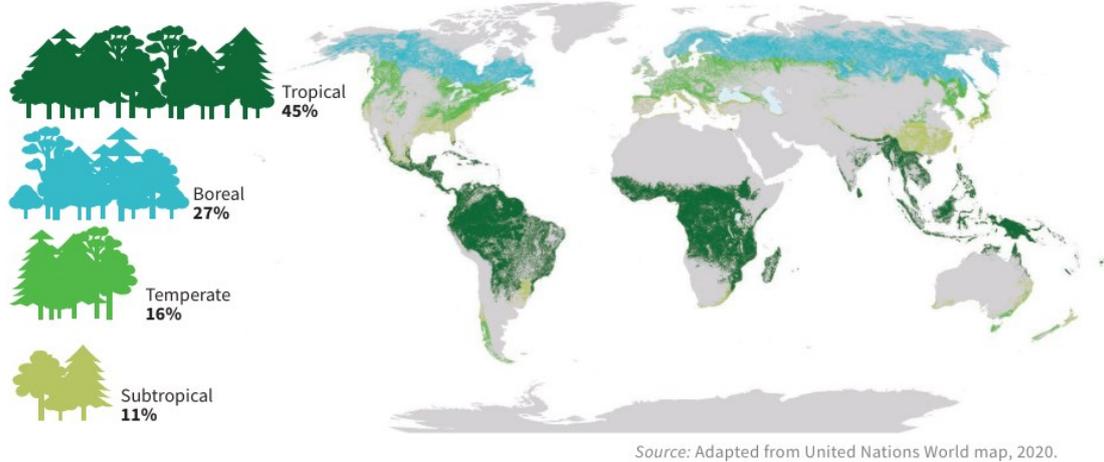
1. Introduzione.

Se la dominanza degli alberi definisce per un geografo l'esistenza di un paesaggio forestale, come accade per vaste regioni della Terra (ad esempio Scandinavia e Amazzonia), o su aree più ristrette, ad esempio alcune vallate alpine italiane, il bosco può essere considerato, con estensioni minori, inframmezzato o accostato ad altre forme di copertura del suolo. Poco più di un terzo della superficie delle terre emerse è occupato da foreste (4,06 miliardi di ettari (ha), FAO 2020)¹, equivalente a 0,52 ha per persona (su un totale di 7,79 miliardi di persone)². Il rapporto tra uomo e foresta si è sviluppato in alcune migliaia di anni in modo molto travagliato per la distruzione delle coperture arboree – sostituite da colture agrarie, pascoli, insediamenti ed infrastrutture – rapporto che ha impedito la ricostruzione spontanea del bosco ed ha provocato l'erosione e la scomparsa del suolo.

¹ FAO. 2020. Global Forest Resources Assessment 2020

² World Population Prospects 2019, Online Edition.

Proportion and distribution of global forest area by climatic domain, 2020



Top five countries for forest area, 2020 (million ha)

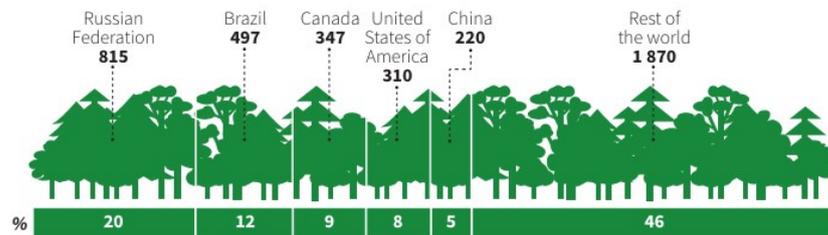


Figura 1 FAO 2020. Global Forest Resources Assessment 2020

Secondo la Convenzione Europea del Paesaggio (2000), il bosco è un elemento “del paesaggio”, quest’ultimo definito come “una determinata parte di territorio, così come è percepita dalle popolazioni, il cui carattere deriva dall’azione di fattori naturali e/o umani e dalle loro interrelazioni”; quindi prende un significato formale: una realtà percepibile visivamente che possiede un significato estetico, storico, identitario per la società umana.



Figura 2. areal photography of village and mountains during day time, funes, funes. Fonte: <https://www.wallpaperflare.com/areal-photography-of-village-and-mountains-during-day-time-funes-funes-wallpaper-trfmk>

Si può, quindi, pensare che esso sia, in qualche modo, una “costruzione mentale del soggetto”, ossia un risultato di un atteggiamento nei riguardi di ciò che la persona vede³. Ma un diverso approccio è quello oggettivo, ossia considerare il paesaggio come “ciò che si vede”, a prescindere dall’atteggiamento di chi vede⁴ andando a considerare solo gli oggetti (dell’ambiente abiotiche e antropico) che lo hanno generato⁵. Di conseguenza l’attività dell’uomo nel bosco diviene così un elemento determinante del paesaggio forestale, non sempre espressa da forme visibili o comunque rilevabili attraverso rappresentazioni cartografiche⁶. Ne consegue che l’“ecosistema bosco” va considerato come un “insieme di tutti gli organismi viventi in una data area, che interagiscono tra di loro e con l’ambiente fisico in modo tale che un flusso di energia [che lo attraversa] porta ad una ben definita struttura trofica, ad una diversità biotica ed a una circolazione della

³ Vecchio, *Le paysage dans la geographie Italienne d'apres-guerre*, 247

⁴ Vecchio, 266

⁵ Zonneveld, *Land evaluation and Land(scape) Science*, 134

⁶ Gambi, *Una geografia per la storia*.

materia nell'interno del sistema"⁷. In Italia il bosco, selva e foresta sono equiparati (D. Leg. n. 227 18/5/2001 e D. Leg n. 34 del 3/4/2018) ed indicano un complesso di alberi relativamente denso ed esteso. Tale definizione di bosco è impiegata principalmente dalla società, non nei contesti professionale e scientifico, nei quali si concentrano gli aspetti tecnico-economici e non quelli visivi ed ecologici.

L'analisi di un "ecosistema bosco" inizia interpretando sia gli aspetti strutturali-statici (composizione specifica, distribuzione spaziale, densità, dimensione degli alberi), sia gli aspetti funzionali-dinamici (rapporti intraspecifici ed interspecifici: fissazione di energia e produzione di biomassa, ciclo degli elementi, ambiente fisico) direttamente connessi agli alberi. Questi aspetti condizionano l'ambiente interno del bosco in fattori favorevoli a tutte le altre componenti viventi dell'ecosistema in esame. Alcune valutazioni possono essere fatte con l'osservazione diretta, mentre altre richiedono misure con strumenti specifici sia in campo che in laboratorio.

1.1. L'ecosistema suolo e i principali cicli biogeochimici

Gli ecosistemi forestali svolgono un ruolo fondamentale all'interno dei principali cicli biogeochimici globali, in particolare quelli del carbonio e dell'azoto, con implicazioni di enorme importanza sul clima regionale e globale. A livello globale, infatti, il carbonio dei sistemi terrestri è per 2/3⁸ sequestrato nelle componenti degli ecosistemi forestali che includono alberi, piante del sottobosco, lettiera, necromassa, e carbonio organico nel suolo.

Si stima che il contributo delle foreste (temperate) nel ridurre le emissioni di CO₂ ammonti circa al 25%, accumulando carbonio sia sotto forma di biomassa (legno) sia di sostanza organica nel suolo; quest'ultima forma di accumulo è di enorme importanza poiché a livello di biosfera corrisponde a circa tre volte il carbonio immagazzinato come

⁷ Odum, *Fundamentals of ecology*, 544 e Tansley, *The use and abuse of vegetational concepts and terms*, 307

⁸ Misson *et al.*, *Partitioning Forest Carbon Fluxes With Overstory and Understory Eddy-Covariance Measurements*, pp 14

biomassa⁹; Nel contesto Italiano, sono proprio gli ecosistemi forestali che contengono circa il 60%¹⁰ di tutto il carbonio presente nel suolo.

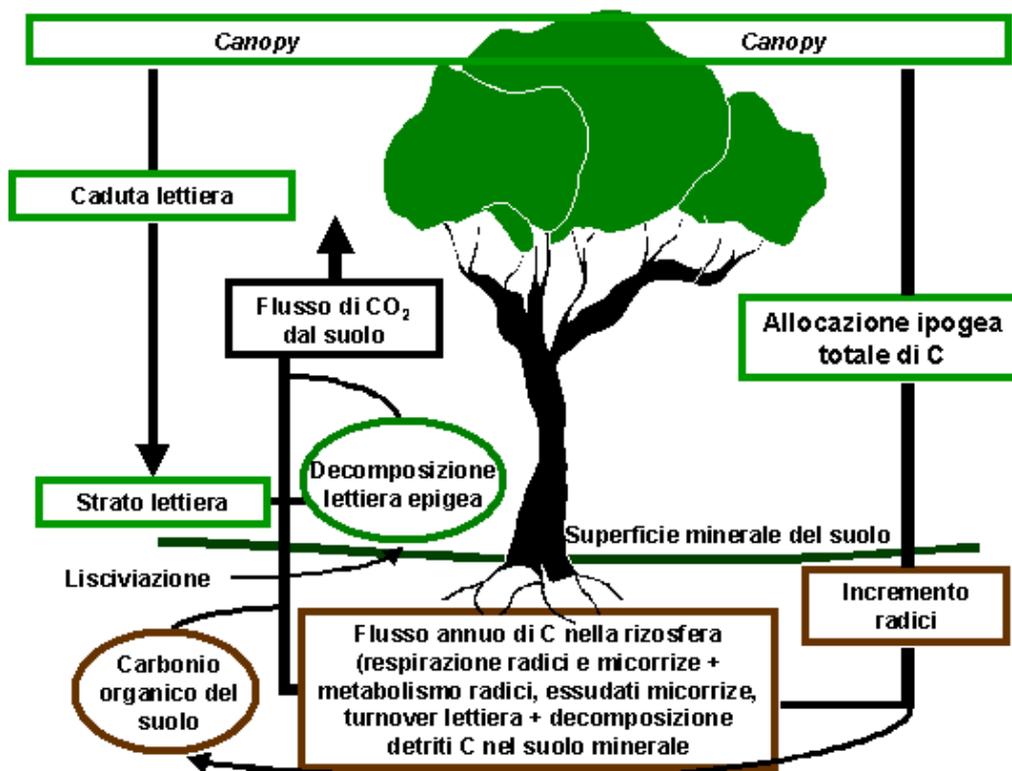


Figura 3. Sommario dell'approccio del bilancio di massa utilizzato per esaminare i flussi di C ipogeo. Fonte: Lasserre B., et. al., *Problematiche di inventariazione del carbonio nella biomassa forestale ipogea*. Volume 3, pp. 542-554

La fissazione della CO₂ atmosferica attraverso il processo di fotosintetico e l'entità della biomassa presente nelle foreste, sono temi di grande interesse sia in scala ridotta, come nel caso di arboreti, sia su vasti areali, per esempio foreste presenti in parchi nazionali. L'accumulo e il rilascio di carbonio da parte dell'ecosistema forestale è legato a diversi fattori che influiscono sul "serbatoio": la respirazione delle piante e di altri microrganismi autotrofi ed eterotrofi, emissione da parte di tessuti del suolo di composti volatili organici o di perdite di carbonio legate a disturbi naturali (attacchi parassitari) o antropici (utilizzazioni, incendi e pascoli in bosco). Ciò nonostante, non sempre questa quota considerevole viene considerata nei bilanci della produttività primaria netta. Il sottobosco

⁹ Royal Society, *the Role of Lan Carbon Sinks*, 1-27

¹⁰ Assennato et. al., *Carbonio organico del suolo e impatto del consumo di suolo*. ISPRA

produce il 4-30%¹¹ del totale della lettiera annua in una foresta e il suo ruolo nella pedogenesi e nell'accumulo di carbonio è cruciale nelle prime fasi della successione ecologica che conseguono a fattori di disturbo, quali il taglio o il passaggio del fuoco. La vegetazione del sottobosco dovrebbe essere, quindi, inclusa nei modelli di previsione dei flussi di carbonio, essendo una componente importante del ciclo biogeochimico.

La lettiera presente sulla superficie del suolo boscato è costituita principalmente da tessuti non viventi: foglie/aghi e piccoli rami caduti, resti di infiorescenze, semi e frutti. Inoltre è possibile trovare una grossa percentuale di necromassa, costituita da piante morte, in piedi o cadute, che non fanno parte della lettiera ma possono essere siti in cui insetti, funghi e altri esseri viventi vivono e interagiscono con la lettiera.

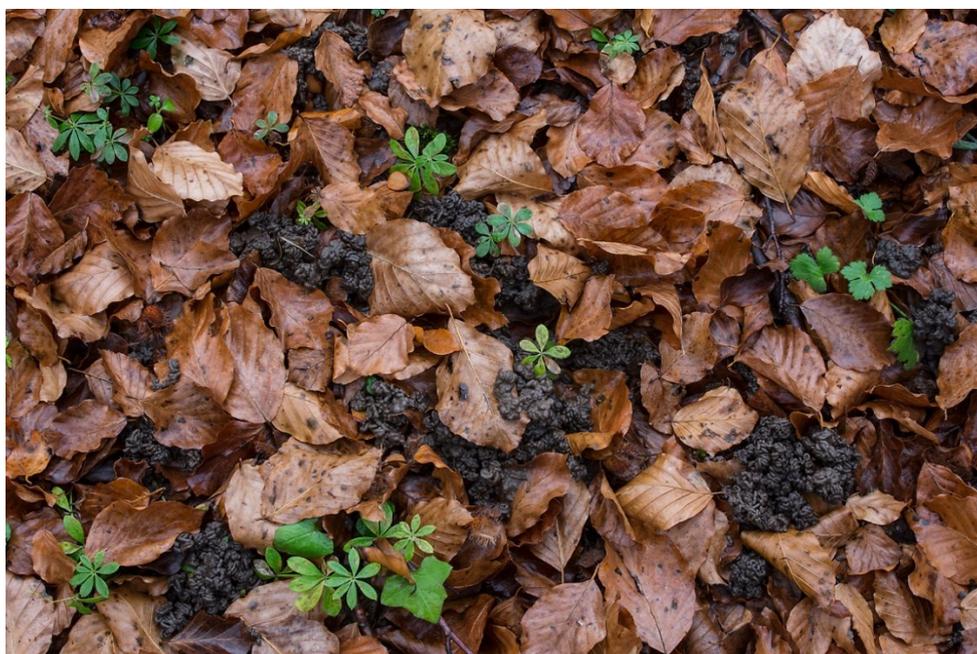


Figura 4. Lettiera di una faggeta. Fonte: <http://www.forestbeat.it/la-lettiera/>

La lettiera è la componente più superficiale dell'orizzonte organico del suolo ed è quella in cui comincia la transizione tra i tessuti vegetali, ormai morti, in humus. In questo strato avviene un'intensa attività biologica che porta alla decomposizione della sostanza organica in sostanza inorganica. La quantità di lettiera dipende da diversi fattori legati al contenuto pedologico-climatico, alla composizione delle specie arboree presenti e alla presenza/assenza di specie vegetali nel sottobosco; questi fattori influenzeranno, di

¹¹ Hughes, *Ground vegetation and forest litter production*, 145-149

conseguenza, anche l'attività metabolica dei microrganismi detritivori che avranno un'azione positiva (la decomposizione risulterà accelerata) o negativa (la decomposizione risulterà rallentata) a seconda dei casi. Inoltre altre attività biotiche, abiotiche e antropiche potranno influenzare la decomposizione della sostanza organica (ad esempio organismi fillofagi, incendi o interventi da parte dell'uomo nel bosco – passaggio con macchinari pesanti, asportazioni di piante, ecc.). L'alterazione della lettiera libera nutrienti che potranno essere utilizzati da altri organismi viventi, oppure dalle stesse piante. La lettiera non è solo uno strato di suolo in cui possiamo trovare sostanze nutritive: ha anche diverse funzioni fondamentali all'interno dello stesso ecosistema forestale. Funge da habitat di determinate specie animali (es. lombrichi), funghi ed insetti; favorisce la liberazione di sostanze tossiche che andranno a inibire l'insediamento di altre specie concorrenti; intercetta la luce e favorisce la germinazione di alcuni semi in favore di altri; riduce l'escursione termica del suolo e l'evapotraspirazione, permettendo una continua attività biologica. Durante le piogge la lettiera costituisce uno strato protettivo per il suolo, impedendo all'acqua di scorrere liberamente, contribuendo ad una riduzione della velocità e alla forza erosiva. Queste funzioni dimostrano come la lettiera sia fondamentale all'interno di un bosco ed è importante non sottovalutarla quando si determina il ciclo del carbonio e dell'azoto.

2. Inquadramento territoriale

2.1. Il contesto territoriale.

La Lombardia è costituita da un variegato mosaico verde, con i suoi quasi 620 mila ettari di boschi e foreste nel 2022, che coprono poco più di un quarto della superficie territoriale.

La distribuzione della superficie forestale nelle tre zone altimetriche vede l'81% del bosco situato nelle aree montane, il 12% in fascia collinare il 7% in pianura.

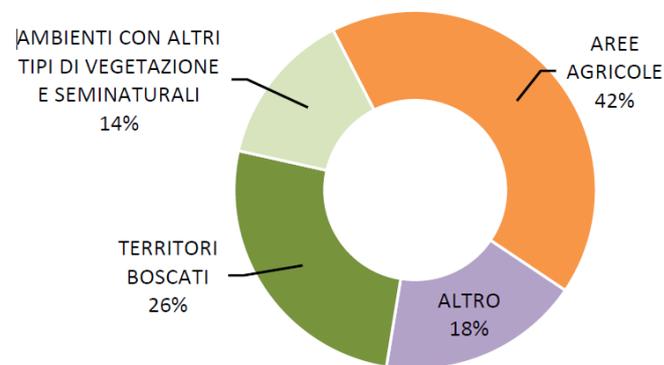


Figura 5 Ripartizione del territorio della Lombardia per macro-aree di destinazione d'uso. Fonte: Carta d'uso dei suoli agricoli e forestali citato nel report ERSAF, Rapporto sullo stato delle foreste in Lombardia 2022.

I tipi di popolamenti forestali più rappresentati nella nostra regione sono: i Castagneti (11,3%), le Peccete (11,1%), gli Orno-ostrieti (10,8%) e le Faggete (10,4%).

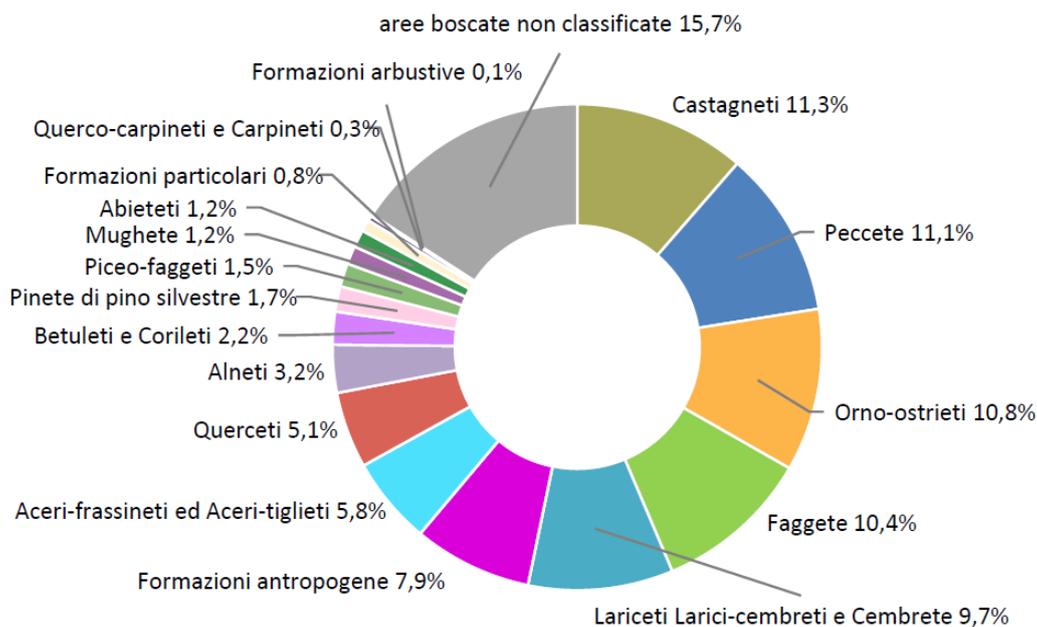


Figura 6 Categorie forestali in percentuale sul totale del bosco regionale. Fonte: INFC2015 citato ERSAF, Rapporto sullo stato delle foreste in Lombardia 2022.

In questo studio, ci si è concentrati nello specifico della Val Seriana, in provincia di Bergamo, quarta provincia lombarda per tasso di boscosità con il 41%¹² del territorio coperto da bosco su una superficie di 2.723 km², pari a 1.138,83 km² di bosco.

¹² Fonte: Carta Forestale, citato in ERSAF, Rapporto sullo stato delle foreste in Lombardia 2022.

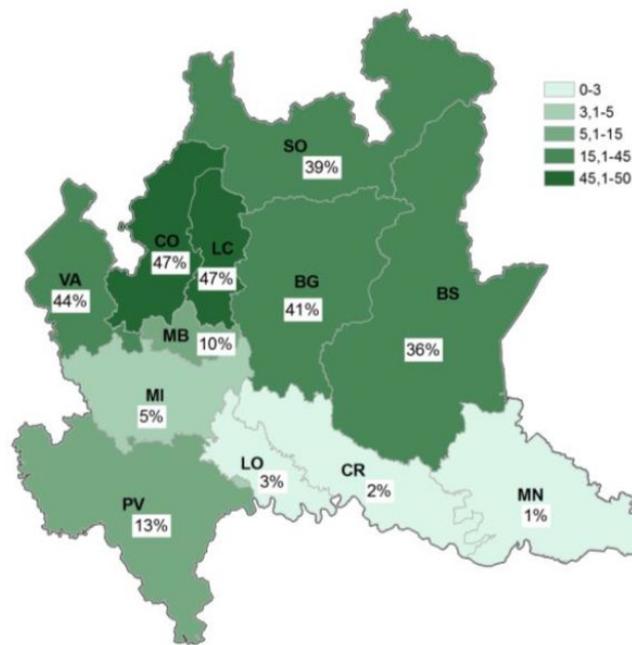


Figura 7 Tasso di boscosità nelle province lombarde (percentuale di superficie boscata rispetto all'intera superficie provinciale). Fonte: Carta forestale delle Lombardia citato nel report ERSAF, Rapporto sullo stato delle foreste in Lombardia 2022.

La Val Seriana è una valle alpina, formatasi dal bacino idrico del fiume Serio. Si estende per circa 60 km in direzione nord-est dal capoluogo bergamasco.

Le condizioni orografiche, morfologiche e climatiche di questa valle si articolano a partire da un clima insubrico delle fasce perilacuali del Sebino a 160 m s.l.m. fino ai 2.000 m s.l.m. dei pascoli dell'Alta Val Seriana, con stretti fondovalle e ripidi versanti boscati. Questa valle presenta un alto numero di laghetti alpini, di piccole valli, linee di displuvio e di corsi d'acqua che si riuniscono nel Serio, nel Borlezza, nel Cherio e nel Sebino.

L'ambiente montano della Val Seriana è caratterizzato da boschi di latifoglie nel fondovalle e, salendo di quota, da boschi di conifere (per un totale del 70% della superficie della valle), fino ad arrivare a pascoli alpini (14.6%).¹³

¹³ Fonte: carta delle Distribuzione degli Usi del Suolo Agricolo Forestali (DUSAF4), citato nel PSL Valle Seriane e Laghi Bergamaschi. 2016.

USO DEL SUOLO

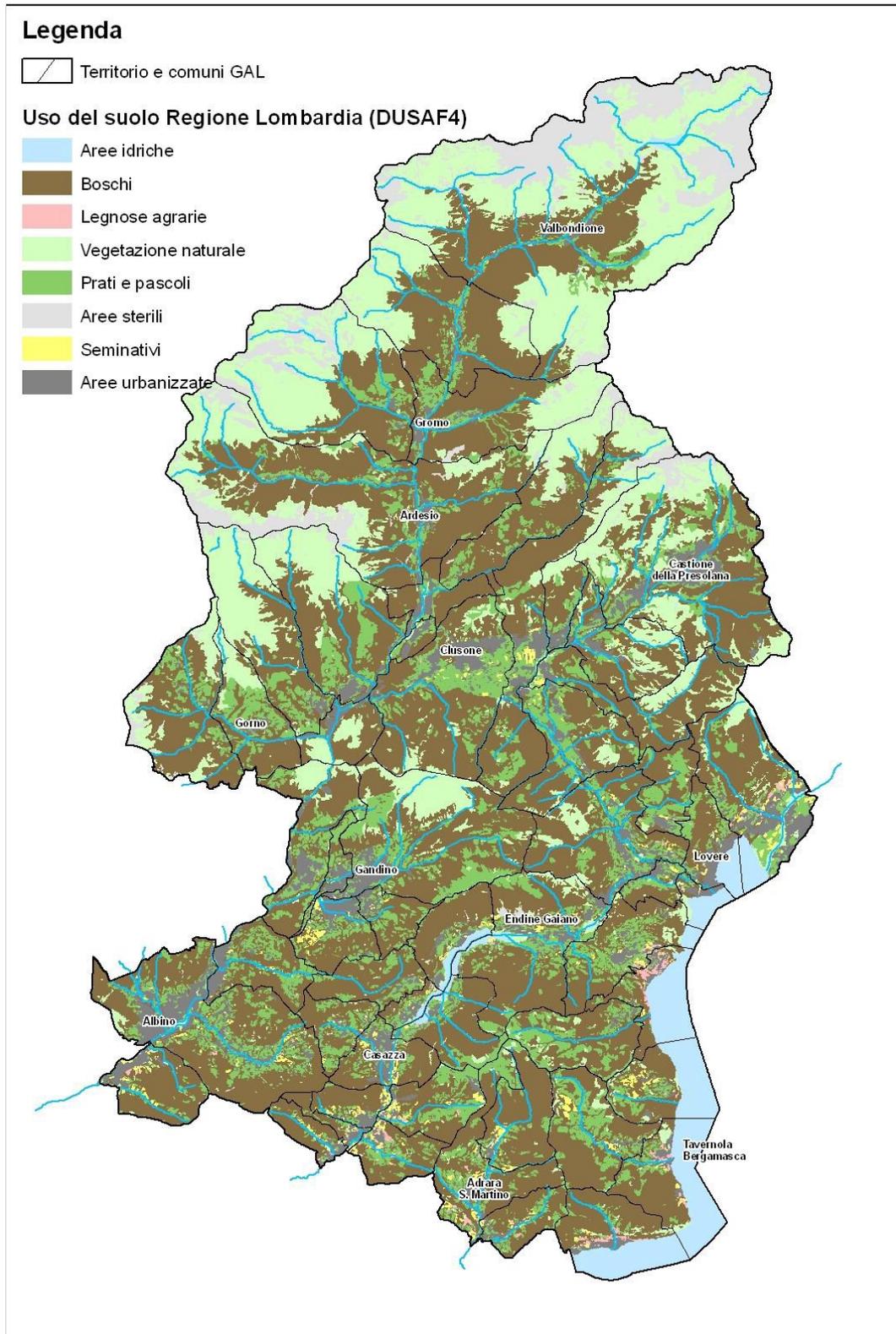


Figura 8 Uso del suolo Regione Lombardia (DUSAF4). Fonte: PSL Valle Seriana e Laghi Bergamaschi. 2016.

La zona d'interesse è situata in Alta Val Seriana, un territorio caratterizzato da un ambiente conchiuso con poche connessioni ambientali e funzionali.

Più precisamente si sono scelte tre microaree caratterizzate dalla presenza di boschi di Peccete, di Faggi e di Larici. Le prime due microaree sono situate in località Spiazzi di Gromo, frazione del comune di Gromo. L'ultima microarea si trova nel comune di Gandellino, poco più a nord rispetto a Gromo.

2.1.1. Microarea 1, faggeta montana.

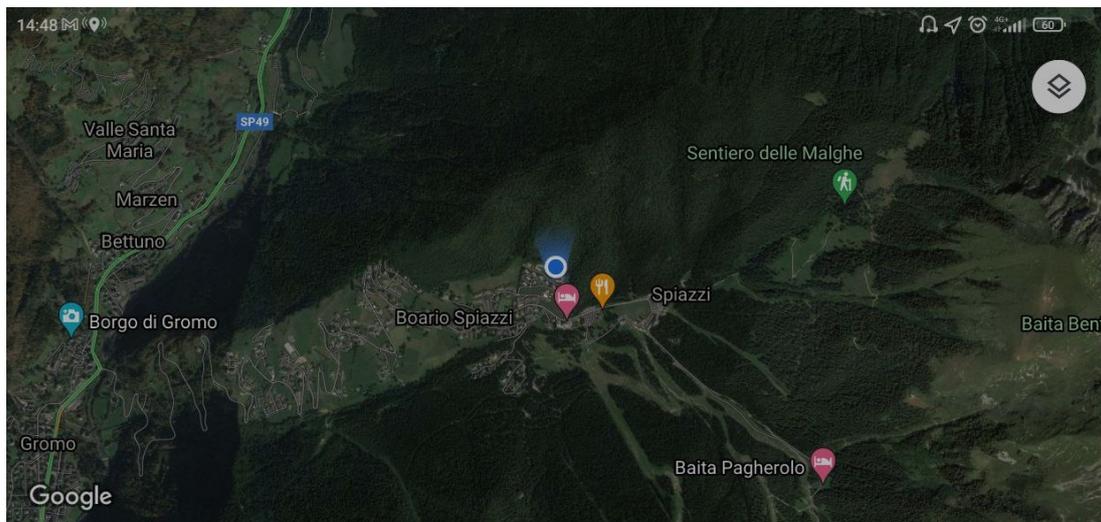


Figura 9 Microarea 1 in località Spiazzi di Gromo, frazione di Gromo (BG). Fonte: Google Maps

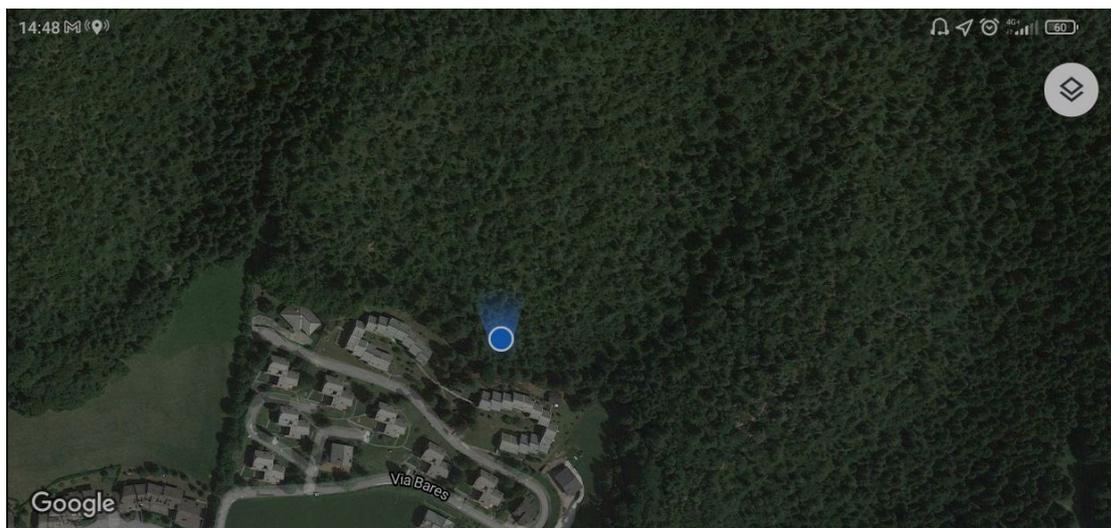


Figura 10 Microarea 1 in località Spiazzi di Gromo, frazione di Gromo (BG). Fonte: Google Maps



Figura 11 Carta Forestale in Spiazzi di Gromo, frazione di Gromo (BG). Fonte: Geoportale della Lombardia.

Questa zona si trova a $45^{\circ}58'22.8''N$ e $9^{\circ}57'26.8''E$, ad una altitudine di circa 1.200 m s.l.m. in direzione nord.

Il periodo del campionamento è stato il 21 dicembre 2021, non aveva ancora nevicato: il suolo presentava ancora una lettiera composta da foglie ben visibili.

2.1.2. Microarea 2, larice

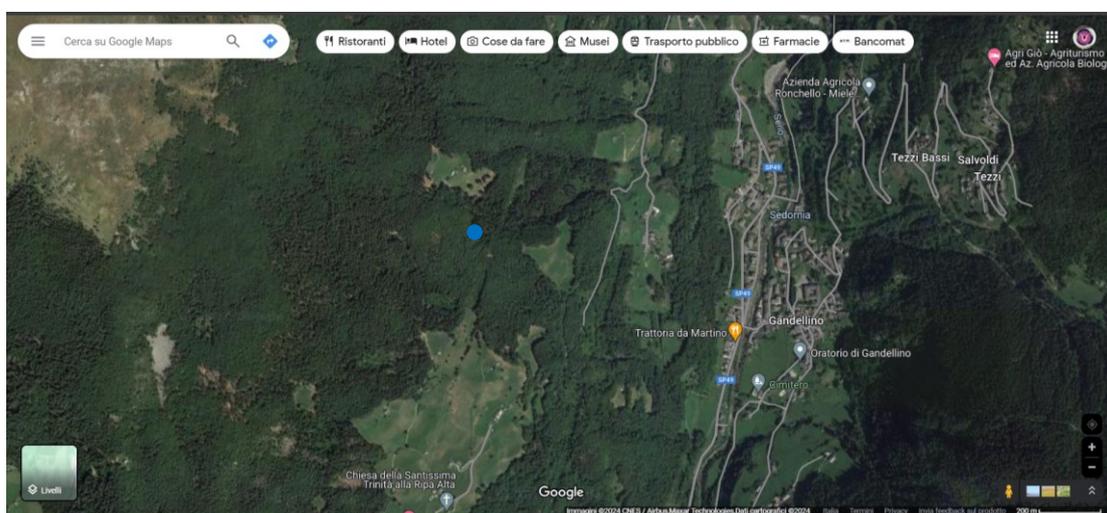


Figura 12 Microarea 2 nel comune di Gandellino (BG). Fonte: Google Maps

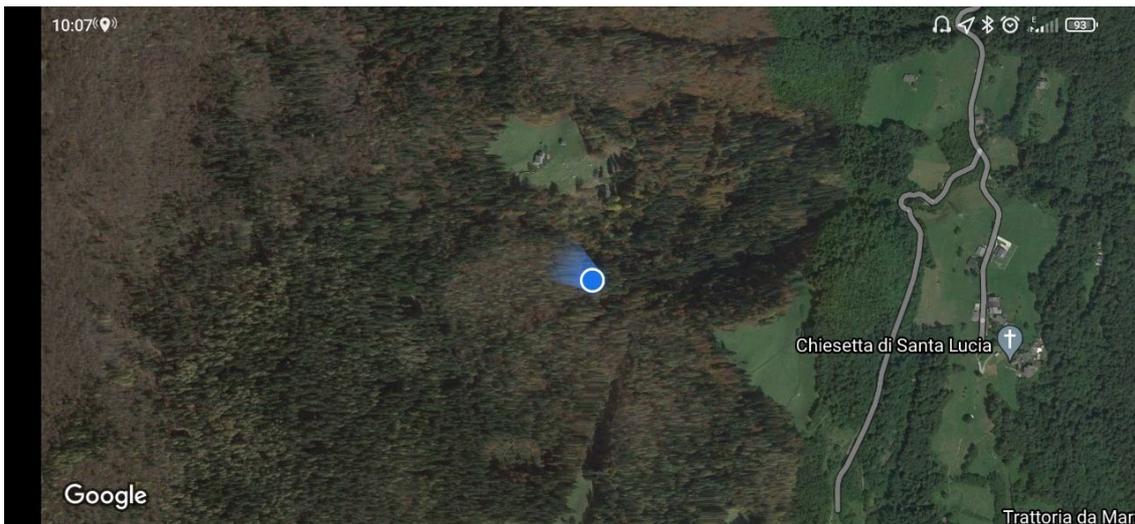


Figura 13 Microarea 2 nel comune di Gandellino (BG). Fonte: Google Maps

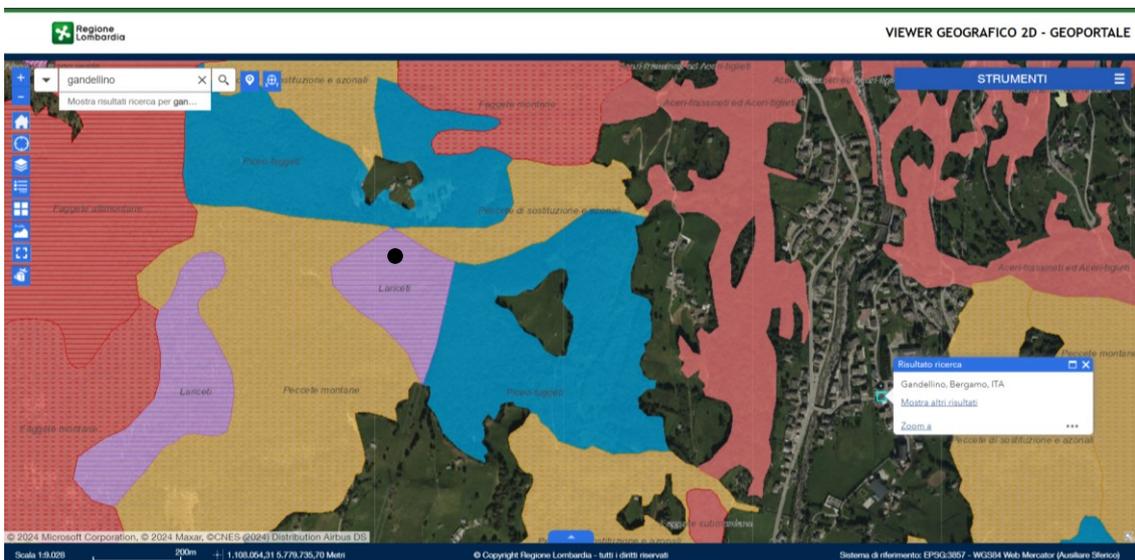


Figura 14 Carta Foresta a Gandellino (BG). Fonte: Geoportale della Lombardia.

Questa zona si trova a $45^{\circ}59'33.3''$ N e $9^{\circ}55'57.1''$ E, ad una altitudine di 1.140 m s.l.m. in direzione ovest.

Il periodo del campionamento è stato il 20 dicembre 2021.

2.1.3. Microarea 3, pecceta montana.

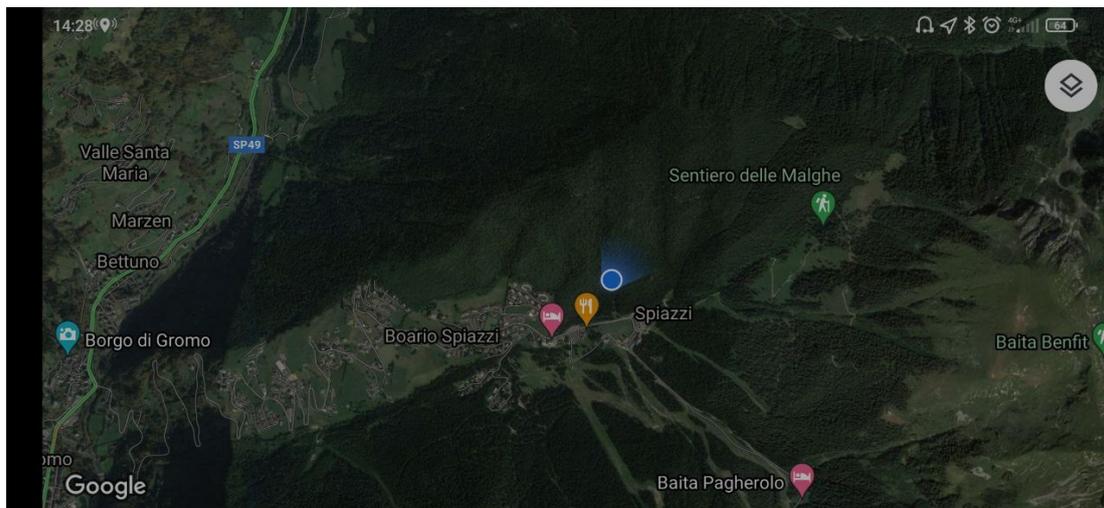


Figura 15 Microarea 3 in località Spiazzi di Gromo, frazione di Gromo (BG). Fonte: Google Maps.

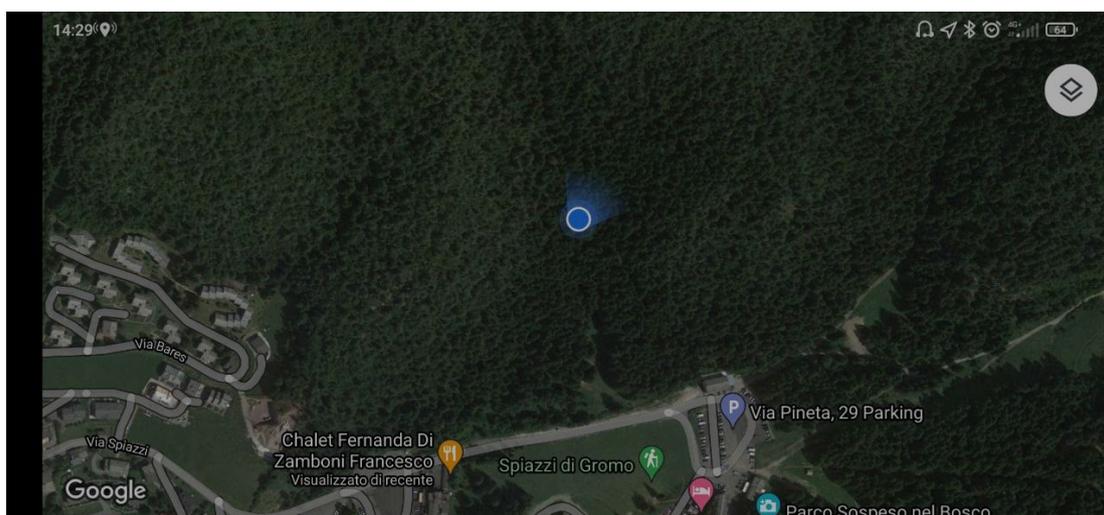


Figura 16 Microarea 3 in località Spiazzi di Gromo, frazione di Gromo (BG). Fonte: Google Maps.



Figura 17 Carta Forestale in Spiazzi di Gromo, frazione di Gromo (BG). Fonte: Geoportale della Lombardia.

La microarea 3, figura 15, si trova poco più a est della microarea 1, Figura 9, ($45^{\circ}58'4''N$ e $9^{\circ}57'54''E$) a Spiazzi di Gromo (BG), a una quota tra i 1.225 m e 1.250 m s.l.m. Come per la precedente microarea, il periodo di campionamento è stato il 21 dicembre 2021.

La lettiera si presentava molto spoglia e con la presenza di sassi e pezzi di rami di medie dimensioni.



Figura 18 lettiera nel bosco di peccete, a Spiazzi di Gromo, frazione di Gromo (BG). Fonte: Silvia Vite.

2.2. Caratteristiche delle specie studiate.

2.2.1. Faggeta.

Le faggete sono popolazioni dalla dominanza della specie *Fagus sylvatica*, appartenente alla famiglia *Fagaceae* e al genere *Fagus*, in cui troviamo altre sei specie arboree caducifoglie della zona temperata dell'Europa, dell'Asia e del Nordamerica. Nella porzione orientale dell'Europa appare la *F. sylvatica* subsp. *orientalis* che molti considerano come una specie a se stante.

Morfologia.

Il faggio è una pianta alta fino a 40 m con un diametro da 1,30 m fino a 2 m. Le radici sono ramificate e concentrate sotto la chioma.

Presenta una corteccia chiara, sottile e liscia. Se, in vecchiaia, la corteccia risulta screpolata, quella pianta appartiene alla variante *quercooides*.

Ha un portamento con forte variabilità individuale: il fusto è dritto e poco rastremato, oppure anche contorto o spiralato.

I rami orizzontali possono essere fastigiati o penduli. Le gemme sono lunghe fino a 2 cm. I rametti si differenziano in microblasti e macroblasti; quest'ultimi si allungano con caratteristico andamento a zig-zag.

Le foglie sono semplici, ovate o ellittiche, intere, ciliate o tomentose da giovani. Si possono distinguere in foglie "di luce" e "di ombra", a seconda della loro anatomia e fisiologia; permettono di creare un intenso ombreggiamento del terreno, associato alla stratificazione delle foglie, caratteristica del faggio.



100. *Fagus sylvatica* L. Rotbuche.

Figura 19 Fonte:
<https://gaiagames.de/arten/rotbuche/>

I fiori non sono evidenti e si trovano sui microblasti. Quelli maschili sono caratterizzati da infiorescenze pendule simili a capolini; invece quelli femminili sono eretti.

Il frutto (chiamato faggiola) è una noce a sezione triangolare, lunga 2,5 cm, contenuta in una cupola provvista di deboli spine. Il seme è oleoso tanto che nel passato era usato anche per estrarre l'olio.

Distribuzione.

L'areale della popolazione è distribuito in gran parte dell'Europa centro-occidentale, raggiungendo anche la Gran Bretagna, la Scandinavia, la Spagna, la Corsica, la Grecia e l'Italia.

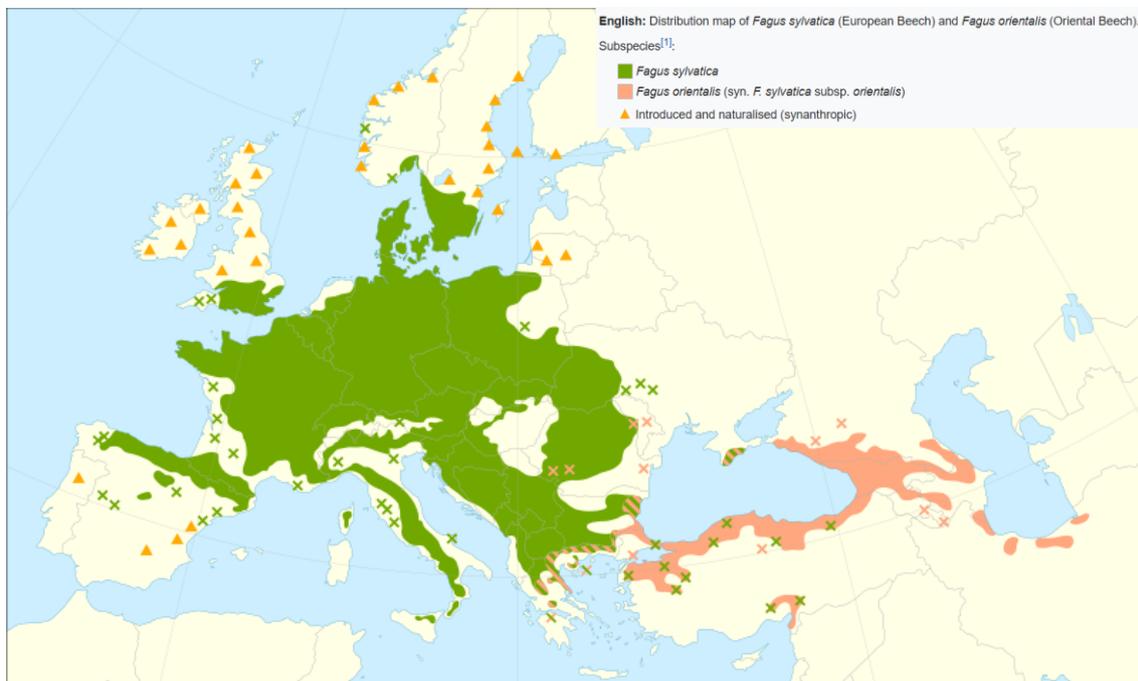


Figura 20 Caudullo, G., Welk, E., San-Miguel-Ayanz, J., 2017. Chorological maps for the main European woody species.

Da nord a sud il faggio si caratterizza sempre di più come specie montana. Nel versante meridionale delle Alpi e negli Appennini, i limiti altitudinali sono compresi fra i 600-900 m e 1700-1800 m. In località a clima particolarmente favorevole sono possibili discese fino ai 200 m.

Le faggete in Europa rappresentano circa 12 milioni di ettari di cui oltre 550 mila ettari in Italia (poco meno del 22%)¹⁴. La loro diffusione interessa tutti i rilievi con clima subatlantico. In Italia è presente: nel margine esterno delle Alpi, in tutto l'Appennino, nel versante settentrionale del Gargano e nella porzione superiore dei Monti Peloritani e dei Monti Nebrodi.

La composizione del sottobosco e l'articolazione in tipi delle faggete dipendono anche dalla loro posizione geografica, dalla quale deriva la distribuzione in faggete pannoniche, illiriche, medioeuropee, ecc. Molte delle faggete italiane fanno ancora parte delle faggete medioeuropee mentre quelle a sud dell'Abruzzo (a causa della loro impronta montano-mediterranea) comporrebbero il gruppo delle faggete meridionali.

Ecologia.

Il faggio necessita di oltre 700-800 mm di precipitazione annue e di almeno 110 giorni di temperature superiori ai 10 °C (in caso di ambienti oceanici per 150-180 giorni). Le gelate tardive precludono la presenza del faggio in tutti gli ambienti con climi continentali o endalpici.

L'ottimo edafico si verifica su suoli di qualsiasi substrato purché profondi, ricchi di mull e con un buono stato di aggregazione. I suoli acidi o aridi provocano la riduzione dello sviluppo e delle capacità di rinnovazione naturale. I ristagni d'acqua non sono tollerati. L'esposizione ha importanti riflessi sulla distribuzione e lo sviluppo, soprattutto nelle regioni più soggette all'aridità estiva.

Il faggio è una specie sciafila, a lento accrescimento giovanile, con culminazione tardiva dell'incremento della massa.

Reagisce bene ai diradamenti e la rinnovazione naturale è facilitata dalla comparsa di "tappeti" di semenzali.

La capacità di rigenerazione per ceppaia è limitata e poco durevole. La longevità è ritenuta di soli 250-350 anni perché il faggio è facilmente attaccabile da funghi con conseguente facilità di caduta dei rami o di troncatura dell'intera pianta.

¹⁴ Bernetti, *Atlante di selvicoltura*. 183

Propagazione.

Le annate di seme sono rare nel faggio: 5-6 ogni 20 anni. La dormienza è complessa a causa dell'imaturità dell'embrione.

Avversità.

Il faggio non ha malattie parassitarie gravi, ma viene facilmente attaccata da funghi (*Nectria ditissima*, *Gloeosporium fagi* e generi che colpiscono principalmente le latifoglie come *Coriolus*, *Phellinus*, *Ganoderma*, *Fomes* e *Polyporus*) e da alcune specie di insetti (*Tortrix viridiana* e *Lymantria dispar*.) e acari, principalmente defogliatori; tra gli insetti si ricorda la *Mikola fagi* che prova galle rosse e affusolate.

La fauna può danneggiare facilmente i semenzali germinanti; una volta brucati non hanno la capacità di rigenerarsi per polloni.

Le gelate tardive sono la principale causa di danni abiotici e possono verificarsi anche in climi ottimali per il faggio.

Le annate siccitose vengono superate con la caduta anticipata delle foglie, ma nei casi estremi non mancano piante morte. A causa della corteccia molto sottile, la pianta è soggetta a scottature da fuoco e da esposizione al sole.

2.2.2. Larice

Il larice europeo (*Larix decidua*) appartiene alla famiglia delle *Pinaceae*. Sono conifere decidue esclusive dell'Emisfero settentrionale con circa 10 specie tutte interfeconde.

È la conifera più importante delle Alpi, dopo l'abete rosso, dato dal suo ruolo di specie pioniera.

E' molto apprezzato per il legno che è molto resistente e durevole.

Morfologia.



Figura 21 Prof. Dr. Otto Wilhelm Thomé Flora von Deutschland, Österreich und der Schweiz, 1885, Gera, Germany.

I larici sono grandi alberi (raggiungono i 40 m di altezza e 1 m di diametro) con fusto eretto, ma molto rastremato e con la presenza, a volte, di curvature e biforcazioni indotte dalla reptazione della neve sul suolo o da troncatore da vento. Presenta una corteccia di grande spessore con profonde fessure. L'apparato radicale è robusto e profondo.

Il portamento del larice, e soprattutto la grandezza dei rami primari, dipendono dalla razza geografica. La chioma è leggera, poco coprente e con rami secondari sottili, flessibili e spesso penduli. È capace di emettere rami epicormici e, per questo, nelle alberature dei pascoli il larice è stato anche sottoposto a tagli a sgamollo.

Gli aghi si presentano raggruppati nei brachiblasti a ciuffetti di 20-40, di consistenza tenue e di colore verde chiaro, poi giallo vivo in autunno prima della caduta.

È una pianta monoica con fiori maschili, piccoli e gialli, e femminili, rossi e lunghi, separati. La fioritura avviene prima della fogliazione

I coni sono piccoli (2-4 cm) e maturano entro l'anno e persistenti per più anni con dispersione del seme molto progressiva.

Distribuzione.

Presente principalmente nelle Alpi, il larice si può trovare anche nelle colline vicino a Vienna, sui Carpazi e in stazioni isolate in Polonia.

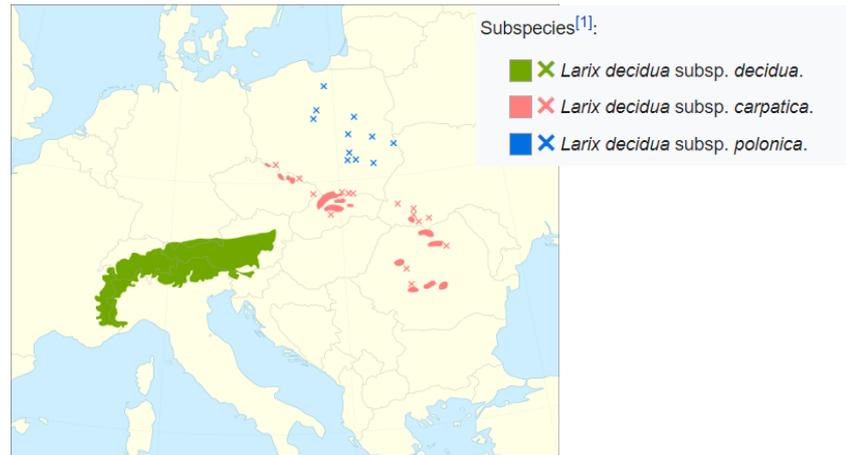


Figura 22 Caudullo, G., Welk, E., San-Miguel-Ayanz, J., 2017. Chorological maps for the main European woody species.

La frequenza di questa specie è stata facilitata dall'azione antropica che ha aperto vaste aree degradate, poi colonizzate dal larice. In ambienti endalpici il larice può essere presente fino a 2.200-2300 m s.l.m.

È diffuso in tutto il piano subalpino, più scarso nel piano montano; può tuttavia trovarsi in posizione di discesa fino a 700-800 m dove può colonizzare cedui degradati o castagneti abbandonati.

Ecologia.

Il larice sopporta temperature minori di $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$, con temperature medie fino a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

È una specie che esige molta acqua, ma elude la siccità tramite l'apparato radicale profondo.

È indifferente alla natura del substrato, pur essendo capace di sfruttare suoli sterili e superficiali, raggiunge le massime dimensioni su suoli bruni nel piano montano, dove viene facilmente sostituito dalle specie concorrenti. Però non tollera la sommersione delle radici e si rinnova facilmente su terreni minerali scoperti.

In merito alla lettiera del larice è importante evidenziare quanto segue: la lettiera è di difficile alterazione e non può essere impiegata per migliorare la struttura del suolo.

Il larice è una specie molto eliofila; per questo motivo resiste male alla concorrenza, in parte dovuta anche alla sua scarsa intensità di copertura. Può difendersi tramite il rapido accrescimento giovanile, l'allungamento dei rami e la longevità fino a oltre 500 anni.

Varietà.

Sono state individuate forti differenze genetiche fra le provenienze delle Alpi, dei Monti Tatra (tra la Slovacchia e la Polonia), dei Carpazi e della Polonia. Nell'ambito delle popolazioni delle Alpi, procedendo da quelle orientali verso quelle occidentali, si nota un progressivo peggioramento dei caratteri di regolarità del fusto e di resistenza al cancro.

Propagazione.

Nel caso del larice la propagazione non può avvenire per moltiplicazione vegetativa, ma l'innesto è possibile.

La produzione di seme è precoce e abbondante ogni 3-10 anni, secondo la quota.

Avversità.

Il parassita più importante è *Lachnellula willkommii* (*Dasichypha*), un agente patogeno del cancro del larice che si estrinseca in grosse deformazioni cave del fusto.

Altri parassiti importanti nei confronti del larice sono: *Ascocalix laricina*, *Coleophora laricella* e *Taeniothrips laricivorus*.

Inoltre il larice, essendo una pianta che cresce facilmente ad alte altitudini, può essere soggetta a fenomeni di sciabolature del tronco causate dalla neve (la pianta prende il nome di "larice traverso") e da gelate tardive.

I giovani larici possono essere soggetti, se piantati in popolazioni dense, a danni da vento o da gelicidio.

Selvicoltura

Il larice vive in popolamenti chiamati lariceti, suddivisi in più sottocategorie anche secondo il piano di vegetazione e la posizione in seno alle Alpi.

I boschi a base di larice e delle valli più interne vengono chiamati larici-cembreti, dall'associazione fitosociologica *Larici-Pinetum cembrae*. Il nome è usato anche per indicare tutto il piano di vegetazione subalpino endalpico. In questo raggruppamento possiamo trovare individui di larice insieme a pino cembro e abete rosso.

Una seconda categoria è quella delle popolazioni subalpine medioalpine ed esalpine e nel piano montano dove la diffusione dei boschi di larice risente del modo con cui il larice è stato mantenuto come alberatura di pascoli.

Inoltre il larice può convivere con i mirtilli e rododendro ferrugineo, chiamato lariceti su rodoreto-vaccinieto, a quote di tra i 1700-1800 m e su suoli podzolici superficiali.

Altre tipologie di lariceti sono quelli su pascolo e quelli a megafornie, due tipologie influenzate dall'umidità: i lariceti influenzati dallo scorrimento dell'acqua superficiale sono accompagnati dall'abete rosso (tipicamente subalpini); invece quelli in posizione di forra sono soggetti all'ingresso delle latifoglie (a volte chiamati anche lariceti su faggio).

2.2.3. Pecceta montana.

Sono popolamenti di abete rosso (*Picea abies*) a quote comprese fra 1.000 e 1.600 m.

L'abete rosso fa parte della famiglia delle *Pinaceae* in cui sono presenti circa 40 specie che vivono esclusivamente nell'Emisfero Boreale. La *Picea abies* è presente soprattutto in Europa insieme alla *Picea omorika* (picea della Serbia).

Questa specie è tra le più importanti del mondo, insieme alla specie della Serbia, per vastità dell'areale, per la densità della presenza nell'areale, per il commercio del legname e per l'ampio uso in arboricoltura da legno.

Morfologia.

È un albero alto fino a 60 m, con fusto dritto e poco rastremato. Ha un apparato radicale superficiale e una chioma ogivale o conica. La corteccia giovanile ha un colore rossastro con piccole squame membranacee, durante la crescita diventa grigia con squame rotonde. Gli aghi sono persistenti nei primi 8-10 anni, di colore verde non intenso, debolmente pungenti, spesso incurvati, lunghi 1,5-2,5 cm.



Figura 23 Franz Eugen Köhler, *Köhler's Medizinal-Pflanzen*, 1897

Il portamento dei rami si distingue in tre modi: risalente a spazzola, piatto, oppure pendulo. Quello dei rami secondari prevale nelle popolazioni di bassa quota.

I coni sono cilindrici, appuntiti all'apice, lunghi dai 10 fino ai 20 cm, il cui colore varia a seconda della specie: verde-gialli per le varietà *chlorocarpa* oppure rossastri per la v. *erythrocarpa*.

Distribuzione.

L'areale è divisibile in tre parti: tutta la Siberia fino al Pacifico; pianure della Polonia, della Russia e della Scandinavia; montagne dell'Europa fino alle Alpi.

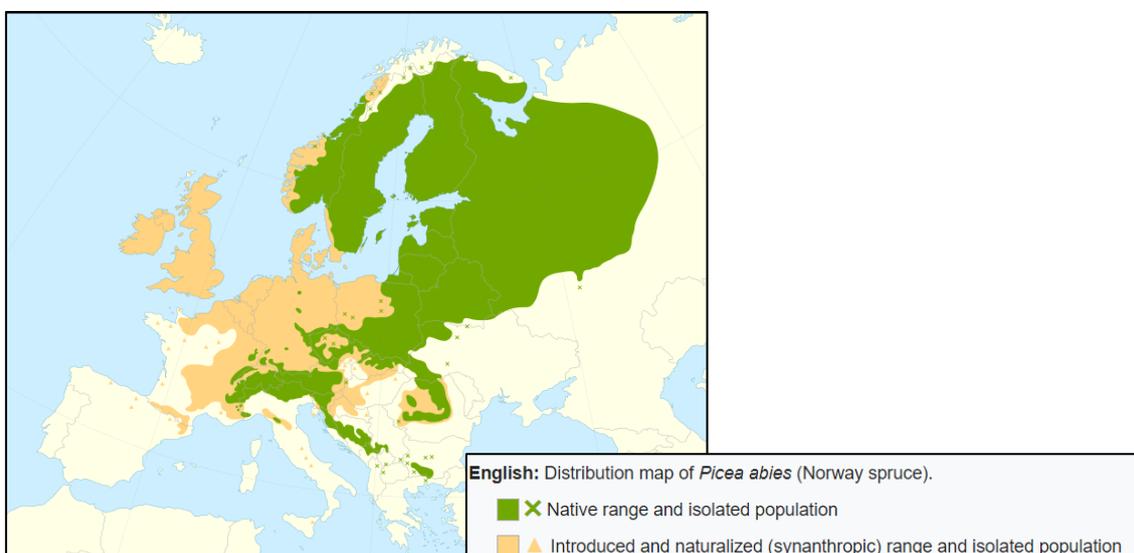


Figura 24 Caudullo, G., Welk, E., San-Miguel-Ayanz, J., 2017. Chorological maps for the main European woody species.

Sulle Alpi raggiungono quote fra 800-2.200 m s.l.m. anche se molto più rare nelle zone più occidentali.

Le peccete montane si distinguono a seconda della posizione (endalpica o esalpica) e delle condizioni del suolo in cui crescono: peccete montane neutrofile, peccete montane acidofile e peccete montane xeriche.

Le peccete montane neutrofile hanno un sottobosco con varie specie comuni alle faggete eutrofiche p. e. *Cardamine*, *Sanicula*, *Galium odoratum*. Formano popolamenti densi e coetaneiformi. È possibile trovare popolazioni disetanee a causa di azioni antropiche (applicando il sistema a fustaia a taglio saltuario); se invece la popolazione non venisse gestita. L'altezza media può superare i 30-35 m, l'incremento corrente di altezza culmina

precocemente (50-60 anni). I sintomi di senescenza si verificano già all'età di 120-150 anni. La rinnovazione naturale è teoricamente facile, ma è spesso impedita dalla concorrenza con l'abete bianco e il faggio. La stabilità della presenza dell'abete rosso varia secondo la posizione. È elevata nelle posizioni endalpiche. Nelle posizioni medioalpiche, le peccete montane sono molto diffuse e mostrano fertilità molto elevate, però tendono ad evolvere verso gli abeti-pecceti. Nelle posizioni esalpiche le peccete si possono evolvere facilmente in abeti-faggeti grazie alla presenza del faggio e dell'abete rosso.

Le peccete montane acidofile si trovano su suoli scadenti e superficiali. Possono essere considerate come una estensione extrazonale delle peccete subalpine con cui condividono il sottobosco. Sono stabili perché l'abete rosso si rinnova con facilità senza una eccessiva influenza delle specie concorrenti.

Le peccete montane xeriche hanno un sottobosco a gramineto di *Calamagrostis villosa* con orchidacee e con arbusti. Spesso rade, si sviluppano moderatamente e miste al pino silvestre.

Ecologia.

Nell'areale naturale l'abete rosso richiede un periodo vegetativo minimo di 70-80 giorni e temperature medie annue comprese fra 2° e 8°C. Sopporta temperature minime fino ai -36°C e sono poco soggette a danni da gelate primaverili. Invece è molto più sensibile al caldo, infatti subisce facilmente danni durante i periodi di siccità, anche a causa delle radici superficiali. I climi di tipo oceanico sono sfavorevoli, per le temperature estive troppo basse e per l'umidità che favorisce gli attacchi parassitari.

Cresce in condizioni ottimali su suoli ricchi di humus anche se si adatta a tutti i suoli compresi quelli molto acidi; riesce anche a vivere in contesti di suolo torbosi e palustri, ma con dimensioni ridotte. In condizioni difficili, ha una tipica tendenza a rinnovarsi per cespi.

È una specie mediamente sciafila: resiste alla copertura con periodi di attesa di 50-70 anni. Ha un discreto potere di concorrenza nei confronti del larice e del pino silvestre, anche se minori nei confronti dell'abete bianco e delle latifoglie.

Propagazione.

La forte variabilità genetica e morfologica nelle popolazioni ha permesso la selezione di molte cultivar propagate per innesto oppure per talea.

La variabilità genetica divenne importante per le piantagioni in alta montagna perché la specie è nettamente differenziata in ecotipi secondo l'altitudine.

La periodicità delle annate di seme variano a seconda dell'altitudine: da 2 anni a quote montane, fino ai 10 anni verso il limite delle vegetazioni arborea. La capacità germinativa varia a seconda della quota: in condizioni ottimali è tra il 70 e l'80%, invece risulta minore per le provenienze di alta quota.

L'abete rosso è anche capace di moltiplicazione vegetativa per propagazione da rami striscianti al suolo e per talea.

Selvicoltura.

La selvicoltura dell'abete rosso è strettamente legata al tipo di bosco: peccete montane, peccete di coltura e peccete subalpine.

È una specie impiegata per il rimboschimento per la facilità dell'allevamento in vivaio, per l'attecchimento e per il rapido accrescimento giovanile.

Inoltre viene impiegato per interrompere il manto nevoso che potrebbe causare delle valanghe, grazie al suo adattamento a crescere in cespi; però non è sufficientemente robusto per arginare una valanga in atto, venendone travolto.

Avversità.

A causa delle radici molto superficiali, è un albero che cede facilmente a tutte i fattori che provocano lo sradicamento, soprattutto se il suolo è bagnato. Inoltre, a causa di questa condizione, è facilmente attaccato alle radici dai parassiti, dove possono essere presenti ferite localizzate in zone in cui la radice esce dal terreno e quindi più soggetta a traumi.

Fra gli insetti citiamo velocemente varie specie di scolitidi fra cui *Ips typographus* e *Cryphalus piceae* si rivela essere il più dannoso. Alcune specie del genere *Pissodes* fanno anche loro gallerie nel tronco. Invece la *Cephalcia arvensis* provoca importanti defogliazioni, insieme alla *Epinotia tedella*.

Tra gli altri patogeni, che provocano danni minori, troviamo alcune specie di afidi come *Elatobium abietinum* e *Sacchiphantes abietsi*.

Tra i funghi invece troviamo come patogeni importanti l'*Heterobasidion annosum*, il quale colpisce soprattutto le radici dell'abete rosso, e l'*Herpotrichia juniperi*, che invece colpisce principalmente le talee.

3. Materiali e metodi.

3.1. Preparazione dei campioni.

I campioni sono stati prelevati, collocati in sacchetti di plastica alimentari, etichettati e chiusi accuratamente per impedire possibili fuoriuscite di materiale e per preservarne l'umidità. Raggiunto il laboratorio della sezione di Fisiologia delle Piante e Chimica Agraria, nella sede della Facoltà di Scienze Agrarie e Alimentari a Milano, i campioni sono stati essiccati all'aria aperta ponendoli su tre superfici pulite, nel mentre si è effettuata una iniziale pulitura dei campioni, togliendo la presenza di sassolini e pigne e altri materiali non utili ai fini dell'analisi. Dopo qualche giorno, i campioni sono stati macinati, impiegando un cilindretto di acciaio al cui interno è stato posto una porzione del campione e una sferetta d'acciaio, per 2 minuti a 25 oscillazioni al secondo, e successivamente sono stati ridotti attraverso il metodo dei quarti.

Alla fine, si sono prelevati per ogni lettiera tre campioni casuali per l'analisi respirometrica e due campioni casuali per le altre analisi chimiche e biologiche.

I vari campioni sono stati etichetti nei rispettivi metodi:

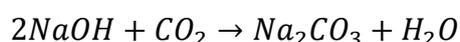
- F per faggeta seguito da un numero dal 1 a 3
- L per larice seguito da un numero dal 1 a 3
- P per pecceta seguito da un numero dal 1 a 3

3.2. Analisi effettuate sulla lettiera

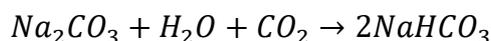
3.2.1. Allestimento e monitoraggio della respirazione

Come prima analisi è stato allestito il monitoraggio dell'attività respirometrica dei microrganismi presenti nelle varie lettiera, impiegando il metodo trimetrico (ISO 16072:2002), determinando la concentrazione della CO₂ prodotta mediante la reazione di carbonatazione con idrossido di sodio (NaOH) in un sistema statico chiuso.

La CO₂ reagisce con la NaOH producendo carbonato di sodio (Na₂CO₃), facendo crescere il pH della soluzione a 11,0.



Lo stesso carbonato di sodio reagisce con l'anidride carbonica producendo bicarbonato di sodio (NaHCO₃), facendo diminuire il pH a 7,5 – 8.



Dalle reazioni precedenti si evince che una mole di CO₂ viene neutralizzata da una mole di NaOH.

La soluzione risulterà incolore e trasparente.

3.2.1.1. Preparazione dell'unità sperimentali.

Sono stati impiegati nove contenitori ermetici trasparenti (unità sperimentale), barattoli con la chiusura incorporata, puliti accuratamente, contrassegnati con la data dell'inizio dell'analisi ed il campione, insieme ad altri tre contenitori senza suolo, sono stati impiegati per il "bianco" (questi saranno contrassegnati con il simbolo Ø e seguito da un numero dal 1 a 3). Questi ultimi serviranno per togliere dal calcolo la presenza di anidride carbonica già presente nell'atmosfera.

Successivamente sono stati posti circa 3 g di lettiera in ciascun contenitore (tranne i bianchi) effettuando pesate accurate. Al termine, è stata umidificata la lettiera impiegando acqua distillata, evitando accuratamente di lasciare acqua libera all'interno e ripesato l'unità sperimentale. Accanto alla lettiera è stato posto un becker da 50 ml, al cui interno sono stati versati 20 ml di NaOH alla concentrazione 1 N, prestando attenzione di non posarlo sopra la lettiera.

Per i bianchi sono stati introdotti all'interno dei contenitori solo il becker con 20 ml di NaOH.

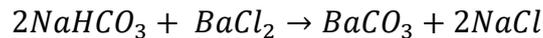
Tutti i contenitori sono stati chiusi accuratamente e riposti in un mobile al chiuso e al buio.

3.2.1.2. Determinazione della CO₂ prodotta tramite titolazione con acido cloridrico 1 N.

Con il passare del tempo i microrganismi presenti nella lettiera produrranno CO₂ che sarà catturata dall'idrossido di sodio presente all'interno dell'unità sperimentale, ma non a sufficienza da consumarlo del tutto.

Trascorso qualche giorno si andrà a determinare la concentrazione di idrossido di sodio presente nella soluzione e a stimare indirettamente quella di anidride carbonica prodotta dalla lettiera attraverso la titolazione con acido cloridrico 1 N.

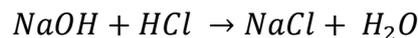
Prima della titolazione si prepara la soluzione di NaOH, NaHCO₃ e Na₂CO₃ aggiungendo 2 ml di cloruro di bario (0,75 M) per interrompere la reazione di carbonatazione, ottenendo carbonato di bario (BaCO₃) e cloruro di sodio.



Il carbonato di bario è insolubile e forma un precipitato bianco che si deposita sul fondo del becker.

A questo punto la soluzione risulterà bianca e opaca, colorazione che crea un problema per la titolazione. Per questo si aggiunge qualche goccia d'indicatore di pH, fenolftaleina (C₂₀H₁₄O₄), che produce il cambiamento del colore della soluzione da bianco a rosa/fucsia.

Tenendo la soluzione in movimento, utilizzando un'ancora magnetica all'interno del becker, si fa sgocciolare l'acido cloridrico dalla beuta all'interno della soluzione fino a che non si raggiunge il punto di equivalenza, con la variazione di colore della soluzione da rosa/fucsia a bianco.



Determinando il volume di acido cloridrico impiegato per titolazione, è possibile determinare il tasso di respirazione, utilizzando la formula sotto riportata (ISO 16072:2002).

$$R_{CO_2} = \frac{2,2(\bar{V}_b - \bar{V}_p)}{24 \cdot m_{sm} \cdot w_{sd}}$$

Dove:

- R_{CO_2} = tasso di evoluzione dell'anidride carbonica sulla base della massa del suolo secco [$mgCO_2 \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$]
- \bar{V}_b = volume medio di acido cloridrico consumato nel bianco [ml]
- \bar{V}_p = volume medio di acido cloridrico consumato nei campioni [ml]

- m_{sm} = massa del campione di terreno umido [g]
- 2,2 = coefficiente di conversione molare di HCl e CO₂ [$mgCO_2 \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$]
- 24 = fattore di conversione dei giorni in ore [$h \cdot day^{-1}$]
- w_{sd} = frazione di massa secca del suolo umido

3.2.2. pH

Per determinare l'acidità dei campioni, si preleva per ogni lettiera 1 g di campioni e si aggiungono 10 ml di acqua distillata, con un rapporto di estrazione di 1:10, all'interno di un tubo falcon di 15 ml e si esegue la miscelazione attraverso agitatore meccanico per 15 minuti e fatti riposare i campioni per 30 minuti.

Successivamente è stato misurato il pH tramite pHmetro.

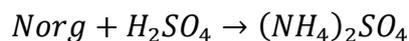
3.2.3. Determinazione dell'azoto totale

La determinazione dell'azoto nel terreno presenta diverse difficoltà, date dalla presenza di diverse forme di azoto, organico ed inorganico. Per questo è stato adoperato il metodo Kjeldahl (1883) che si basa sul procedimento di ossidazione per via umida. Questo metodo permette di determinare sia l'azoto organico che quello inorganico.

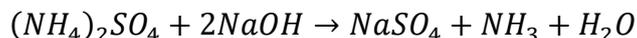
Il principale problema di questo metodo consiste nell'impossibilità di determinare direttamente l'azoto organico, ma ricavabile indirettamente dall'azoto totale e dall'azoto inorganico. Inoltre, questo metodo non permette la determinazione dell'azoto sotto forma di nitriti (NO_2^-) e/o nitrati (NO_3^-), il cui ammontare nel bilancio è relativamente influente perché sono facilmente lisciviati nel terreno e/o assimilati dalle piante.

Il metodo Kjeldahl prevede la conversione dell'azoto organico in azoto ammoniacale mediante la mineralizzazione impiegando acido solforico. Questo passaggio simula i processi di proteolisi e ammonificazione che avvengono naturalmente.

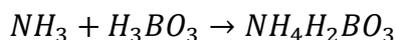
Per ogni lettiera è stato impostato una doppia analisi e raccolti circa 0,5 g di campione posto in tubi per la mineralizzazione (Kjeldahl), insieme a due catalizzatori – ossido di selenio (SeO_3) e ossido rameico, (CuO) – a cui sono stati aggiunti 20 ml di acido solforico concentrato (H_2SO_4) a caldo, fino al raggiungimento della variazione di colore verde della soluzione, a cui corrisponderà la completa mineralizzazione del carbonio e la formazione di solfato di ammonio ($(NH_4)_2SO_4$).



Completata la mineralizzazione del carbonio, la soluzione è stata alcalinizzata aggiungendo idrossido di sodio (NaOH), per ottenere l'ammoniaca (essendo un composto volatile è perciò distillabile).

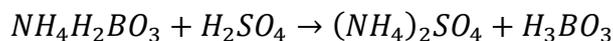


Successivamente la soluzione viene distillata con 10 ml di soluzione satura di acido bórico (H_3BO_3) e con qualche goccia di rossometile e verde bromocresolo ciascuno, ottenendo il borato idrogenato di ammonio ($NH_4H_2BO_3$).



Il termine della distillazione si raggiunge quando la soluzione di acido bórico cesserà di essere basica.

Infine, per determinare la quantità di azoto presente, si titolerà la soluzione con acido solforico (H_2SO_4) 0,1 N, per determinare la concentrazione di azoto (ammoniacale) presente secondo questa reazione.



Il calcolo dell'azoto [g/kg] è stato effettuato secondo la seguente formula:

$$N = \frac{V_c \times N \times 14}{P_c}$$

Dove:

- V_c = ml di H_2SO_4 utilizzati per la titolazione
- N = normalità della H_2SO_4 utilizzata per la titolazione
- 14 = massa equivalente dell'azoto (14 g/mol : 1 eq/mol)
- P_c = peso del campione [g]

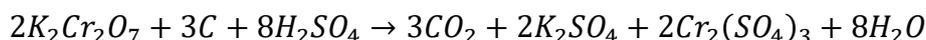
3.2.4. Determinazione del carbonio organico totale (TOC).

Per la determinazione del carbonio organico totale presente nelle lettiere si è utilizzato il metodo Walkley-Black che impiega l'ossidazione umida per autoriscaldamento.

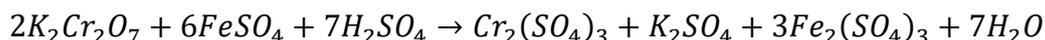
Nella determinazione del carbonio organico totale, si riscontra la principale difficoltà nel separare la componente inorganica da quella organica. Nel metodo per ossidazione chimica questo problema non sussiste, perché la componente inorganica viene rimossa attraverso il calore (circa 160 °C) e il trattamento con acido (principalmente HCl, H₂SO₄, H₃PO₄). Inoltre, il riscaldamento porta ad una accelerazione nei tempi di reazione e permette l'utilizzo di attrezzature standard. Il principale limite di questa metodologia è che solo una frazione della componente organica è ossidata. Pertanto, si sono studiati degli opportuni coefficienti di correzione, legati alla tipologia della sostanza organica adoperata (nel caso della lettiera risulta 0,318).

Per ogni lettiera sono stati prelevati due campioni di circa 0,02-0,03 g in una beuta a cui sono stati aggiunti 5 ml di bicromato di potassio (K₂Cr₂O₇) 0,2 N, per ossidare il carbonio.

Successivamente, impiegando un cilindro graduato, sono stati aggiunti 20 ml di acido solforico (H₂SO₄). Il tutto è posto a 160 °C per 10 minuti; si sono riportare i campioni a temperature inferiori, impiegando un bagno freddo.



Per determinare la concentrazione di carbonio ossidato, si titola il bicromato di potassio in eccesso con una soluzione di ferro solfato (FeSO₄) 0,1 N e 4 ml di acido solforico (H₂SO₄) aggiungendo poche gocce di indicatore (ferroina).



Per determinare il valore di carbonio organico totale [g/kg] è stata applicata la formula sotto riportata:

$$C = \frac{(v_b - v_c) \cdot N \cdot 3,18}{p_c}$$

Dove:

- v_b = volume di FeSO₄ [ml] utilizzato per titolare il bianco
- v_c = volume di FeSO₄ [ml] utilizzato per titolare il campione
- N = normalità reale della soluzione di FeSO₄, ottenuto mediante il calcolo della reazione = $\frac{ml \text{ bicromato}}{v_b} \cdot 2$

- p_c = peso del campione [g]
- 3,18 = fattore di conversione

3.2.5. Determinazione della composizione della sostanza organica.

La composizione della sostanza organica è estremamente eterogenea ed è suddivisa in due costituenti: sostanza organica, di origine animale e vegetale in diverse fasi di decomposizione, e sostanze umiche, derivanti dai lenti processi di formazione delle sostanze da parte degli organismi presenti nel suolo. L'origine di queste ultime è di difficile individuazione: dipendono dai residui di resti di animali o parti di piante che sono stati degradati e trasformati nel tempo. Di conseguenza sono state suddivise in sostanza organica solubile (DOM, dissolved organic matter) e sostanza organica recalcitrante (ROM, refractory organic matter). Queste due frazioni della sostanza organica presente non fanno parte della frazione umica sopracitata.

Nella DOM fanno parte tutte quelle sostanze organiche che sono facilmente impiegate dai microrganismi e possono essere dilavate dalle piogge, per cui si trovano, generalmente, in basse concentrazioni. Ne fanno parte molecole semplici e basso peso molecolare.

Nella ROM, invece, troviamo quelle molecole complesse e fortemente idrofobiche, per cui non dilavabili, e ad alto peso molecolare (per esempio cellulosa e lignina).

Per estrarre queste sostanze si impiegano solventi organici ed inorganici:

- solventi organici estraggono: grassi, cere, resine, tannini catecolici e proteine
- solvente inorganici:
 - l'acqua estrae: emicellulose idrosolubili, tannini idrolizzabili e altre sostanze idrosolubili.
 - Acido solforico al 5% estrae emicellulose e parti delle proteine
 - Acido solforico al 72% estrae la cellulosa

Le sostanze ligno-umiche vengono determinate indirettamente: si determinano le ceneri (550 °C) dal residuo dell'estrazione della cellulosa. Nel caso in cui si facciano due analisi per campione, si impiega la media dei risultati ottenuti.

La differenza percentuale costituisce la frazione di sostanza ligno-umiche presenti nel campione, utilizzando la formula sottostante:

$$Ceneri = \frac{\frac{\frac{\overline{P_{cf}} \cdot A}{\overline{P_{ci}}} \cdot B}{C} \cdot D}{E}}{F}$$

Dove:

- $\overline{P_{cf}}$ = media del peso finale dei campioni delle ceneri [g]
- $\overline{P_{ci}}$ = media del peso iniziale dei campioni delle ceneri [g]
- A = media del peso dei campioni dopo l'estrazione del 72% [g]
- B = media del peso dei campioni dopo l'estrazione del 5% [g]
- C = media del peso dei campioni prima dell'estrazione del 5% [g]
- D = media del peso dei campioni dopo l'estrazione delle sostanze solubili [g]
- E = media del peso dei campioni prima dell'estrazione del 5% [g]
- F = media del peso dei campioni prima dell'estrazione delle sostanze solubili [g]

3.2.5.1. Prima estrazione: sostanze solubili in solvente organici.

Con questa prima estrazione si sono determinati grassi, cere, resine, tannini catecolici e parte delle proteine attraverso l'impiego di solventi organici (alcool etilico al 96% e miscela di alcool etilico-esano 1:2 v/v).

Questa analisi prevede tre estrazioni consecutive impiegando, per due, l'apparecchiatura soxhlet e, nella terza, un becker.

In un ditale (33 x 118 mm) sono stati introdotti circa 3-4 grammi di campione, essiccato a 105 °C e macinato a 2 mm. Il campione è introdotto nella camera d'estrazione del soxhlet e si procede all'estrazione con 300 ml di alcool etilico-esano riscaldato fino ai 90 °C. L'estrazione si considera terminata quando il solvente resta incolore. Nel nostro caso sono stati necessarie circa sette ore e mezza. Successivamente il ditale è lasciato ad asciugare tutta la notte.

Il giorno successivo si procede all'estrazione con alcool etilico utilizzando la stessa procedura. Alla conclusione dell'estrazione con i solventi organici si lascia ad asciugare il ditale.

L'estrazione con acqua distillata avviene in un becker a temperatura ambiente. Il ditale è essiccato in stufa ed è determinato il peso del ditale e del campione insieme.

3.2.5.2. Seconda estrazione delle sostanze solubili in acido solforico al 5%.

L'estrazione avviene sul campione ottenuto dall'estrazione delle sostanze solubili, previa essiccazione in stufa.

L'estrazione avviene in un pallone da 250 ml in cui sono introdotti circa 2-3 grammi di campione e 150 ml di H₂SO₄ al 5%. Si collega al pallone un refrigerante e si pone tutta la vetreria su una piastra riscaldante. Si porta il solvente in ebollizione e si estrae trascorse due ore.

Finita l'estrazione, si lascia raffreddare il pallone e si filtrano il campione e il solvente su un setto poroso G1 (precedentemente tarato) e si lava il tutto con acqua distillata. Successivamente si essicca il tutto a 105 °C e si pesa.

La differenza di peso rappresenta la quantità di emicellulose e parte delle proteine presenti nei campioni.

3.2.5.3. Terza estrazione, a freddo, della cellulosa in acido solforico al 72%.

In una beuta da 250 ml sono introdotti 1-2 grammi di campione proveniente dalla precedente idrolisi e 100 ml di H₂SO₄ al 72%. La beuta è posta in contenitore con ghiaccio per abbassare la temperatura a 4 °C per 24 ore.

A fine estrazione, la soluzione si diluisce con 150 ml di acqua distillata e si filtra su filtro a setto poroso G3 (precedentemente tarato), lavando con acqua distillata. Il filtro si secca in stufa a 105 °C e si pesa il tutto.

La differenza di peso rappresenta la quantità di cellulosa presente nel campione.

3.2.6. Determinazione delle ceneri.

La determinazione del contenuto di ceneri si basa sulla quantità (in peso) della materia inorganica rimasta dopo la completa combustione della sostanza organica presente nel campione.

Questa analisi è utilizzata per determinare il contenuto di materiale inorganico non combustibile presente nel campione.

L'analisi prevede il riscaldamento del campione ad alte temperature (350 °C) in stufa per 4 ore.

Per ogni campione sono state eseguite: una misurazione sulle lettieri pure e due misurazioni sui campioni di lettiera dopo l'analisi per la determinazione della composizione della sostanza organica. Questo procedimento è necessario per aver un risultato più rappresentativo del campione.

Per determinare la composizione delle ceneri [%] sulla lettiera pura è stata applicata la seguente formula:

$$Ceneri = \frac{\frac{\frac{P_{cf} \cdot A}{P_{ci}} \cdot B}{C} \cdot D}{E} \cdot F$$

Dove:

- P_{cf} = Peso finale del campione delle ceneri [g]
- P_{ci} = Peso iniziale del campione delle ceneri [g]
- A = media del peso dei campioni dopo l'estrazione del 72% [g]
- B = media del peso dei campioni dopo l'estrazione del 5% [g]
- C = media del peso dei campioni prima dell'estrazione del 5% [g]
- D = media del peso dei campioni dopo l'estrazione delle sostanze solubili [g]
- E = media del peso dei campioni prima dell'estrazione del 5% [g]
- F = media del peso dei campioni prima dell'estrazione delle sostanze solubili [g]

3.2.7. Determinazione della struttura chimica per mezzo della spettroscopia DRIFT.

La spettroscopia infrarossa (IR) in riflessione diffusa (*Diffuse Reflectance Infrared Fourier-Transform Spectroscopy* – DRIFTS) misura l'entità della radiazione riflessa dalle molecole che compongono la lettiera.

La riflessione diffusa si verifica quando il campione presenta una superficie irregolare e, quando il campione è colpito, i fasci infrarossi formano angoli diversi rispetto al piano orizzontale. A causa di questa riflessione ad angoli diversi, il fascio di radiazione infrarossa forma angoli di incidenza diversi per ogni superficie incontrata e quindi il

fascio è diffuso in molte componenti con intensità minore rispetto a quella che si dovrebbe ottenere nel caso di una riflessione speculare pura.

La DRIFTS è un buon metodo di campionamento per polveri, materiale cristallino nel medio e vicino infrarosso e per campioni solidi non trattabili, perché evita la compressione del campione. Con questa tecnica possono essere analizzati i campioni sia organici che inorganici che possono essere ridotti in polvere sottile (meno di 10 μm), come polveri morbide e miscele di polvere e polimeri.

Questo fenomeno è trascurabile quando si hanno campioni che assorbono e trasmettono la maggior parte della radiazione oppure ad elevata componente di riflessione speculare.

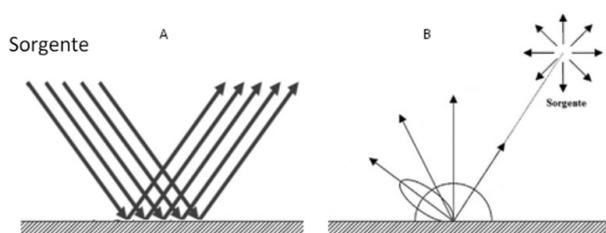


Figura 25 fenomeni di riflessione: a) riflessione speculare, b) riflessione diffusa

La DRIFTS utilizza accessori con sistemi di specchi diversi rispetto ad altri modelli di spettroscopia. Il macchinario è costituito: dalla sorgente del fascio infrarosso, dallo specchio parabolico, da altri specchi per la direzione dei fasci infrarossi, portacampione e rivelatore.

Lo specchio parabolico e gli altri specchi direzionabili servono per far convergere i fasci infrarossi verso il portacampione e verso il rivelatore.

Il campione è macinato finemente e analizzato direttamente con l'utilizzo di una punta di diamante.

L'impiego di una punta di diamante serve per migliorare la riflessione del fascio di luce infrarossa e quindi la sensibilità dello strumento.

Lo spettro IR riporta l'assorbanza (A) in funzione della lunghezza d'onda (cm^{-1}) ed è suddiviso in due zone: la zona dei gruppi funzionali ($4000\text{-}1250\text{ cm}^{-1}$) e la zona dei finger print ($1250\text{-}500\text{ cm}^{-1}$). Nella prima zona i picchi sono dovuti ai gruppi funzionali presenti

all'interno delle molecole.¹⁵ Nella seconda zona i segnali sono tipici e caratteristici della molecola. Quindi, ciascuna molecola ha un suo spettro caratteristico ed è possibile ottenere informazioni strutturali in quanto gli assorbimenti di ciascun tipo di legame si trovano solo in certe regioni spettrali, numeri d'onda caratteristici per ciascuna classe di gruppi funzionali.¹⁶

3.2.8. Determinazione della struttura chimica per mezzo spettrometria ¹³C Cross Polarizationagic Angle Spinning Nuclear Magnetic Resonance - ¹³C CPMAS NMR.

La spettroscopia di risonanza magnetica nucleare (NMR) si basa sull'assorbimento dell'energia dell'intervallo delle radiofrequenze dei nuclei atomici il cui momento angolare (anche chiamato spin "I") è diverso da zero, quando sono sottoposti ad un campo magnetico statico.

Per avere un risultato ad alta risoluzione su un campione solido si sono aggiunte all'analisi spettroscopica NMR al ¹³C le tecniche combinate della *Cross Polarization* (CP) e della *Magic Angle Spinning* (MAS). Quest'analisi permette di avere dei picchi più definiti e, di conseguenza, di poter determinare meglio i gruppi funzionali presenti nei campioni.

I campioni sono stati analizzati puri in rotore di zirconio di diametro pari a 4 mm. Per l'acquisizione degli spettri è stato utilizzato uno spettrometro Bruker 600 MHz AMX operante con una frequenza di risonanza di 10 MHz. Le condizioni di lavoro utilizzate sono state le seguenti: numero di scansioni 3200, tempo di contatto 1 ms, tempo di riciclo 0.5 s. Il *chemical shift* è stato determinato con riferimento al tetrametilsilano ($\delta = 0$ ppm).

Gli spettri ottenuti sono stati elaborati per mezzo del software TOPSPIN 1.3 Bruker e suddivisi, prima dell'integrazione, nelle seguenti regioni:

- Da 0 a 47 ppm: regione del carbonio alifatico "*short chain*" e "*long chain*", lipidi, cutina, suberina, proteine, biopolimeri alifatici.

¹⁵ Spettroscopia FT-IR (approfondimento); Laboratorio di ingegneria chimica e dei materiali, Sapienza

¹⁶ Spettroscopia FT-IR (approfondimento); Laboratorio di ingegneria chimica e dei materiali, Sapienza

- Da 50 a 115 ppm: regione del carbonio O – alchilico (eteri, alcoli, acetali) e carboidrati (amido e cellulosa).
- Da 115 a 160 ppm: regione del carbonio aromatico (lignina, fenoli e tannini)
- Da 160 a 210 ppm: regione del carbonio carbonilico (aldeidi e chetoni), carbossilico e ammidico.

4. Risultati e Discussione

4.1. Determinazione del pH

Nella Tabella 1 vengono riportati i valori medi di pH delle tre lettiere in oggetto di studio.

	pH
Larice	4,78±0,04
Pecceta	5,25±0,03
Faggeta	5,41±0,04

Tabella 1 valori medi del pH sulle lettiere

Dalla tabella soprastante si può osservare che i tre campioni sono acidi. Questo risultato è in linea con la tipologia di campioni analizzati. Essendo le lettiere composte elevata quantità di sostanza organica in fase iniziale di decomposizione, l'acidità è dovuta dalla presenza di acidi organici, intermedi della degradazione biologica. Il destino ultimi di questi composti sarà quello di evolversi a CO₂ tuttavia il fatto che le lettiere siano ancora in fase di degradazione fa sì che tendano ad accumularsi.

4.2. Determinazione dell'azoto totale, del carbonio organico totale e calcolo del rapporto C/N.

Nella Tabella 2 vengono riportati, per i vari tre campioni, i valori medi di azoto totale [g/kg], TOC [g/kg] (carbonio organico totale), il rapporto carbonio e azoto e le ceneri, determinati attraverso metodi analitici riportati nel capitolo precedente (3.2.3., 3.2.4. 3.2.5. e 3.2.6.).

	Azoto Totale [g/kg]	TOC [g/kg]	C/N	Ceneri iniziali [%]
Larice	10,24±1,25	38,95±4,75	38,60±9,36	1,41
Pecceta	11,73±0,06	43,35±0,82	36,95±0,50	3,13
Faggeta	14,00±0,39	41,20±4,12	29,41±2,13	2,24

Tabella 2 valori medi dell'azoto totale, TOC, C/N e il valore medio delle ceneri delle lettiere

I valori riportati in Tabella 2 mettono in evidenza una certa differenza tra le diverse lettiere. La Faggeta presenta il contenuto più elevato di azoto e, di conseguenza, anche il suo rapporto C/N risulta essere inferiore rispetto agli altri due campioni considerati. Si

valuterà di seguito, attraverso la prova di respirazione, se tale risultato potrà avere delle conseguenze anche sul suo tasso di degradabilità. Larice e Pecceta, diversamente, sono più simili tra loro. Ciò si potrebbe attribuire, con ogni probabilità, al fatto che trattasi di specie arboree appartenenti alla stessa famiglia (*Pinaceae*). Andando a confrontare tra loro i dati, si rileva un'ottima correlazione tra il contenuto di carbonio e quello delle ceneri ($R^2 = 0,9989$), così come atteso, per tutti i campioni.

Nella Tabella 3 sono stati riportati i valori medi delle lettieri, in percentuale, della composizione della sostanza organica e la somma di tali valori.

Il frazionamento è determinato dalla solubilità delle sostanze organiche con i solventi adoperati (si veda il capitolo 3.2.5. Determinazione della composizione della sostanza organica).

Solvente	Sostanze estratte	Larice [%]	Pecceta [%]	Faggeta [%]
Solventi Organici	Grassi, cere, resine, tannini catecolici, proteine	18,34	14,03	17,73
H₂SO₄ 5%	Emicellulose idrosolubili e non, tannini idrolizzabili ed altre sostanze solubili, parte delle proteine	30,51	26,56	30,07
H₂SO₄ 72%	Cellulosa	6,63	6,38	6,09
Determinazione per via indiretta	Sostanza Ligno-Umica	40,04	45,22	41,87
Sommatoria		96,93	95,31	98,00

Tabella 3 Valori medi del frazionamento della sostanza organica nelle tre lettieri

Dai dati riportati in Tabella 3 si evincono dati interessanti circa la composizione macromolecolare della componente organica delle lettieri. In particolare si nota come la frazione solubile in solventi organici sia piuttosto diversa e inferiore per il campione di Pecceta. Stranamente, si rileva una certa somiglianza tra Pecceta e Faggeta che si ripete anche nella frazione dominata dall'emicellulosa. I valori di celluloso sono molto simili tra i tre campioni e, infine, la frazione più recalcitrante, quella ligno-umica, risulterebbe

più abbondante nel campione di Pecceta. Questi dati sarà da valutare se trovano una conferma con le indagini spettroscopiche.

4.3. Caratteristiche spettroscopiche dei campioni attraverso l'analisi ^{13}C CPMAS-NMR e DRIFT.

Sono di seguito riportati gli spettri dei vari campioni di lettiera e riportate le regioni dei picchi con i relativi gruppi funzionali annessi:

- Da 0 a 47 ppm: regione del carbonio alifatico “*short chain*” e “*long chain*”, lipidi, cutina, suberina, proteine, biopolimeri alifatici.
- Da 50 a 115 ppm: regione del carbonio O – alchilico (eteri, alcoli, acetali) e carboidrati (amido e cellulosa).
- Da 115 a 160 ppm: regione del carbonio aromatico (lignina, fenoli e tannini)

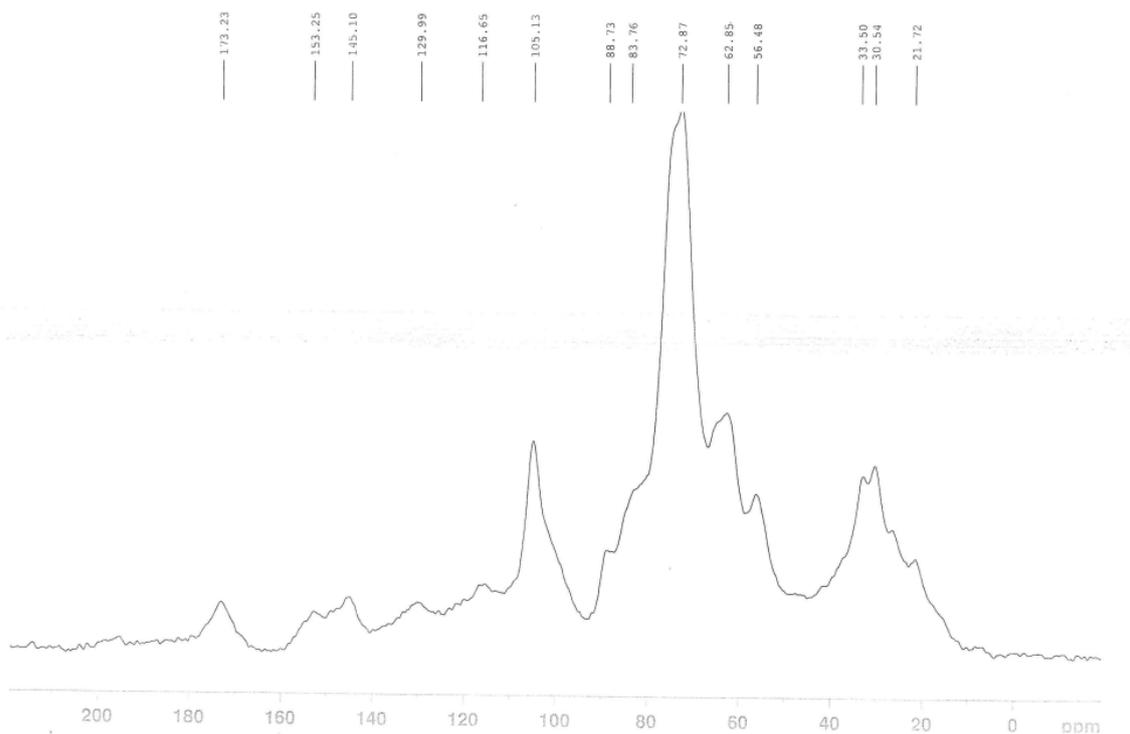


Figura 26 spettroscopia ^{13}C CP/MAS NMR della lettiera di larice

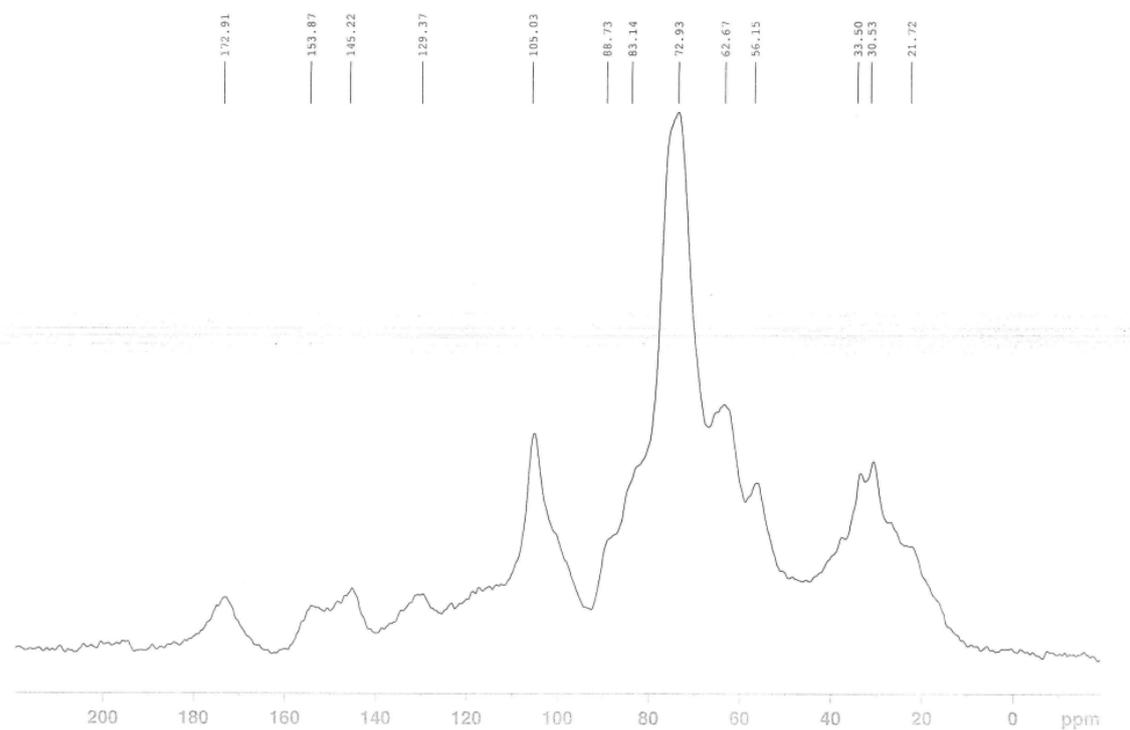


Figura 27 spettroscopia ^{13}C CP/MAS NMR della lettiera di pecceta

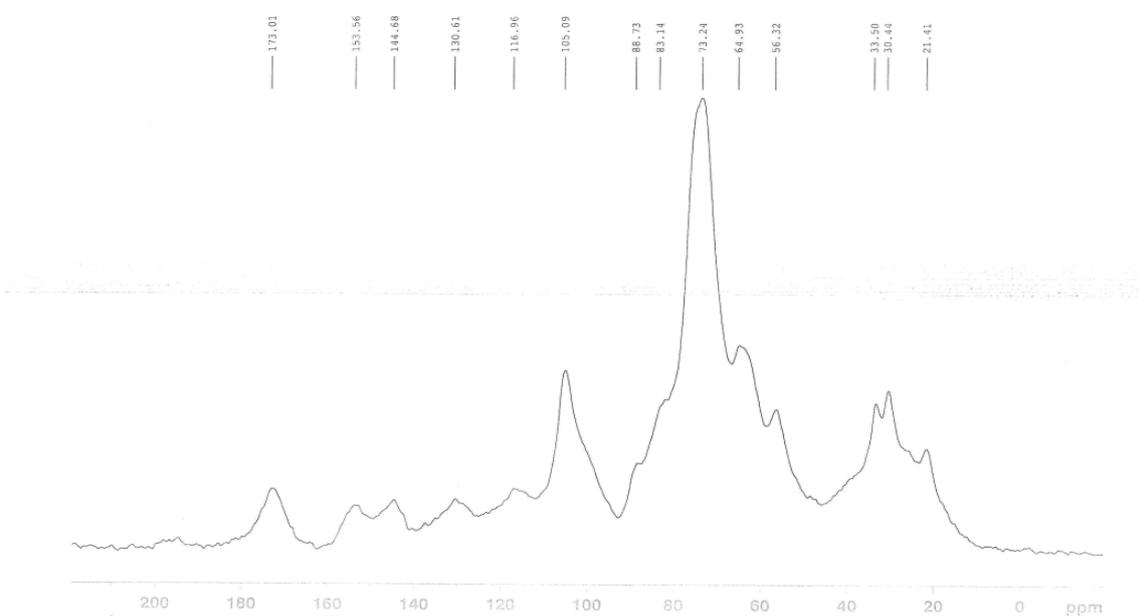


Figura 28 spettroscopia ^{13}C CP/MAS NMR della lettiera di faggeta

Nella Tabella 4 sono riportati i valori ottenuti dall'analisi della spettroscopia ^{13}C CP/MAS NMR, fornendo informazioni qualitative sulla composizione della frazione organica contenuta nei campioni delle tre lettieri attraverso le principali tipologie di gruppi funzionali del carbonio.

Campioni	Band δ range (ppm)			
	0-47	47-115	115-160	160-210
	Carbonio alifatico “short-chain” e “long-chain” lipidi, cutina, suberina, proteine, biopolimeri alifatici	Carbonio O-alchilico (eteri, alcoli, acetali), carboidrati e cellulosa	Carbonio aromatico (lignina, fenoli, e tannini)	Carbonio carbonilico (aldeidi e chetoni) carbossilico e ammidico
Larice	19,94	66,85	10,06	3,15
Pecceta	19,86	66,40	10,33	3,42
Faggio	19,16	66,04	10,90	3,90

Tabella 4 bande (ppm) della spettroscopia ^{13}C CP/MAS-NMR: integrali delle aree relative dei diversi tipi di carbonio

Le Figure 26-28 relative agli spettri e la tabella riassuntiva, non mettono in evidenza sostanziali differenze per i tre campioni. Vale la pena tuttavia di dettagliare meglio i chemical shift rilevati e tipici di biomasse di origine vegetale.

Il chemical shift, ovvero il picco massimo, è rilevato per tutti i campioni in corrispondenza dei valori compresi tra 72 – 74 ppm che corrisponde alla cellulosa, questi risultati sono conformi alla composizione chimica della cellulosa e al ruolo che essa svolge negli organismi vegetali. La cellulosa, infatti, è un polimero di unità di β -glucosio. Questa differenza, apparentemente lieve con altri polimeri del glucosio come l'amido e il glicogeno (polimeri di unità di α -glucosio), ha un effetto così profondo sulla struttura tridimensionale delle molecole di cellulosa, lunghe e non ramificate, da far sì che la cellulosa risulti inaccessibile agli enzimi che, invece, scindono facilmente l'amido e il glicogeno. Infine la cellulosa, pur essendo un polimero costituito da monomeri di glucosio, può essere idrolizzata solo da alcuni microrganismi appartenenti a protozoi, funghi e pochissimi animali. Solo i ruminanti, le termiti e le blatte riescono ad utilizzare la cellulosa come fonte di energia in quanto viene scissa dai microrganismi che vivono nel loro apparato digerente; infatti, una volta che le molecole di glucosio sono incorporate

nella parete cellulare sotto forma di cellulosa, esse non possono più essere utilizzate dalla pianta come fonte di energia.

Un discorso analogo si può sostenere anche per la regione degli spettri compresa tra 0 – 47 ppm, diagnostica del carbonio alifatico - “short-chain” e “long-chain” lipidi, cutina, suberina, proteine, biopolimeri alifatici che risulta essere la seconda più abbondante. Questo dato è in linea con la composizione chimica delle pareti cellulari, infatti, cutina e suberina sono lipidi caratteristici e importanti componenti strutturali delle pareti cellulari di molte piante. Ciò è sempre dovuto alla composizione chimica di tali composti e dal ruolo svolto nei confronti degli organismi vegetali. Cutina e suberina, insieme alle cere, impregnano le pareti vegetali e formano delle vere e proprie barriere capaci di impedire la perdita di acqua e altre molecole dalle superfici vegetali, inoltre proteggono le piante da agenti patogeni; la loro composizione chimica li rende, pertanto, difficilmente degradabili e anche questa regione è soggetta a un “effetto concentrazione”, dovuto all’abbondanza con cui questi composti si trovano nelle pareti cellulari, le pareti esterne delle cellule epidermiche delle foglie e dei fusti sono spesso ricoperte da uno strato di cuticola e la suberina è la principale componente delle pareti delle cellule del sughero (di quelle cellule che formano lo strato più esterno delle corteccia di radici e fusti legnosi).

Una correlazione tra le aree comprese 0 – 47 ppm e 160 – 210 ppm perché esistono anche agli acidi organici che possiedono gruppi carbossilici e porta all’aumento anche delle quantità dell’ultima regione (gruppi carbossilici).

Le Figure 29, 30 e 31 riportano gli spettri dell’analisi DRIFT dei campioni di lettiera.

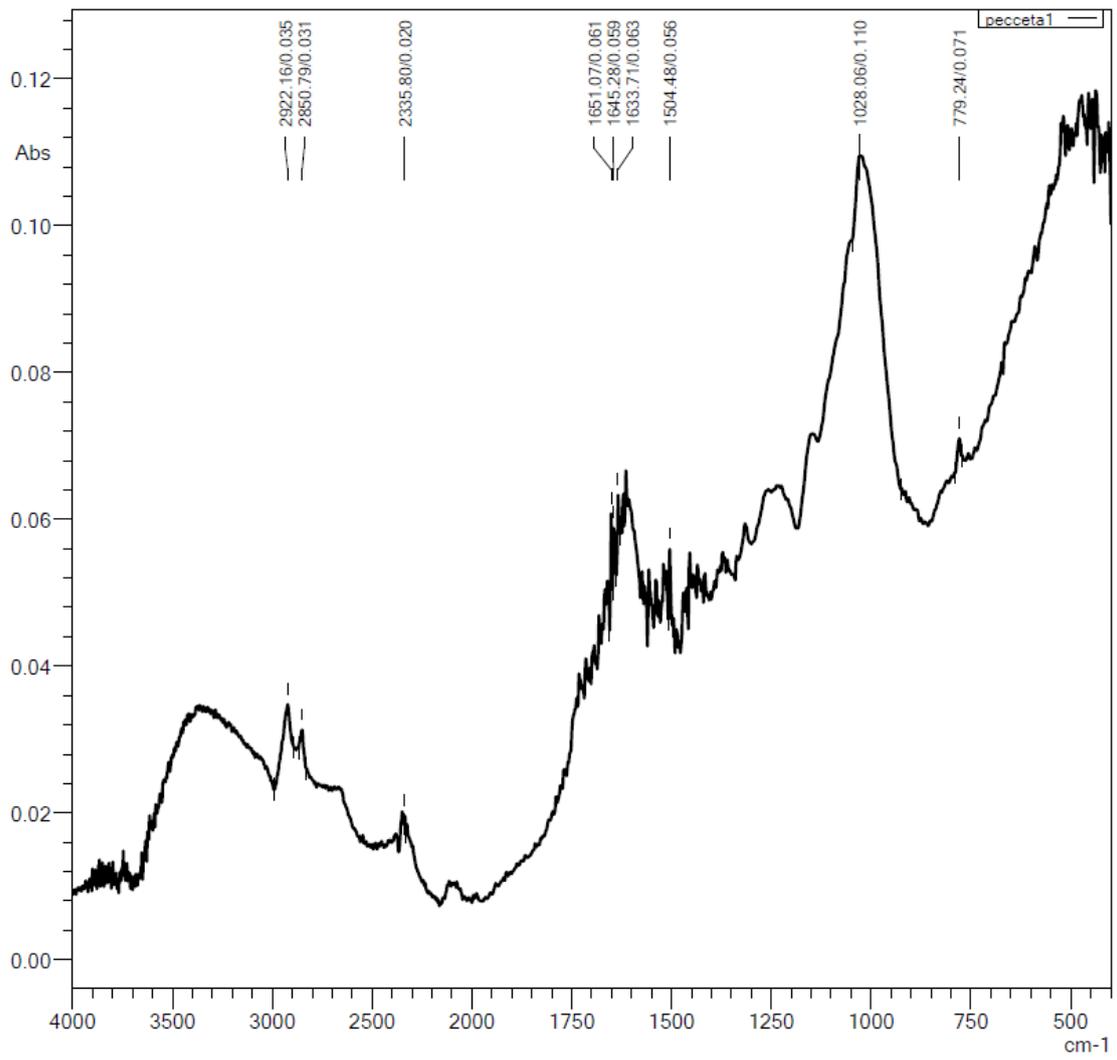


Figura 29 spettro DRIFTS del campione di lettiera della pecceta

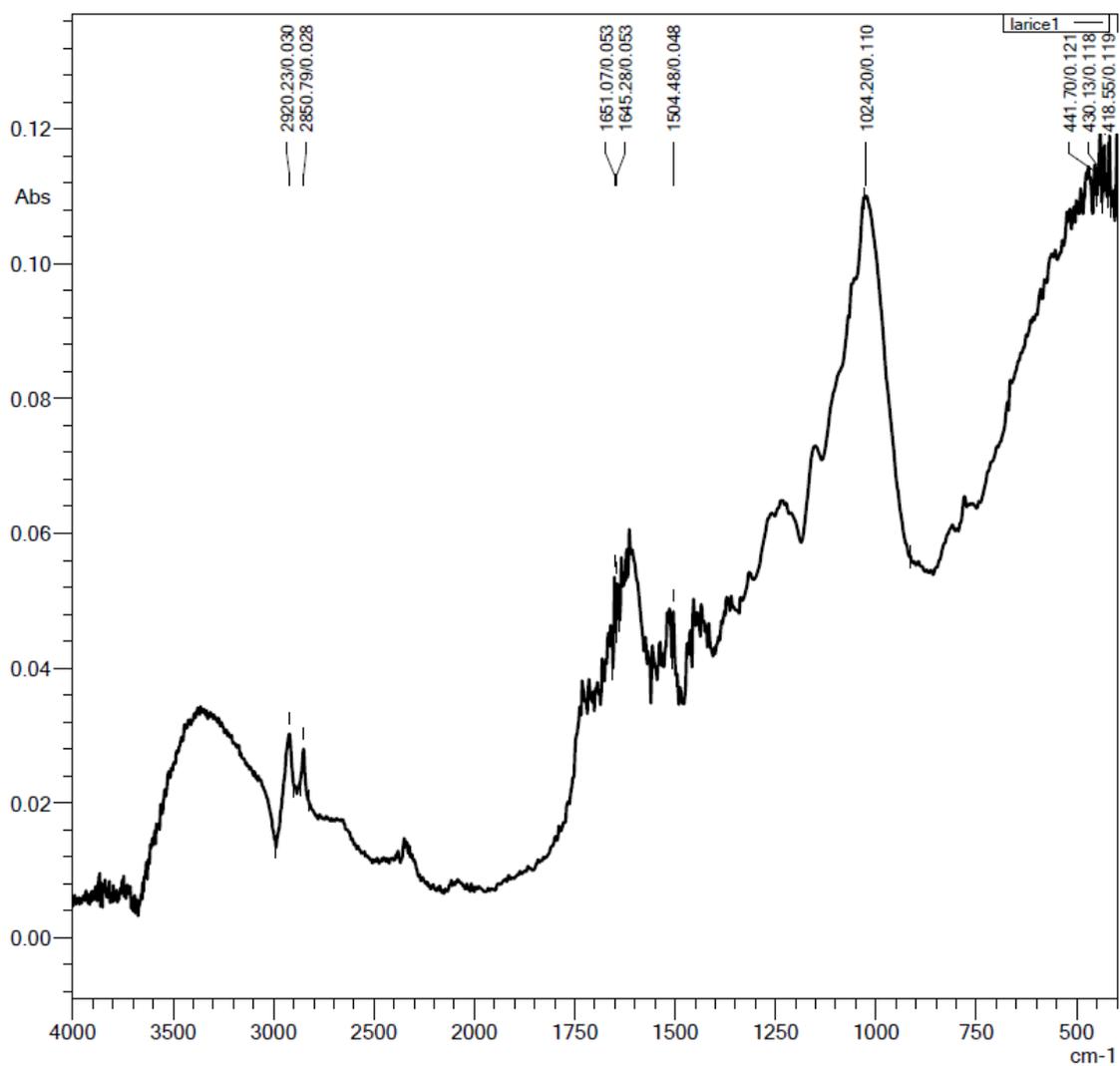


Figura 30 spettro DRIFTS del campione di lettiera del larice

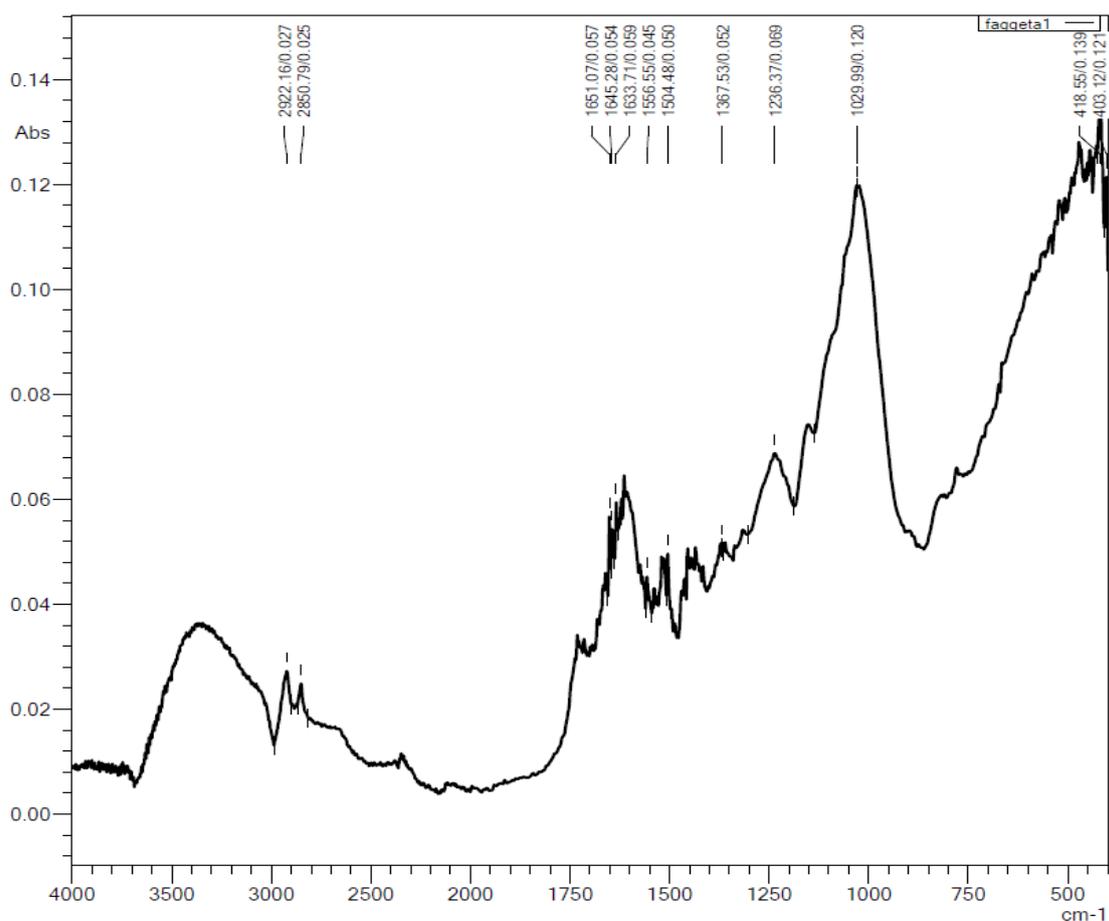


Figura 31 spettro DRIFTS del campione di lettiera della faggeta

Le tipiche bande di assorbimento mostrate dagli spettri (Tabella 5), non evidenziano particolari differenze tra le tre lettiere e mostrano la presenza dei tipici composti di materiale di origine vegetale così come evidenziato anche dall'analisi NMR:

Bande di assorbimento (cm^{-1})	Tipo di vibrazione
2800-2900	Stiramento simmetrico e asimmetrico dei legami C-H alifatici nei gruppi CH_2 e CH_3
1600	Stiramento asimmetrico del legame CO_2 dello ione carbossilato
1365	Stiramento simmetrico del legame CH_3 negli alcani
1020	Stiramento C-O nei carboidrati
780	Blending anello aromatico o C-H negli alchini

Tabella 5 Tabella riassuntiva dei gruppi funzionali riconosciuti nei campioni di lettiera

4.4. Determinazione dell'attività respiratoria di lettiere e suoli

Nella Tabella 6 sono riportati i valori dell'attività respirometrica effettuati sulle varie lettiere: nella prima riga sono riportati i giorni di analisi e nella prima colonna i campioni. Il test ha avuto una durata di circa sei mesi. Dopo le prime due misurazioni, fino al 19esimo giorno le titolazioni sono state effettuate ogni settimana, dal 20esimo al 33esimo giorno ogni due settimane. Il ciclo si è concluso con una misurazione al mese.

	0	2	5	12	19	33	70	95	136	176
L	0,00	2,21	3,55	7,05	10,18	15,57	23,71	29,91	38,67	47,03
P	0,00	2,00	5,81	10,28	13,90	19,62	27,94	35,01	44,63	52,49
F	0,00	2,79	5,48	9,51	12,49	17,39	24,46	29,98	37,29	44,83

Tabella 6 mg cumulati di CO₂ su g di sostanza secca (valori medi)

Nella Figura 32 sono riportate le curve di respirazione delle lettiere (L = larice, P = pecceta, F = faggio) in relazione ai giorni trascorsi.

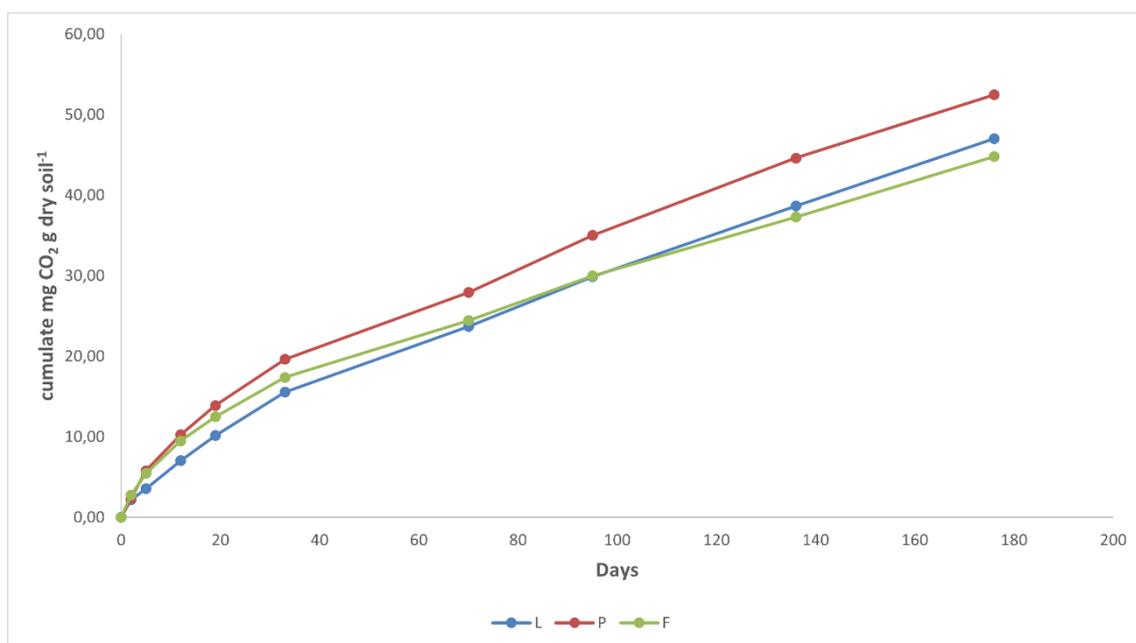


Figura 32 Curva respirometrica (mg CO₂ g sos. sec.⁻¹)

Dalla Tabella 6 e la Figura 7 si evidenzia un minore tasso di respirazione per Faggio e Larice rispetto alla Pecceta. In tal senso si fa notare che, pur presentando un valore di C/N inferiore, la Faggeta non presenta valori di respirazione più elevati, come ci si poteva attendere. Vi è però da sottolineare che, al di là del contenuto in termini assoluti di carbonio, è molto importante la sua composizione. In tal senso, potrebbe essere utile

esprimere i dati respirometrici non sulla sostanza secca ma sulla quantità di carbonio presente nei campioni di lettiera. I risultati vengono riportati in Tabella 7.

-	0	2	5	12	19	33	70	95	136	176
L	0	6	9	18	26	40	61	77	99	121
P	0	5	13	24	32	45	64	81	103	121
F	0	7	13	23	30	42	59	73	91	109

Tabella 7 mg cumulati di CO₂ su g di carbonio organico (valori medi)

L'espressione del dato respirometrico espresso sulla quantità di carbonio, evidenzia degli andamenti leggermente diversi: Larice e Pecceta che, ricordiamo appartenere alla stessa famiglia, sono di fatto uguali, mentre la respirazione della lettiera di Faggeta risulta essere inferiore.

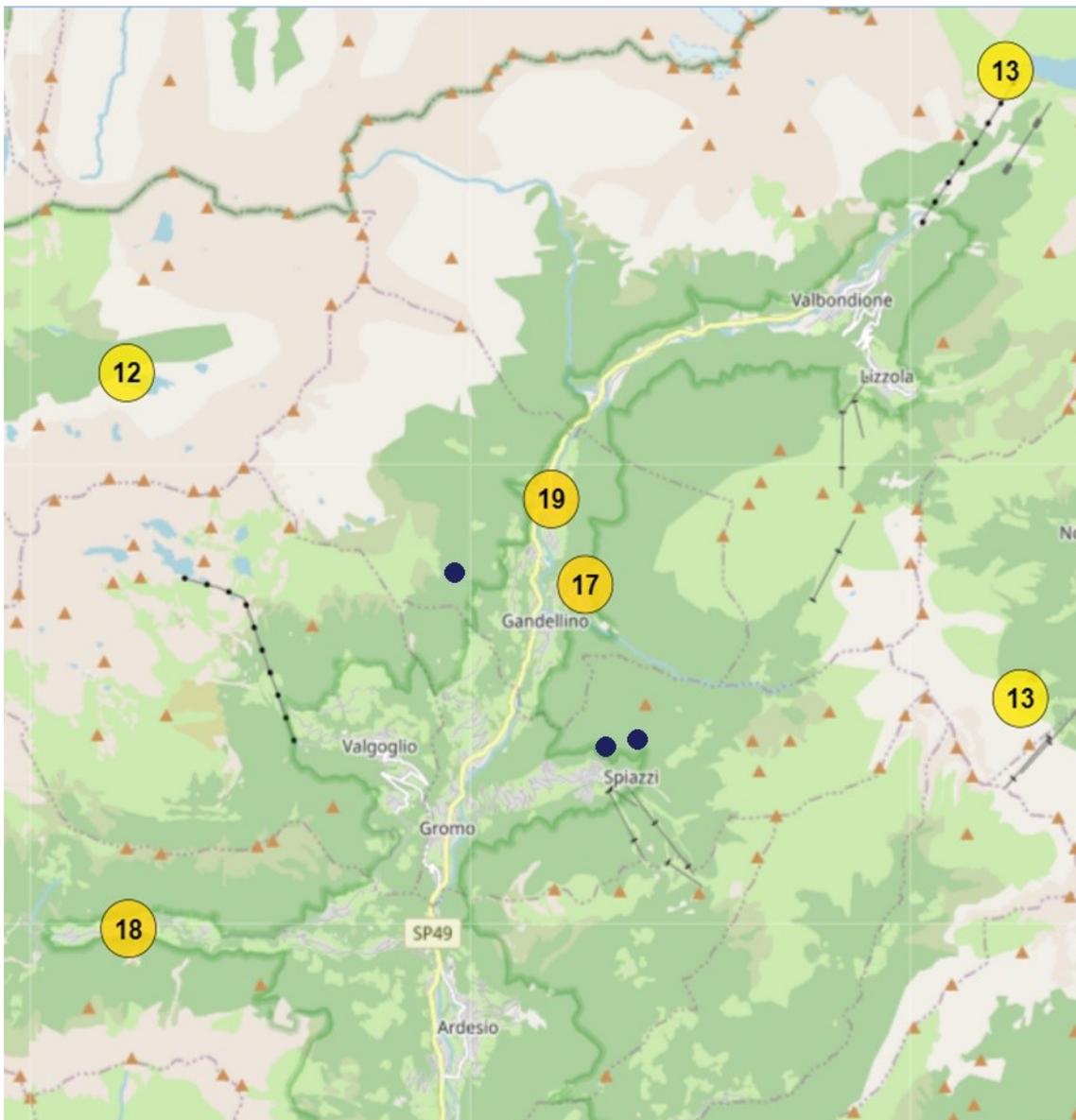


Figura 33 mappa della stazione pluviometriche di ARPA Lombardia

	Valore Cumulata Giornaliero [ml]				
	tot precip.	Max	Min	Med	giornata max piovosità
Ardesio	619,2	92,2	0,0	5,1	08/09/2022
Gandellino	449,4	53,4	0,0	3,7	22/10/2022
Valbondione	589,2	68,4	0,0	4,8	22/10/2022
media	552,6	71,3	0,0	4,5	

Tabella 8 precipitazioni di pioggia [ml] in Alta Val Seriana nei mesi da settembre a dicembre (fonte ARPA Lombardia)

	tot precip.	Max	Min	Med	giornata max piovosità
Ardesio	73,0	34,0	0,0	5,2	15/12/2022
Gandellino	69,2	21,6	0	4,9	15/12/2022
Valbondione	87,6	24,4	0,0	6,3	09/12/2022
media	76,6	26,7	0,0	5,5	

Tabella 9 piovosità nelle due settimane antecedenti al prelievo dal 5 al 18 dicembre (Fonte modificata: ARPA Lombardia)

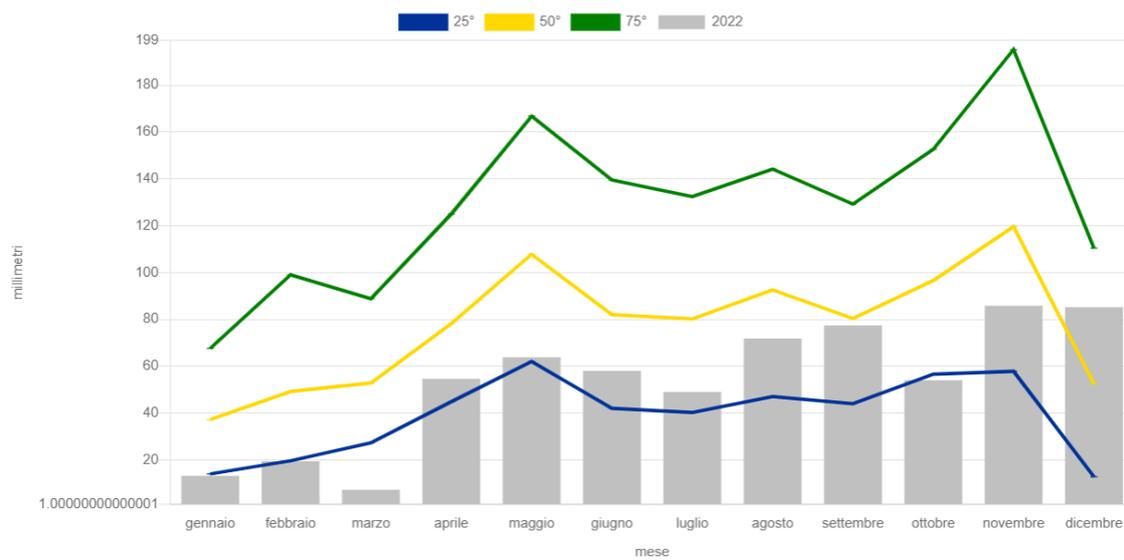


Figura 34 mediana delle cumulate mensili nel 2022 (barre), confrontate con il 25°, 50°, 75° percentile delle precipitazioni totali mensili registrate tra il 2002 e il 2021 (fonte ARPA Lombardia)

Considerando i dati pluviometrici dei mesi da settembre a dicembre 2022 (Tabella 8), delle stazioni ARPA Lombardia ad Ardesio (Bg), Valbondione (Bg) e Gandellino (Bg), situate vicino ai siti di prelievo (Gandellino e Spiazzi di Gromo, frazione di Gromo, Bg) (Figura 33, i punti in blu-nero, indicano le zone di prelievo), e confrontando con la Figura 34, si può ricavare che le precipitazioni sono state esigue rispetto al ventennio antecedente. Analizzando la Tabella 9 si può notare che sono avvenute alcune precipitazioni nelle due settimane antecedenti al giorno di prelievo, seppur di breve intensità; questo evento può aver influito sull'azione detritivora dei microrganismi presenti nei campioni di lettiera e sul fenomeno di lisciviazione delle sostanze idrosolubili. Dagli spettri DRIFT dei campioni di lettiera (Figura 29-31) questa teoria potrebbe essere confermata dalla bassa presenza di gruppi funzionali polari.¹⁷

¹⁷ Pavia, et al. *Introduction to Spectroscopy*. 29-30

Si riscontra una maggiore attività respirometrica (Figura 32) nella lettiera della pecceta. Questa lettiera risulta la più attiva, a causa del maggior contenuto di sostanza organica presente (43,35 g/kg), come mostrato dalla Tabella 2, per quanto non mostri di possedere un'alta concentrazione di sostanze organiche facilmente degradabili, ma, al contrario, mostra di avere un alto contenuto di sostanze ligno-umiche (come lignina, ecc.) come riportato nella Tabella 3.

Osservando il grado di correlazione (R^2) tra il TOC e l'attività respirometrica, e confrontando quest'ultima con il rapporto C/N, (Figura 35 e 36) si può concludere che esiste una certa correlazione tra le due variabili, seppur minima ($R^2_{TOC} = 0,47$ e $R^2_{C/N} = 0,35$).

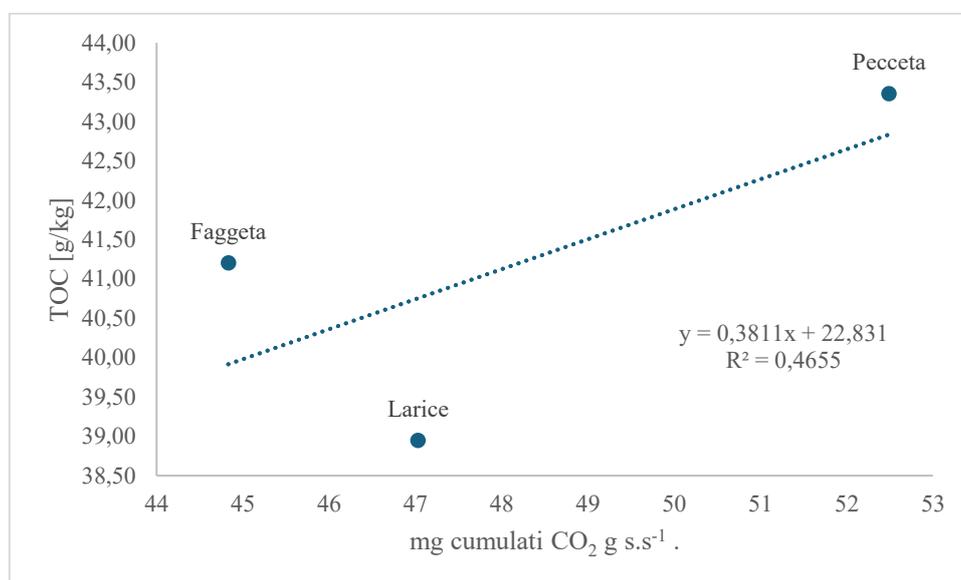


Figura 35 grafico a dispersione: correlazione tra TOC e mg di CO₂ emessa per g di sostanza secca dei campioni

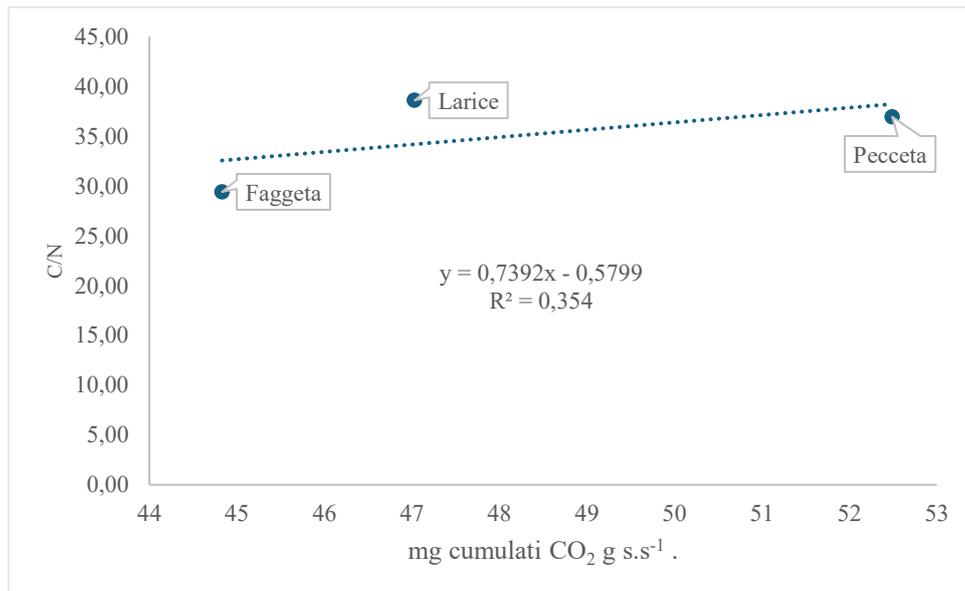


Figura 36 grafico a dispersione: correlazione tra C/N e mg di CO₂ emessa per g di sostanza secca dei campioni

I due grafici presentati qui sopra confrontano i due fattori più importanti da considerare per la degradazione della sostanza organica nei suoli, degradazione che, in questo caso, si considera solo per lo strato più superficiale composto dalla lettiera. Infatti avendo un valore medio del rapporto C/N nei tre campioni, questo risultato conferma la necessità da parte degli organismi detritivori di preferire un rapporto di circa 20:1 tra carbonio e azoto.¹⁸

Un altro dato interessante è l'attività respirometrica della lettiera del larice; risulta infatti essere meno attiva nei primi giorni di analisi, per poi aumentare gradualmente dopo il 33esimo giorno (Tabella 6). Questo risultato potrebbe essere dovuto al basso valore di pH (4,78 – Tabella 1) causato dall'alto contenuto di sostanze idrosolubili (18,34%) ed emicellulosa idrosolubile (30,51%). Il valore del pH basso può aver influenzato negativamente le attività dei microrganismi presenti nel campione; infatti si può notare come nel campione della pecceta il valore di pH risulti essere lievemente maggiore (5,41).

Interessanti sono i grafici riportati nelle Figure 37-40, dai quali è possibile indagare la correlazione tra l'attività respiratoria e le sostanze organiche presenti nei tre campioni.

¹⁸ STEMS. Parametri importanti da considerare nel compost. Rapporto C/N

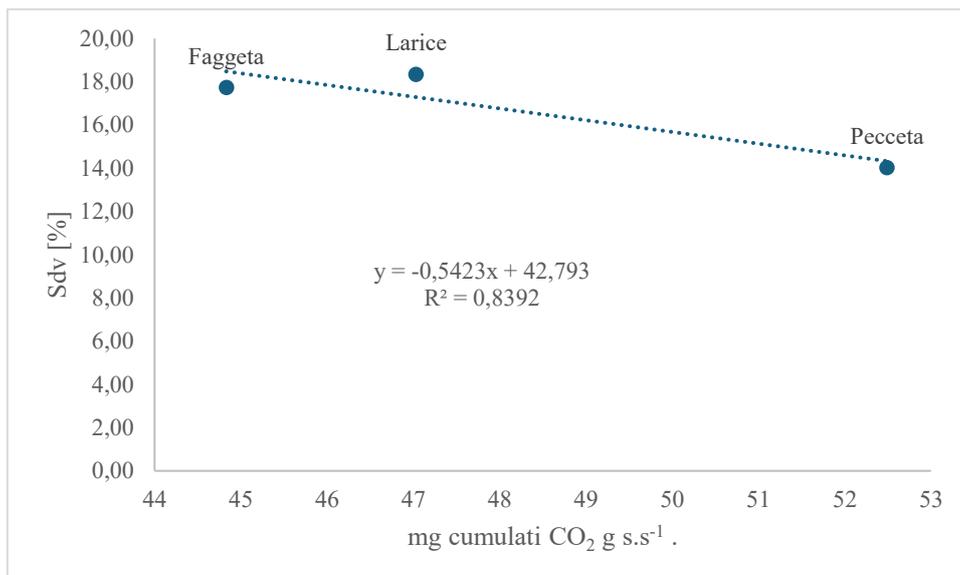


Figura 37 grafico a dispersione: correlazione tra sostanze solubili in solventi organici e mg di CO₂ emessa per g di sostanza secca dei campioni.

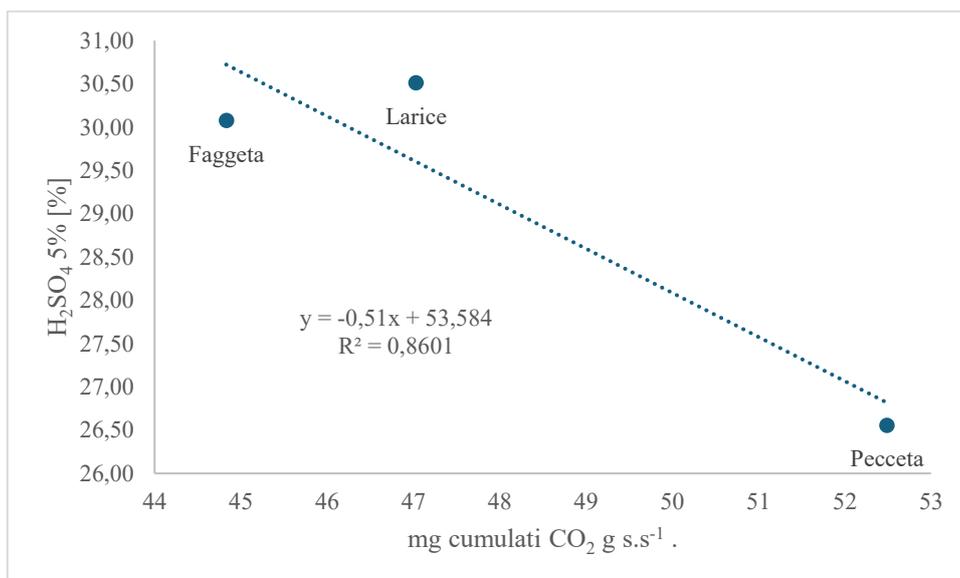


Figura 38 grafico a dispersione: correlazione tra emicellulose idrosolubili e non, tannini idrolizzabili, altre sostanze solubili, e parte delle proteine e mg di CO₂ emessa per g di sostanza secca dei campioni.

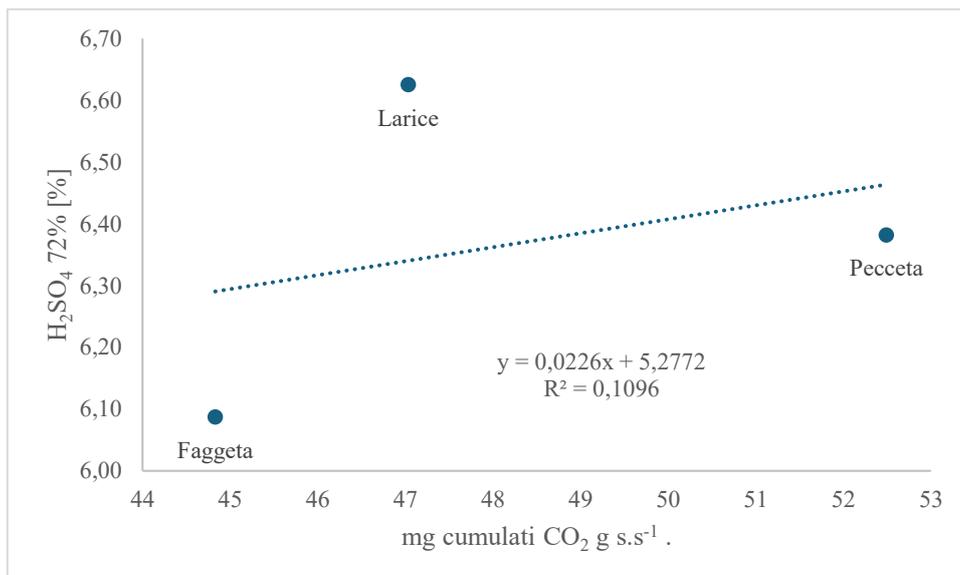


Figura 39 grafico a dispersione: correlazione tra cellulosa e mg di CO₂ emessa per g di sostanza secca dei campioni.

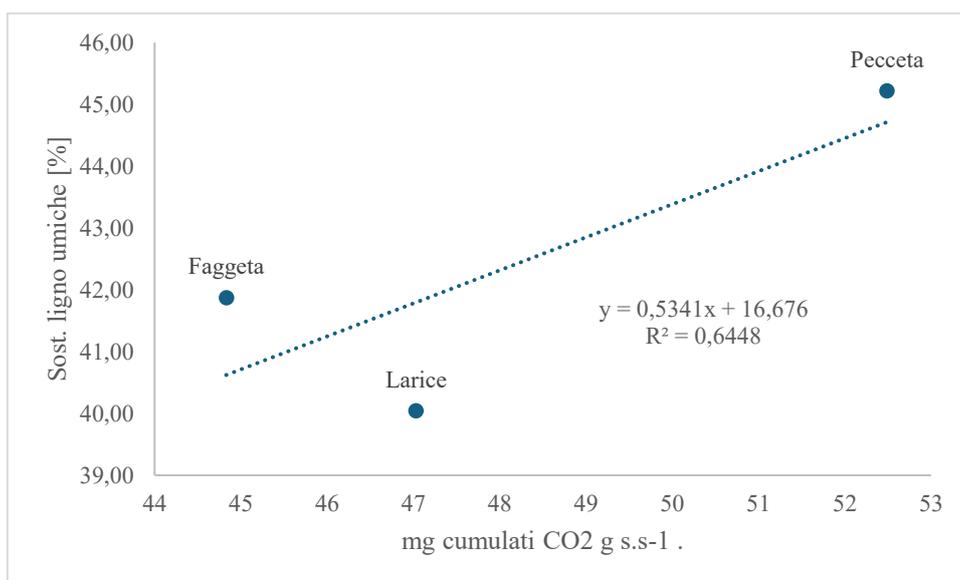


Figura 40 grafico a dispersione: correlazione tra sostanze ligno-umiche e mg di CO₂ emessa per g di sostanza secca dei campioni.

È improbabile che le sostanze più facilmente assimilabili da parte dei microrganismi risultino essere negativamente correlate, con $R_{Sdv}^2 = 0,84$ e $R_{H_2SO_4}^2 = 0,84$ (Figura 37 e 38). Questo risultato forse è dovuto alle concentrazioni inferiori a quelle ligno-umiche, che sono state le principali fonti di carbonio per i microrganismi durante l'attività respiratoria. Questo dato potrebbe essere in linea con il grafico dell'attività respiratoria (Figura 32) perché si può notare come nei primi giorni di analisi la produzione di CO₂ cresca più velocemente fino al 33esimo giorno, per poi diminuire successivamente. Si

può quindi desumere che nei primi 33 giorni i microrganismi abbiano consumato le sostanze organiche facilmente assimilabili, per poi concentrarsi sulle sostanze organiche più recalcitranti ($R_{Sost.Ligno-Umiche}^2 = 0,64$ – figura 40).

A conclusione dello studio condotto, è possibile evidenziare l'esistenza di una correlazione tra composizione della sostanza organica recalcitrante con l'attività respiratoria della lettiera così come il suo impatto con il ciclo del carbonio e la produzione di anidride carbonica. Questi risultati sono significativi per valutare l'impatto della lettiera sulla produzione dell'anidride carbonica e di conseguenza per la gestione delle foreste.

5. Conclusioni.

Combinando i risultati delle prove respirometriche e dei dati analitici è stato possibile ottenere un quadro sulla composizione di una lettiera in relazione alla produzione di anidride carbonica. In quest'attività non sono stati presi in considerazione i fattori ambientali, quali precipitazioni e temperatura, che potevano influenzare la respirazione delle lettiere, fattori che certamente influenzano la concentrazione delle sostanze organiche ed inorganiche presenti così come l'attività microbica.

Come si può evincere dai risultati nella Tabella 3, i valori sopra riportati mostrano risultati relativamente bassi rispetto a quelli che teoricamente si dovrebbe ottenere da campioni di lettiera. Questo risultato potrebbe essere attribuito al periodo di campionamento che, come riportato nel capitolo 2, è stato effettuato verso la fine di dicembre e ciò può indicare che sono passati almeno tre mesi prima della raccolta in cui i microrganismi potevano degradare le sostanze organiche facilmente degradabili (DOM) e lasciare quelle più recalcitranti (ROM). Questo risultato è in linea con i dati riportati dalle analisi spettroscopiche NMR (Tabella 4 e figure 26, 27 e 28) e DRIFTS (figure 29, 30 e 31) che confermano la maggior concentrazione di carboidrati e carbonio O-alchilico.

Un altro dato interessante da tenere in considerazione analizzando i dati ottenuti è osservare che questi valori, in realtà, dovrebbero essere inferiori a quanto ipotizzato all'inizio della sperimentazione. Infatti la stagione autunnale in Lombardia è caratterizzata da piogge leggere e molto frequenti e questo clima dovrebbe produrre una riduzione della sostanza organica (soprattutto dalle sostanze azotate). Analizzando i risultati ottenuti ciò non sembra essere avvenuto.

6. Bibliografia

ARPA Lombardia. <https://www.arpalombardia.it/temi-ambientali/meteo-e-clima/>

ARPA Lombardia. <https://www.arpalombardia.it/indicatori/2022/meteo-e-clima/precipitazione-totale-mensile/>

Assennato Francesca, Marco Di Leginio, Nicola Riitano, Andrea Strollo. *Carbonio organico del suolo e impatto del consumo di suolo*. ISPRA. URL: <https://indicatoriambientali.isprambiente.it/it/soilo/carbonio-organico-del-suolo-e-impatto-del-consumo-di-suolo> . Ultimo aggiornamento 2023-12-31

Bernacchi, Emanuele. *Il Ciclo del Carbonio: la necromassa forestale e la sostanza organica del suolo*. Tesi compilativa, Università Politecnica delle Marche. 2021-2022

Caudullo, G., Welk E., San-Miguel-Ayanz, J., *Chorological maps for the main European woody species*. Data in Brief, Volume 12, June 2017

Convenzione Europea del Paesaggio, Firenze 20 Ottobre 2000

Colombo Claudio, Teodoro Miano, *Metodi di analisi chimica del suolo*, 3. ed. Modugno: Pubblicità & Stampa, 2015. Print.

Conte, P., Piccolo, A., Van Lagen, B., Buurman, P., & De Jager, P. A. (1997). *Quantitative differences in evaluating soil humic substances by liquid- and solid-state ¹³C-NMR spectroscopy*. *Geoderma*, 80, 3-4 (1997).

Decreto Legislativo n. 227 del 5 marzo 2001

Decreto Legislativo n. 34 del 3 aprile 20018

ERSAF, Rapporto sullo stato delle foreste in Lombardia 2022

FAO. 2020. *Global Forest Resources Assessment 2020 – Key findings*. Rome. <https://doi.org/10.4060/ca8753en> World Population Prospects 2019, Online Edition.

Gambi L., *Una geografia per la storia*. Torino: Einaudi, 1973

Hughes, M. K.. *Ground vegetation and forest litter production*, UNESCO: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organisation. France. 1970

Lasserre B., M. Marchetti, R. Tognetti. *Problematiche di inventariazione del carbonio nella biomassa forestale ipogea*. Forest@ - Rivista di Selvicoltura ed Ecologia Forestale, Volume 3, 2006

Misson Laurenty, D.D. Baldocchi, T.A. Black, P.D. Blanken, Y. Brunet, J. Curiel Yuste, J.R. Dorsey, M. Falk, A. Granier, M.R. Irvine, N. Jarosz, E. Lamaud, S. Launiainen, B.E. Law, B. Longdoz, D. Loustau, M. McKay, K.T. Paw U, T. Vesala, D. Vickers, ... A.H. Goldstein. *Partitioning Forest Carbon Fluxes With Overstory and Understory Eddy-Covariance Measurements: a Synthesis Based on FLUXNET Data*. *Agricultural and Forest Meteorology* Agricultural and Forest Meteorology. Volume 144, Issues 1–2, 14 May 2007

Odum E.P., *Fundamentals of ecology*. Philadelphia e Londra: W. B. Saunders Co., 1971, terza edizione.

Wilhelm Thomé Otto, *Flora von Deutschland, Österreich und der Schweiz*, Gera, Germany: 1885.

Pavia, D. L., G. M. Lampman, G. S. Kriz, e J. R. Vyvyan. *Introduction to Spectroscopy*. 5^a ed. Boston: Cengage Learning, 2015.

Piussi Pietro e Alberti Giorgio, *Selvicoltura generale. Boschi, società e tecniche colturali*. Arezzo: Compagnia delle Foreste S.r.l., 2015 – 29-30

PSL, *Valle Seriana e Laghi Bergamaschi*. 2016

Royal Society. *the Role of Lan Carbon Sinks in Mitigating Global Climate Change*. Londra: Royal Society, 2001

Scarascia-Mugnozza Giuseppe, Matteucci Giorgio, Hajny Massimiliano, Montagnani Leonardo e Maschi Alberto, *Gestione forestale sostenibile e carbonio organico nei suoli in ambiente mediterraneo: inquadramento del problema e aspetti metodologici per una ricerca nel territorio del parco nazionale della Calabria*. Working paper Viterbo: DISAFRI, Università della Tuscia, 2001.

Spettroscopia infrarossa a trasformata di Fourier (Fourier Trasformate Infrared - FT-IR), Spettroscopia FT-IR (approfondimento), Laboratorio di Ingegneria Chimica e dei Materiali. Sapienza, Università di Roma. ultima cons. 20/6/2024,

<https://web.uniroma1.it/dicmalab/spettroscopia-ft-ir-approfondimento/spettroscopia-ft-ir-approfondimento>

Istituto di Scienze e Tecnologie per l'Energia e la Mobilità Sostenibili (STEMS). Torino.
<https://sustag.to.cnr.it/index.php/i-parametri-importanti-da-considerare>. Ultimo
consultazione 24/6/2024

Tansley A.G., *The use and abuse of vegetational concepts and terms*. Forest Ecology and Management, Volume 16, 1935 284-307.

Vecchio B., *Le paysage dans la geographie Italienne d'apres-guerre*. Francia: Revue de l'Economie Meridionale, vol. Unico, 1998

Zonneveld I.S., *Land evaluation and Land(scape) Science*. Enschede, ITC - International Institute for aerial survey and earth sciences., 1979

Ringraziamenti

Un sentito grazie alla Dott.ssa Fulvia Tambone, relatrice della tesi, per il costante supporto e le dritte indispensabili nell'accompagnarmi a scrivere ciascun capitolo della mia tesi.

Infine, ma non meno importante, vorrei ringraziare i miei genitori, mia sorella e Giulia per il loro costante supporto emotivo e morale. Siete stati la mia roccia durante i momenti difficili e le mie fonti di ispirazione quando avevo bisogno di motivazione. Senza di voi, questo percorso sarebbe stato molto più arduo. Vi sono infinitamente grato per essere stati al mio fianco.

