



DIPARTIMENTO DI SCIENZE AGRARIE ALIMENTARI E AMBIENTALI

CORSO DI LAUREA IN: SCIENZE FORESTALI E AMBIENTALI (L-25)

**CARATTERIZZAZIONE PEDOLOGICA
DI SUOLI SOTTO FAGGETA A
DIFFERENTI FASCE ALTITUDINALI.
MONTE BONDONE (TRENTO, TN)**

**PEDOLOGICAL CHARACTERIZATION
OF SOILS UNDER BEECH FOREST
AT DIFFERENT ALTITUDINAL ZONES.
MONTE BONDONE (TRENTO, TN)**

TIPO TESI: sperimentale

Studente:
EMANUELE MORATELLI

Relatore:
DOTT.SSA VALERIA CARDELLI

Correlatore:
PROF.SSA STEFANIA COCCO
DOTT. ANDREA SALVUCCI

ANNO ACCADEMICO 2023-2024

*A mia mamma, a mio papà e a mio fratello.
Vi voglio bene!*

SOMMARIO

SOMMARIO	3
ELENCO DELLE TABELLE.....	5
ELENCO DELLE FIGURE	6
CAPITOLO 1 INTRODUZIONE.....	7
1.1 Il cambiamento climatico.....	7
1.1.1 Generalità.....	7
1.1.2 Il futuro delle foreste.....	8
1.1.3 Il ruolo delle foreste all'interno del cambiamento climatico	9
1.2 Il clima come fattore pedogenetico.....	10
1.2.1 L'umidità	10
1.2.2 La temperatura	11
1.2.3 Il clima nelle classificazioni.....	11
1.3 Il suolo forestale.....	12
1.3.1 Generalità.....	12
1.3.2 I suoli forestali	14
1.3.3 L'importanza del suolo forestale per l'ambiente	17
1.4 La faggeta.....	18
1.4.1 Generalità.....	18
1.4.2 Rapporti con altre categorie	19
1.4.3 Articolazione delle faggete in tipi.....	20
CAPITOLO 2 SCOPO DELLA TESI.....	23
CAPITOLO 3 MATERIALI E METODI.....	24
3.1 Localizzazione e caratterizzazione delle aree di indagine	24
3.2 Schema sperimentale di campionamento e analisi morfologica dei suoli.....	26
3.2.1 Schema sperimentale	26
3.3 Preparazione del campione di lettiera del suolo.....	29
3.3.1 Essiccamento	29

3.3.2 Triturazione lettiera.....	30
3.3.3 Setacciatura a 2 mm e rimozione dello scheletro del suolo	30
3.4 Analisi fisiche	31
3.4.1 Tessitura.....	31
3.5 Analisi chimiche	34
3.5.1 pH	34
3.5.2 analisi del Carbonio Totale (TC) e Azoto Totale (TN).....	35
3.6 Elaborazione dei dati e analisi statistica	37
CAPITOLO 4 RISULTATI E DISCUSSIONI	38
4.1 Descrizione morfologica dei profili	38
4.2 Caratterizzazione fisica e chimica dei suoli	43
4.2.1 Effetto di altitudine e tipologia di orizzonte sui parametri chimici del suolo.....	44
CONCLUSIONI	48
BIBLIOGRAFIA	50
RINGRAZIAMENTI	53

ELENCO DELLE TABELLE

Tabella 1 – Caratteristiche topografiche e geologiche dei siti (Monte Bondone, TN)	27
Tabella 2 - Proprietà morfologiche dei suoli del Monte Bondone, Trento (Italia)	40
Tabella 3 – Caratterizzazione fisica dei suoli (Monte Bondone, TN).....	44
Tabella 4 – Caratterizzazione chimica dei suoli (Monte Bondone, TN).....	47

ELENCO DELLE FIGURE

Figura 1 – Pedon	13
Figura 2 - Soluzioni ecologiche	15
Figura 3 - Turnover	16
Figura 4 - Faggeta (foto di A.Gadotti)	19
Figura 5 - Areale geologico del Gruppo dei Calcarei Grigi.....	25
Figura 6 - Formazione di Rotzo, Eremo di S.Colombano, Trentino. (foto M. Avanzini). 26	
Figura 7 - Siti di campionamento, versante ovest del Monte Bondone	28
Figura 8 – Carta geologica dell’area dei siti di studio	28
Figura 9 - Schema di campionamento.....	29
Figura 10 - Mortaio e vaglio	30
Figura 11 - Buste con sabbia pesata dopo l'asciugatura in stufa	31
Figura 12 - Cilindri per la tessitura	32
Figura 13 - Triangolo della tessitura USDA	33
Figura 14 - Agitatore meccanico.....	34
Figura 15 - Piaccametro e elettrodo	35
Figura 16 - Analizzatore elementare CHN	35
Figura 17 - Capsule di stagno e bilancia	36
Figura 21 - Profilo P_3	42
Figura 20 - Profilo P_2	42
Figura 19 - Profilo P_1	42
Figura 18 - Profilo P_8	42
Figura 22 - Profilo P_4	42
Figura 23 - Profilo P_7	42
Figura 24 - Profilo P_6	42
Figure 25 - PCA	45

Capitolo 1

INTRODUZIONE

1.1 Il cambiamento climatico

1.1.1 Generalità

Le Nazioni Unite definiscono il cambiamento climatico come l'insieme delle variazioni a lungo termine delle temperature e dei modelli meteorologici. Queste variazioni possono avvenire in maniera naturale; tuttavia, a partire dal 19° secolo, le attività umane sono state il fattore principale all'origine dei cambiamenti climatici, imputabili essenzialmente alla combustione di combustibili fossili (come il carbone, il petrolio e il gas) che producono gas che trattengono il calore.

Quindi, se i cambiamenti climatici sono un processo naturale, dal 19° l'attività antropica ha intensificato tali variazioni climatiche a causa di un maggiore impulso dei processi industriali con il rilascio di quantità rilevanti di gas che causano effetto serra. Questi includono quelli sia naturalmente presenti in atmosfera come l'anidride carbonica (CO₂), metano (CH₄) e il protossido di azoto (N₂O), che non naturalmente presenti in atmosfera ma prodotti dall'attività antropica come i gas fluorurati, idrofluorocarburi (HFC), esafluoruro di zolfo (SF₆) e trifluoruro di azoto (NF₃) (Parlamento Europeo, 2023). Questi gas una volta in atmosfera fungono da schermo per le radiazioni infrarosse originate dal sole che, dopo essersi riflesse sulla superficie terrestre, sull'atmosfera e sulle nuvole vengono trattenute. Una maggiore concentrazione di questi gas intensifica l'accumulo di calore, contribuendo all'aumento delle temperature e al riscaldamento globale (Ranasinghe, 2022).

Per far fronte a tali fenomeni l'ONU ha avviato un percorso di cooperazione internazionale con i paesi membri, organizzando conferenze di rilevanza globale. Tra i primi risultati c'è la Convenzione quadro delle Nazioni Unite sui cambiamenti climatici, avvenuta a Rio nel 1992 e il Protocollo di Kyoto, firmato da 180 paesi nel 1997. In entrambi i casi l'obiettivo è stato quello di contenere il riscaldamento globale dando un taglio alle emissioni di gas serra. Nel 2015 è stato firmato l'Accordo di Parigi, che mira ad obiettivi più ambiziosi con l'intento di mantenere l'incremento delle temperature medie globali < 1,5°C rispetto ai livelli

preindustriali. Sempre nel 2015 viene sottoscritta l'Agenda 2030, un piano di azione globale che prevede 17 Obiettivi di Sviluppo Sostenibile da conseguire entro il 2030.

L'Unione Europea, attraverso la legge sul clima, fissa degli obiettivi giuridicamente vincolanti per la riduzione di gas serra che entro il 2030 devono essere diminuiti del 55%. Per il raggiungimento di tali obiettivi l'UE ha stabilito le seguenti misure:

- Riduzione delle emissioni dei trasporti;
- Fissare standard per risparmiare energia e investire nelle energie rinnovabili;
- Impedire il trasferimento delle industrie che emettono gas a effetto serra al di fuori dell'UE per evitare normative più severe;
- Promuovere il primo grande mercato mondiale del carbonio, il sistema di scambio quote di emissione;
- Stabilire obiettivi di riduzione per ciascun paese dell'UE;
- Promozione delle foreste e di altre aree di sequestro di carbonio.

1.1.2 *Il futuro delle foreste*

Il futuro delle foreste in relazione ai cambiamenti climatici è un tema complesso poiché è anche strettamente legato a trasformazioni socio-economiche degli ultimi decenni, che hanno causato profonde modifiche nel territorio. Questi cambiamenti hanno determinato da un lato una rapida riforestazione delle aree abbandonate del settore alto-collinare e montano, e dall'altro una riduzione delle superfici prative o pascolive progressivamente trasformate in arbusteti o boschi di neo-formazione (Urbinati et al., 2010).

A questo scenario si sommano gli effetti causati dal cambiamento climatico che influenzano significativamente il ciclo stagionale (lunghi periodi caldi e siccitosi alternati a brevi intervalli freschi e umidi) e il comportamento delle foreste. Infatti, gli ecosistemi forestali sono particolarmente sensibili a queste variazioni che alterano la fisiologia delle piante, il loro ciclo vitale, la resistenza alle malattie, la distribuzione geografica delle specie, la composizione delle comunità vegetali terrestri e le interazioni interspecifiche (Jantsch et al., 2014). L'aumento delle temperature, ad esempio, rende le foreste più vulnerabili ad attacchi di insetti xilofagi e defogliatori, mentre la consistenza e riduzione del manto nevoso portano ad un maggiore rischio di attacchi fungini. Le foreste montane, inoltre, svolgono un ruolo cruciale nella stabilizzazione idrogeologica dei versanti, subendo un degrado di tale funzione, si possono verificare problematiche legate a rischi di inondazione e dissesti.

Un ulteriore aspetto di particolare rilievo riguarda il limite superiore del bosco, una zona di transizione tra il margine più elevato del bosco chiuso e le praterie di alta quota. Le specie

arboree situate al di sopra di questo limite sono caratterizzate da un'elevata sensibilità climatica e possono fornire informazioni utili inerenti alle variazioni ambientali in atto. Studi condotti in aree boreali e alpine hanno rilevato processi di ricolonizzazione spontanea da parte di specie arboree, soprattutto conifere, a causa dell'abbandono dei pascoli d'alta quota (nelle Alpi) (Carre et al., 2006, Carre et al., 2007; Urbinati et al., 2008) e del riscaldamento climatico in aree in cui l'uomo non è mai stato presente (alcune zone boreali di tundra) (Danby e Hik, 2007). Proiezioni future ipotizzano una modificazione degli areali delle specie vegetali, in particolare nelle aree di limite superiore del bosco. In questa fascia, le specie adatte ai climi tendenzialmente più freddi potrebbero spostarsi verso altitudini maggiori in risposta all'aumento delle temperature. Tuttavia, con il riscaldamento globale, queste specie vegetali rischiano di trovarsi in habitat non più ottimali, arrivando ad una flessione della popolazione o, nel peggiore dei casi, anche all'estinzione.

La capacità adattativa delle foreste fornisce però una certa resilienza al cambiamento climatico che si esprime attraverso due componenti principali: la naturale risposta che si esplica a diversa scala (individui, popolazione e comunità) e che dipende soprattutto dai fattori genetici; e, la gestione forestale e le politiche socio-economiche che possono favorire forme di contenimento adeguate. Quindi, nonostante la longevità, le foreste non possiedono un rapido adattamento alle variazioni ambientali ma hanno una capacità di resilienza grazie a processi genetici stimolati da alterazioni significative; inoltre la capacità adattiva è migliore nelle regioni in cui si presenta una gestione forestale più attiva e sviluppata.

1.1.3 Il ruolo delle foreste all'interno del cambiamento climatico

L'importanza di una adeguata gestione forestale e l'obiettivo di preservare le foreste è da ricercarsi nel loro potenziale contributo, seppur limitato, alla mitigazione del cambiamento climatico.

Ogni anno le foreste assorbono mediamente il 25-30% delle emissioni di CO₂ contrastando così l'incremento delle temperature globali e i conseguenti impatti climatici (Luyssaert et al., 2007).

Le foreste sono sistemi biologici le cui dinamiche sono influenzate da fattori climatici. L'assorbimento di anidride carbonica dall'atmosfera avviene grazie al processo di fotosintesi. Tuttavia, la capacità di sequestrare carbonio può essere significativamente ridotta da eventi estremi (ondate di calore o gelate precoci e tardive), siccità e disturbi.

Pertanto, sebbene le foreste risultino un sistema funzionale per la rimozione della CO₂ dall'atmosfera, il ruolo alla mitigazione del riscaldamento globale è limitato, poiché non

possono svolgere il ruolo di “compensazione” alle emissioni. Tuttavia, è essenziale operare una gestione sostenibile di questa risorsa per migliorarne l’efficienza.

1.2 Il clima come fattore pedogenetico

Un’altra componente dell’ecosistema forestale fortemente influenzato dalle variazioni climatiche è il suolo.

Il clima è definito come l’insieme di tutte le condizioni atmosferiche (temperatura, umidità, pressione, venti, luce, ecc...) che caratterizzano una determinata regione geografica per lunghi periodi temporali influenzandone la flora, la fauna, l’economia e gli usi e costumi della popolazione.

Sotto l’aspetto pedogenetico risulta essere il fattore che meglio spiega la distribuzione dei suoli del nostro pianeta. Le principali componenti climatiche che influenzano la formazione del suolo sono l’umidità e la temperatura. Unitamente, fin da subito, queste due variabili definiscono la quantità e la disponibilità di acqua e influenzano i processi chimici, fisici e biologici nel suolo (Crocker, 1952).

1.2.1 L’umidità

L’umidità, attraverso le precipitazioni effettive (piogge che giungono e penetrano nel suolo), è in grado di agire sulla pedogenesi tramite azione fisica e chimica.

L’azione fisica è legata all’impatto delle gocce col suolo che, scaricando la propria energia cinetica su quest’ultimo, ne comportano la disgregazione e quindi la diminuzione di dimensione degli aggregati. Gli scenari possibili che seguono a tale situazione sono molteplici: nel caso di morfologie pianeggianti e/o debolmente ondulate possono avvenire rallentamenti nella velocità di infiltrazione a causa del compattamento della superficie del suolo; nel caso di morfologie ondulate e/o collinari, nelle aree non protette da vegetazione che presentano suolo nudo, può verificarsi il fenomeno di erosione idrica.

L’azione chimica, invece, contribuisce alla dislocazione di materiali e ioni nel suolo grazie all’acqua che risulta essere il mezzo principale in cui i composti inorganici si dissociano in cationi e anioni.

Tuttavia, nel momento in cui le precipitazioni vengono meno, sono possibili periodi di siccità più o meno prolungati che causano l’immobilizzazione degli elementi appena citati.

1.2.2 *La temperatura*

La temperatura esercita un ruolo fondamentale nei processi di mineralizzazione della sostanza organica nel suolo (Curtin et al., 2012). Di fronte a temperature elevate generalmente ci si può aspettare una mineralizzazione molto rapida, viceversa, nel momento in cui le temperature si presentano basse, avviene un'inibizione della pedofauna e questo processo può essere lento a tal punto da avere accumuli di sostanza organica.

Inoltre la temperatura agisce nella pedogenesi anche attraverso azioni meccaniche più dirette, come ad esempio la disgregazione termoclastica, o la disgregazione crioclastica delle rocce.

1.2.3 *Il clima nelle classificazioni*

L'umidità e la temperatura del suolo abbiamo visto essere due fattori fondamentali e determinati in modo diretto dal clima presente nella regione geografica d'interesse. Essi, assieme alla parte gassosa del suolo, determinano il pedoclima, quello che volgarmente può essere chiamato "clima del suolo".

La classificazione dei suoli secondo la Soil Taxonomy richiede la definizione dei regimi termici e idrici.

I dati relativi alla temperatura dei suoli risultando essere difficoltosi e per ovviare alle problematiche sono utilizzate delle convenzioni che prevedono stime basate sulla temperatura dell'aria, supponendo una certa capacità di "trattenuta" del calore da parte del suolo. Nella Soil Taxonomy la temperatura media annua del suolo risulta superiore di 1°C rispetto a quella dell'aria, ciononostante può variare in funzione sia della copertura vegetale che delle caratteristiche fisiche, chimiche e morfologiche dell'area presa in esame. L'identificazione del regime termico si basa sulla temperatura media annua della sezione di controllo (convenzionalmente posta a 50 cm di profondità, ovvero la parte di suolo che accoglie le radici).

La Soil Taxonomy (SSS, 1999) identifica i seguenti regimi termici:

- Pergelic (Gelic): dal latino "gelare", temperatura media del suolo annuo pari o inferiore a 0°.
- Cryc: dal greco "molto freddo", temperatura media annua del suolo tra 0° e 8° in assenza di permafrost.
- Frigid: temperatura media annua del suolo tra 0° e 8° con differenza tra la media estiva e invernale superiore a 6°.
- Mesic: temperatura media annua del suolo tra 8° e 15° con differenza tra media estiva e invernale superiore a 6°.

- Thermic: temperatura media annua del suolo tra 15° e 22° con differenza tra media estiva e invernale superiore a 6°.
- Hyperthermic: temperature media annua del suolo superiore a 22° con differenza tra media estiva e invernale superiore a 6°.

I regimi di umidità del suolo vengono invece determinati attraverso l'analisi del rapporto suolo:acqua. Tali regimi sono utilizzati per definire livelli tassonomici pure molto elevati e vengono calcolati tramite una sezione di controllo che risulta essere uno strato in cui: il limite superiore è la profondità in cui un suolo secco è inumidito da 2,5 cm di acqua in 24 ore, mentre il limite inferiore dove il suolo secco viene inumidito da 7,5 cm di acqua in 48 ore. Come ben si può intuire in tale rilevazione non vengono tenute in considerazione le situazioni successive ad irrigazioni e, inoltre, la tessitura del suolo ha forte impatto. Generalmente la sezione di controllo è posta: tra i 10 cm e i 30 cm per tessiture franche, limose e argillose; tra i 20 cm e i 60 cm per tessiture franco-sabbiose; tra i 30 cm e i 90 cm per tessiture sabbiose. Concludendo, i regimi idrici della Soil Taxonomy (SSS, 1999). sono:

- Acquic: dal latino “acqua”, suolo in condizione riducente e privo di ossigeno disciolto. Non stabilito un limite minimo di saturazione se non il tempo necessario per l'assenza di ossigeno (circa un paio di giorni).
- Aridic e torric: dal latino “secco” e “caldo”, il suolo deve presentarsi secco a 50 cm di profondità per più della metà dei giorni cumulativi dell'anno e avere una temperatura del suolo a tale profondità superiore a 5°.
- Udic: dal latino “umido”, il suolo non deve mai essere secco ad una profondità di 50 cm per 90 giorni cumulativi.
- Ustic: dal latino “bruciato”, deve avere un'umidità limitata ma presente nel momento in cui le condizioni sono adatte alla crescita delle piante.
- Xeric: dal greco “secco”, il suolo deve essere secco ovunque nei 50 cm di profondità per 45 giorni consecutivi e umido per oltre metà dei giorni in cui la temperatura è superiore a 6° o per 90 giorni se essa è maggiore di 8°.

1.3 Il suolo forestale

1.3.1 Generalità

Il suolo risulta essere una formazione naturale di superficie composto da due frazioni allo stato solido (organica e minerale), da una frazione liquida e da una gassosa, le quali possono presentare caratteristiche molto variabili. Esso è in continua evoluzione e rappresenta un

sistema dinamico in equilibrio con le altre componenti ambientali in grado di ospitare piante radicanti.

Il suolo svolge varie importanti funzioni, come: la produzione di biomassa, la filtrazione e trasformazione di sostanze e nutrienti, il mantenimento di pool di biodiversità, il deposito di carbonio, la fornitura di materie prime, ecc....

Com'è facilmente intuibile il suolo possiede, quindi, un ruolo fondamentale ai fini della sostenibilità a lungo termine dell'umanità e della comunità (Nardi et al., 2005). Esso inoltre è una risorsa limitata e rinnovabile in tempistiche talmente lunghe che in scala della vita umana non può essere definito tale.

Il limite superiore del suolo è rappresentato da aria, acqua, piante o lettiera in decomposizione, il limite inferiore, invece, è definito dal substrato pedogenetico (parent material) anche se spesso quest'ultimo non è chiaramente identificabile.

L'unità base di osservazione e campionamento per quanto riguarda i suoli è il pedon che può essere identificato solo grazie all'apertura di un profilo di suolo, in modo da poter identificare gli orizzonti di cui è composto (figura 1).

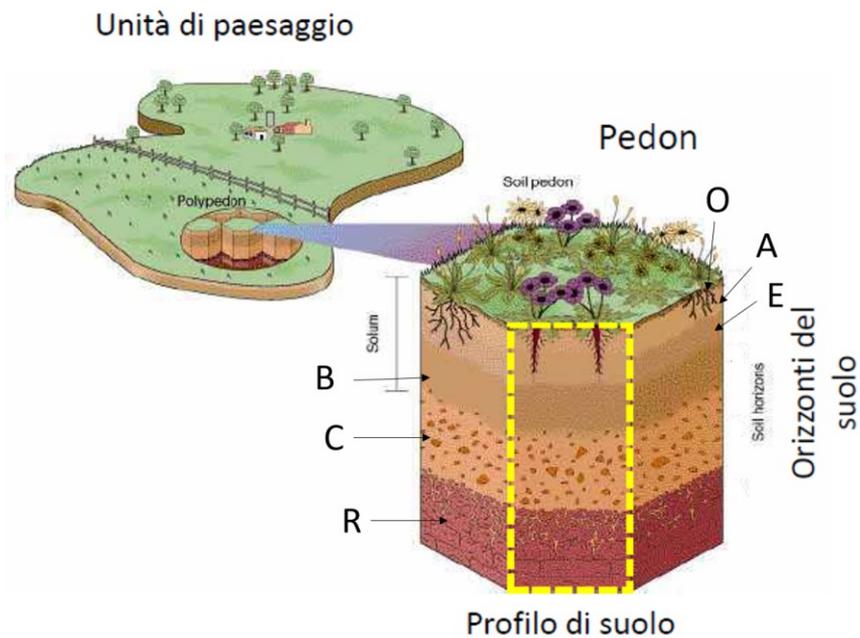


Figura 1 – Pedon

1.3.2 I suoli forestali

Generalmente questo tipo di suoli si formano in ambienti in cui l'impatto dell'attività antropica risulta essere minore o assente. Tuttavia la genesi dei suoli naturali o forestali risulta essere un argomento non privo di discussioni in quanto la gran parte degli ambienti sotto i 1500 m s.l.m. che riguardano il territorio europeo sono stati interessati da qualche attività umana. Nei paesi del sud Europa l'uso del suolo superava addirittura i 1500 m di quota. In particolare in Italia, inclusa nei paesi appena citati, quasi la totalità dei suoli, pure quelli che attualmente presentano bosco e pascoli montani fino anche 2.200 m s.l.m., sono stati soggetti ad attività antropiche di diverso tipo negli ultimi 3.000 anni circa (Kankaanpää et al., 2004). Il suolo forestale, essendosi originato in contesti più naturali rispetto a quelli agrari, è influenzato da numerosi processi naturali tra i cui le precipitazioni. Queste ultime riguardano pioggia e neve, le quali, prima di giungere al suolo, vengono intercettate dalle chiome (che sono attraversate per raggiungere la lettiera) oppure scorrono lungo le branche e il tronco fino alla base della pianta. In questo modo vengono create due diverse soluzioni ecologiche che nel primo caso sono chiamate "throughfall" e nel secondo "stemflow" che causano la peculiare caratteristica dei suoli forestali ad essere molto fertili e al contempo relativamente acidi (Cocco et al., 2006).

Il throughfall, attraversando la chioma, si arricchisce soprattutto di prodotti presenti sulla superficie fogliare ma, avendo un tempo di contatto con la pianta relativamente basso, risulta meno arricchito di nutrienti rispetto allo stemflow. Una volta giunto al suolo attraversa la lettiera e grazie a ciò contribuisce alla nutrizione dei funghi e della meso- e microfauna, oltre che all'attivazione di microrganismi. Questa soluzione che attraversa la lettiera e penetra nel suolo prende il nome di "litter-leachate".

Lo stemflow, invece, scivolando su branche e tronco della pianta si arricchisce di sostanze presenti soprattutto sulla superficie di esse e, impiegando molto tempo per raggiungere il suolo, presenta un elevato quantitativo di prodotti. Inoltre, com'è chiaramente visibile nella figura 2 sottostante, il throughfall giunge sulla superficie di suolo posta sotto chioma mentre lo stemflow in quella situata nella zona basale della pianta.

Risulta importante specificare che le sostanze disciolte all'interno di queste soluzioni sono particolarmente importanti in quanto si inseriscono nel ciclo degli elementi e contribuiscono alla nutrizione delle piante. Esse sono rappresentate da acidi organici a basso peso molecolare, nutrienti (Ca, Mg, K, nitrati, solfati, fosfati, ecc...) e Sali (NaCl, NaI, NaF, ecc...) che derivano da: secrezioni della pianta, decomposizioni secche di varia origine, microrganismi che vivono sulla fillosfera e da tutti gli organismi che svolgono il proprio ciclo vitale sulla corteccia.

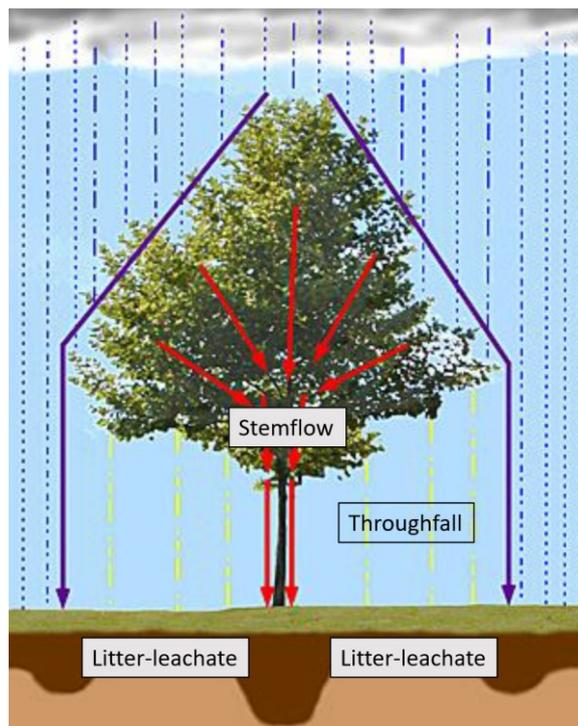


Figura 2 - Soluzioni ecologiche

Morfologicamente un suolo forestale è caratterizzato dalla presenza della lettiera (orizzonte O) e da orizzonti minerali diversamente ricchi di carbonio organico come, ad esempio, l'orizzonte A (organo-minerale).

L'orizzonte organico (O), ovvero la lettiera, è uno degli elementi più distintivi dei suoli forestali, si trova nella parte più superficiale, può avere spessore variabile in base alla vegetazione e alla pendenza e, inoltre, contiene residui vegetali in diverse fasi di decomposizione.

Quando questo tipo di orizzonte raggiunge spessori stabili di 10-15 cm diviene una vera e propria banca di biodiversità. Tant'è che, oltre ai molteplici ruoli di grande importanza, la lettiera svolge la funzione di mantenimento dell'umidità e dei nutrienti, i quali sono elementi fondamentali per la parte vegetale soprastante.

Nei differenti contesti forestali, i processi di turnover (figura 3), ovvero la decomposizione e il riciclaggio della materia organica (principalmente foglie, rami, cortecce e altro materiale vegetale), sul suolo rivestono un ruolo cruciale per il mantenimento della fertilità e per il riciclo dei nutrienti all'interno dell'ecosistema. Quest'ultimo è influenzato dal pH, dal rapporto C/N della biomassa e dal contenuto delle frazioni più labili e disponibili della materia organica. Le fasi del turnover possono essere suddivise in:

- Formazione della lettiera grazie alla perdita di parti vegetali come foglie, rami, fiori e frutti da parte delle piante.
- Decomposizione della lettiera ad opera di organismi decompositori come batteri, funghi, insetti, lombrichi e altri invertebrati che frammentano il materiale organico trasformandolo in sostanze più semplici.
- Mineralizzazione della materia organica grazie ad ulteriori degradazioni fino al raggiungimento di composti inorganici come anidride carbonica (CO₂), acqua, nitrati, fosfati, ecc..., i quali diventano disponibili per le piante che ne usufruiscono grazie all'assorbimento svolto dall'apparato radicale.
- Formazione dell'humus, ovvero una sostanza organica stabile che contribuisce alla struttura del suolo e alla sua capacità nel trattenere acqua e nutrienti, a partire da una parte della lettiera che non viene del tutto decomposta.



Figura 3 - Turnover

Sulla base delle differenti caratteristiche morfologiche dell'orizzonte in questione ne derivano 3 tipologie, ovvero OL, OF e OH (Référentiel Pédologique, 2008). Queste ultime si differenziano soprattutto grazie al grado di decomposizione della sostanza organica e si

avvalgono di “sottorizzonti” per indicare ulteriori dettagli sulle condizioni di trasformazione di essa.

L’orizzonte OL si trova normalmente su quello OF oppure direttamente a contatto con il suolo minerale, è costituito da residui vegetali ancora riconoscibili e la sostanza organica fine risulta assente o presente in percentuali minori del 5-10%. In questo orizzonte sono presenti 3 sottorizzonti: OLn, OLv e OLt.

L’orizzonte OF è posizionato generalmente a contatto con quello OL oppure con l’OH o il suolo minerale, si forma per opera degli artropodi che sminuzzano il materiale vegetale in piccoli frammenti ancora riconoscibili ed inoltre sono presenti gli escrementi della pedofauna. L’elemento chiave per la distinzione tra un orizzonte OL da un OF è la sostanza organica fine, la quale risulta essere maggiormente presente nel secondo orizzonte. I sottorizzonti sono: OFr, OFm e OFc.

Infine l’ultima tipologia di orizzonte O è l’OH che si trova generalmente sotto l’orizzonte OF con un passaggio netto tra i due. questo tipo è caratterizzato da un avanzato stadio di decomposizione della sostanza organica e presenta sostanza organica fine superiore al 70%. I sottorizzonti in questo caso sono due, ovvero: OHR e OHf.

L’orizzonte A, chiamato pure organo-minerale, è situato appena al di sotto dell’orizzonte organico (O), è caratterizzato da una prevalenza di frazione minerale con un arricchimento di sostanza organica. Proprio per quest’ultima osservazione questo orizzonte deve una delle sue caratteristiche principali, ovvero la colorazione molto scura. Quest’ultima risulta direttamente proporzionale al quantitativo di sostanza organica e humus presente in esso. Oltre a ciò in questo strato di suolo vi è un’alta concentrazione di nutrienti essenziali per le piante, come azoto, fosforo e potassio. Tuttavia, in questo orizzonte genetico nel momento in cui si dovessero presentare condizioni di umidità può verificarsi il fenomeno di lisciviazione e quindi comportare il trasporto verso orizzonti più profondi dei minerali più solubili, quali calcio, magnesio e appunto potassio.

1.3.3 *L’importanza del suolo forestale per l’ambiente*

È doveroso soffermarsi pure sull’importanza che hanno i suoli in generale, ma in particolare quelli forestali (Cardelli et al., 2019), in quanto esplicano uno dei servizi ecosistemici più importanti attraverso il sequestro del carbonio. Questo meccanismo è suddiviso in tre stadi: in un primo momento vi è la rimozione dell’anidride carbonica dall’atmosfera attraverso le piante che svolgono la fotosintesi clorofilliana, successivamente vi è il trasferimento del carbonio presente nella CO₂ dalla pianta alla biomassa di essa ed infine avviene il trasferimento dalla biomassa della pianta al suolo, dove viene immagazzinato nel carbonio organico del suolo

(SOC) e nella frazione più labile in cui vi è il turnover più rapido (De Feudis et al., 2019). Il carbonio viene stabilizzato all'interno del suolo e con l'aumentare della profondità lungo il profilo sarà presente SOC sempre più recalcitrante alla degradazione. Ciò che concretamente avviene al carbonio può essere valutato da diversi punti di vista: fisicamente esso viene stabilizzato all'interno dei micro-macro aggregati e risultare inaccessibile ai microrganismi, chimicamente viene adsorbito dalle argille e biochimicamente viene trasformato in sostanze più complesse che ostacolano la decomposizione.

Per capire maggiormente quest'importanza basti considerare che lo stock di carbonio del suolo risulta pari a circa 1.500 PgC nel primo metro di suolo, che risulta essere più di quello che viene stoccato nell'atmosfera (circa 800 PgC) e dalla vegetazione terrestre (circa 500 PgC) messe assieme.

In ambiente forestale troviamo torbiere, pascoli e, ovviamente, suolo forestale. Questi tre elementi sono definiti "hot spot", ovvero delle zone puntuali con caratteristiche particolari che risultano sensibili al cambiamento climatico e che possono facilmente mutarsi in fonti di emissioni in atmosfera di gas a effetto serra (Gelybó et al., 2018). I suoli forestali ricoprono circa il 30% della superficie mondiale e comprendono le torbiere, le quali contengono la maggior parte del carbonio del suolo, ovvero il 30%, ma costituiscono solamente il 3% della superficie terrestre. Le torbiere sono ecosistemi riscontrabili in zone umide e caratterizzate dall'accumulo di torba derivata da materiale vegetale morto e in decomposizione in condizioni di permanente saturazione dell'acqua.

Tipiche dell'ambiente forestale sono pure le praterie, le quali comprendono pascoli, arbusteti, terreni seminati a pascolo e foraggere, che ricoprono il 40% della superficie terrestre e contengono il 20% degli stock di SOC mondiale.

Giunti a questo punto risulta chiaro e facilmente intuibile come oggi le attività antropiche costituiscano, in maniera diretta e non, una forte problematica per il suolo e che quindi almeno nelle zone dove risulta possibile bisogna applicare delle corrette gestioni che, in ambiente forestale, possono essere una corretta gestione del pascolo e/o del soprassuolo.

1.4 La faggeta

1.4.1 Generalità

La faggeta risulta essere una categoria che, come si evince dal nome, comprende formazioni forestali dominate da *Fagus sylvatica*, ovvero il faggio (Gandolfo et al., 2018). Tale formazione può vedere la presenza di specie subordinate sia di latifoglie che conifere.

L'abbondanza di queste ultime risulta essere un primo punto per l'individuazione delle diverse tipologie all'interno di questa categoria.



Figura 4 - Faggeta (foto di A. Gadotti)

1.4.2 Rapporti con altre categorie

Il faggio generalmente si trova in ambiente esalpico, ovvero prealpino-oceanico, all'interno del quale è in grado di essere particolarmente concorrenziale rispetto alle altre specie arboree permettendo la formazione di boschi puri. Abitualmente gli spostamenti dall'optimum ecologico di questa specie, soprattutto dal punto di vista edafico, causa una riduzione del carattere precedentemente citato portando a formazioni di boschi misti (Hofmann, 1991). Per quanto riguarda le quote più elevate in ambiente subcontinentale, all'interno della faggeta si trovano aghifoglie, come ad esempio l'abete rosso (*Picea excelsa*) e, specificatamente per le stazioni più fresche e fertili, l'abete bianco (*Abies alba*). A quote meno elevate, quindi in ambiente altimontano, le conifere tendono a scomparire (ad eccezione del pino mugo) e la faggeta tende ad essere pura con la presenza di altre latifoglie, soprattutto l'acero montano (*Acer pseudoplatanus*).

Infine in ambiente submontano, alle quote più basse, possono presentarsi generalmente due situazioni: con condizioni maggiormente xerico-termofile la faggeta origina formazioni miste con elementi dell'orno-ostrieto e pineta; con condizioni più fresche possono presentarsi elementi dei querceti mesofili, degli aceri-frassineti e dei carpineti di carpino bianco.

Solitamente il faggio non risente particolarmente della natura del substrato ed è proprio per questo che spesso la diffusione di conifere in faggeta è correlata alle pratiche selvicolturali che, con l'eccessiva scopertura del suolo, hanno accentuato la continentalità e xericità della zona.

1.4.3 *Articolazione delle faggete in tipi*

L'articolazione delle faggete in tipi forestali presenta interpretazioni molto variegata in base alle regioni in cui ci si trova, tale situazione rispecchia una reale complessità: le faggete, per quanto riguarda l'ambiente eso-mesalpico, ritrae il cuore mesofilo della vegetazione forestale montana e sono il risultato di un equilibrio tra diversi fattori, come: clima, zone di localizzazione, substrato, fasce altitudinali, ecc...

Bisogna tenere in considerazione che di tutti i diversi fattori osservati non ve ne sono di principali e secondari ma risultano essere tutti di egual importanza e sta proprio alle diverse regioni identificare quelli da porre in primo luogo in quanto, presumibilmente, più significativi per il proprio territorio (Del Favero, 2004).

Nello specifico in trentino, rispetto ad altre aree alpine, sono stati messi in evidenza i seguenti punti:

- il substrato, che permette la separazione geografica di due tipi di faggete, chiamate “silicicola” e “calcicola”;
- l'articolazione altitudinale, che, nel caso di faggete esalpiche, permette una netta distinzione tra il piano montano e quello submontano-collinare ed una meno definita tra le faggete nei piani altimontani e/o subalpini.

1.4.3.1 Faggeta silicicola (FA_sil)

Questo tipo è caratterizzato dallo stretto legame con i substrati silicatici. Generalmente presenta uno scarso quantum floristico (circa una ventina di specie) in cui si osservano generalmente conifere con peccio, larice e abete e, più raramente, pino silvestre (*Pinus sylvestris*). Vi è una forte prevalenza di specie acidofile come: *Hieracium sylvaticum*, *Luzula nivea/albida*, *Polygonatum verticillatum*, *Polypodium vulgare*, *Rubus idaeus*, *Vaccinium myrtillus*, *Veronica officinalis*.

Solitamente questo tipo è collocato su pendici con medie o forti esposizioni in area (meso)alpica.

Questo tipo di faggeta presenta il sottotipo “tipico” e quello “xerofilo”.

1.4.3.2 Faggeta tipica a dentarie (FA)

Questa è una formazione tipica di pendici medie o stazioni fresche del piano montano, dove il faggio trova le condizioni migliori per le sue caratteristiche e genera formazioni con elevata statura che possono essere pure con peccio o, soprattutto, con abete bianco. In questo tipo di vegetazione è ricca di elementi termofili o xero-acidofili che non sono né dominanti né esclusivi.

Gli arbusti e suffrutici non sono mai molto presenti e comprendono: *Corylus avellana*, *Daphne mezereum*, *Laburnum alpinum*, *Sorbus aucuparia*, *Lonicera alpigena*, *L. nigra*.

La vegetazione erbacea presenta specie mesofili che dominano, molte a foglia larga come: *Actea spicata*, *Athyrium filix-foemina*, *Arum maculatum* (bassomontano), *Cardamine enneaphyllos*, *Cardamine pentaphyllos*, *Carex sylvatica*, *Dryopteris filix-mas*, *Galium odoratum*, *Leucojum vernum* (bassomontano), *Lilium martagon*, *Oxalis acetosella*, *Paris quadrifolia*, *Polygonatum verticillatum*, *Pulmonaria officinalis*, *Veronica urticifolia*.

Questa tipo di faggeta presenta come sottotipi quello “silicicolo” e “calcicolo”.

1.4.3.3 Faggeta mesalpica con conifere (FA_con)

Spesso si trova su substrati silicatici e carbonatici acidificati e in stazioni a clima relativamente rigido e quindi presenta elementi concidono con la faggeta del piano altimontano. In ogni caso il corredo floristico mediamente ricco vista la presenza sia di specie acidofile che calcicole e, frequentemente, con presenza naturale di conifere.

Si trova generalmente nella fascia altitudinale montana con ambiente solitamente continentale e presenza di abbondante copertura muscinale.

I sottotipi sono: “calcicolo mesoxerico”, “calcicolo mesofilo” e “silicicolo”.

1.4.3.4 Faggeta altimontana (FA_alt)

Come la faggeta precedente pure la presente è legata a substrati carbonatici acidificati e stazioni a clima relativamente rigido.

Questo tipo di faggeta a quote superiori del piano altitudinale altimontano esalpico sfuma in un paesaggio con arbusteti pionieri (come mughete, rodoreti, formazioni a *Genista radiata* e ontaneta di ontano verde) oppure nei pascoli cacuminali.

Una caratteristica di questo tipo di faggeta è l'importanza dell'elemento arbustivo e il portamento stesso del faggio che tende a modificarsi in tal senso.

Tra le specie più diffuse: *Acer pseudoplatanus*, *Betula pendula*, *Calamagrostis sp.*, *Erica carnea*, *Laburnum alpinum*, *Larix decidua*, *Luzula albida*, *Rhododendron hirsutum*, *Sorbus aucuparia*, *Vaccinium myrtillus*.

1.4.3.5 Faggeta submontana con ostraia (FA_cn)

La faggeta submontana con ostraia, insieme a quella submontana dei suoli mesici, è legata alle zone esalpiche su substrato carbonatico del piano submontano con risalite in stazioni termocerofile particolarmente calde.

Nel caso delle submontane con ostraia le stazioni possono essere calde e relativamente secche e poco fertili.

Il corredo floristico è molto ricco vista la presenza di specie sia calcicole e/o termofile, pure con presenza di altre latifoglie o conifere. Tra le specie più comuni: *Acer campestre*, *Carex alba*, *Carex flacca*, *Cephalanthera sp.*, *Cornus sanguinea*, *Cyclamen purpurascens*, *Fraxinus ornus*, *Hedera helix*, *Helleborus niger*, *Melittis melissophyllum*, *Mercurialis perennis*, *Neottia nidus-avis*, *Ostrya carpinifolia*, *Pinus sylvestris*, *Pteridium aquilinum*, *Quercus pubescens*, *Salvia glutinosa*, *Sorbus aria*, *Viburnum lantana*.

La struttura è caratterizzata da una componente arbustiva che ricopre un importante ruolo, essa non risulta elevata, ha copertura discontinua ed è ricca di margini interni.

1.4.3.6 Faggeta submontana dei suoli mesici (FA_ta)

Come detto precedentemente tale faggeta è situata in zone con substrato carbonatico. Essa si distingue perché nelle stazioni più calde e umide, come le valli fresche, il faggio scende entrando in relazione con la vegetazione di forra.

A tale situazione ne consegue la formazione di consorzi con buona fertilità, aventi chiome dense ed elevate, ma in genere non molto estesi perché, essendo legati a condizioni particolari, risultano assenti le specie di margine.

Gli alberi e arbusti legati all'ambiente di forra sono: *Acer sp.*, *Carpinus betulus*, *Cornus sanguinea*, *Corylus avellana*, *Euonymus latifolius*, *Ilex aquifolium*, *Sorbus torminalis*, *Taxus baccata*, *Viburnum opulus*. Le specie erbacee, sempre di tale ambiente, sono: *Anemone trifolia*, *Aruncus dioicus*, *Asarum europaeum* (suoli eutrofici), *Epimedium alpinum*, *Euphorbia amygdaloides* (anche *E. carniolica*), *Galium laevigatum*, *Hedera helix*, *Lathyrus niger*, *Lilium martagon*, *Melittis melissophyllum*, *Mercurialis perennis*, *Primula vulgaris*, *Sanicula europaea*, *Tamus communis*, *Tanacetum corymbosum*, *Veratrum nigrum*.

Capitolo 2

SCOPO DELLA TESI

La presente tesi si colloca all'interno di un ambito di ricerca più ampio, svolto dalla Fondazione Edmund Mach (FEM) – unità di ricerca di ecologia forestale (del settore CRI – Centro di Ricerca e Innovazione), che ha come scopo generale quello di investigare l'impatto del cambiamento climatico in ambiente forestale submontano e medio-montano di faggeta sulle componenti biotiche (analisi metagenomiche) e abiotiche (analisi chimico-fisiche) del suolo. Lo scopo del presente lavoro è stato quello di contribuire a quest'ultimo aspetto, investigando le proprietà chimico-fisiche di orizzonti di lettiera, organo-minerali e minerali, approfondendo anche la conoscenza delle caratteristiche morfologiche dei suoli delle aree oggetto di studio. In questo contesto, l'altitudine è stata utilizzata come proxy sperimentale per simulare e prevedere l'aumento delle temperature. Dato che, a parità di condizioni, l'altitudine influisce in modo simile all'aumento delle temperature (con un gradiente di riscaldamento progressivo man mano che si scende di quota), essa rappresenta uno strumento utile per ipotizzare come le variazioni termiche influenzano le dinamiche ecologiche di ambienti più vulnerabili come quelli naturali e forestali.

Capitolo 3

MATERIALI E METODI

3.1 Localizzazione e caratterizzazione delle aree di indagine

Le aree oggetto di studio si collocano nel versante esposto ad ovest del Monte Bondone, appartenente alle Prealpi Gardesane (Trentino – Alto Adige), nei pressi del lago di Lagolo, facente parte della Valle dei Laghi a circa 30 chilometri ad ovest della città di Trento.

La Valle dei Laghi si colloca in una zona in cui avviene la transizione, in pochi chilometri, tra clima alpino (parte settentrionale della valle) e mediterraneo (parte meridionale della valle, zona lago di Garda). Ciò, comporta un cambiamento repentino nella composizione vegetazionale dell'area. Tuttavia, i siti di studio della presente tesi sono situati nella parte settentrionale della valle in cui è presente un clima alpino caratterizzato da temperature medie invernali tra gli 0° e i 2°, temperature medie estive tra i 22° e i 23° e precipitazioni medie annue comprese tra i 950 mm e i 1100 mm.

La composizione geologica del Bondone è caratterizzata quasi esclusivamente dalla presenza di rocce sedimentare, soprattutto dolomie con caratteristiche particolarmente eterogenee. Più specificatamente, il sito di studio ricade nell'areale geologico dei Calcari Grigi (figura 8).

Il Gruppo dei Calcari Grigi affiora in Trentino – Alto Adige, Veneto e Friuli – Venezia Giulia (figura 5).

Questo Gruppo è noto fin dal 1700 soprattutto per la forte presenza di fauna marina della “facies a Lithiotis” e per la macroflora terrestre. Il contenuto fossile appena citato di questi calcari è stato essenziale per la datazione storica, la quale risulta essere negli stadi più antichi del Giurassico inferiore, ovvero: Hettangiano (196,5–199,6 milioni di anni), Sinemuriano (189,6–196,5 milioni di anni) e Pliensbachiano (183,0–189,6 milioni di anni) (Avanzini et al., 2007).

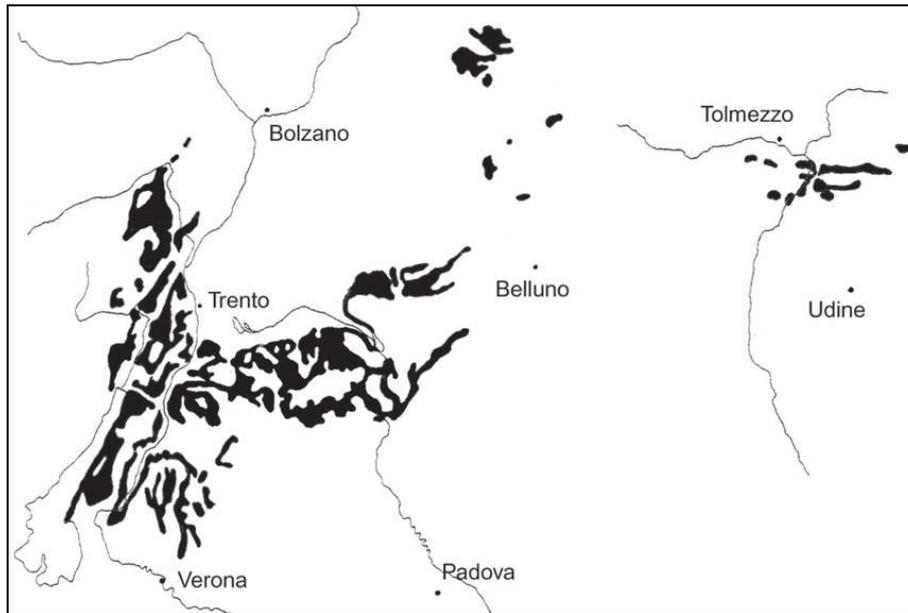


Figura 5 - Areale geologico del Gruppo dei Calcari Grigi

Il Gruppo dei Calcari Grigi presenta quattro formazioni: Formazione di Monte Zugna, Calcarea Oolitica di Loppio, Formazione di Rotzo e Calcarea Oolitica di Massone.

La Formazione di Monte Zugna è la base di questo Gruppo, ha uno spessore che va da un massimo di 250–300 metri (Paganella) ad un minimo di 130-150 metri (settore nord-occidentale nei pressi di Andalo e Monte Calisio) e sono riconoscibili tre associazioni di facies (generalmente sovrapposte): *i*) calcari prevalentemente micritici od oolitico bioclastici, *ii*) calcari stromatolitici e, *iii*) calcari micritici pseudonodulari e marne scure. All'interno di questa formazione sono inoltre riconoscibili resti di alghe, piccoli gasteropodi, echinodermi, bivalvi e coralli (Avanzini et al., 2010).

Il Calcarea Oolitica di Loppio, invece, corrisponde al membro medio della precedente suddivisione dei Calcari Grigi (in quanto solo recentemente è stato inserito il Calcarea Oolitica di Massone), lo spessore varia da 0 metri (località Mez Pian e Laghi di Lamar) a 50-60 metri (Paganella), ha una colorazione biancastra e grigio chiara ed è costituito da una successione di calcari oolitici grossolani in prevalenza a cemento spatico (grainstone). Dal punto di vista paleontologico presenta le stesse forme di foraminiferi (eucarioti eterotrofi marini) ed alghe descritte precedentemente (Avanzini et al., 2010).

La Formazione di Rotzo risulta essere l'unità che rappresenta in modo migliore il Gruppo dei Calcari Grigi, lo spessore è mediamente di 150 metri (Avanzini et al., 2010; Barbieri et al., 2007) ed è suddivisibile in due associazioni di facies sovrapposte (che possono essere molto ridotte oppure del tutto assenti): *i*) litofacies inferiore, caratterizzata da prevalenza di calcari

marnosi e, *ii*) litofacies superiori, caratterizzata dalla presenza dei cosiddetti banchi a Lithiotis (figura 6).



Figura 6 - Formazione di Rotzo, Eremo di S.Colombano, Trentino. (foto M. Avanzini)

Infine il Calcere Oolitico di Massone che, come detto precedentemente, è stato inserito solo recentemente all'interno del Gruppo. Si presenta in strati di grainstone che vanno da centimetrici a metrici con una colorazione tipica grigio chiaro-bianca e da un complesso di barre oolitiche con spessori oltre i 100 metri nel settore occidentale della piattaforma di Trento (lungo la dorsale del Monte Baldo), i quali si riducono rapidamente fino a scomparire verso est in corrispondenza degli altopiani di Folgaria-Lavarone, del Pasubio e del Lessini centrali.

3.2 Schema sperimentale di campionamento e analisi morfologica dei suoli

3.2.1 Schema sperimentale

Il campionamento del suolo (lettiera, orizzonte organo-minerale e minerale) è stato eseguito dai tecnologi della squadra di ricerca di ecologia forestale della FEM, e i rilievi morfologici sono stati effettuati in coerenza con l'impostazione di campionamento prefissato. Nello specifico, sono stati campionati otto siti di studio, di cui la Fondazione possedeva già dati pregressi sul soprassuolo, collocati in un range altitudinale tra i 871 e i 1510 m s.l.m. con variabili ambientali il più possibile fisse. Le caratteristiche a cui si è fatto riferimento sono: *i*) tipologia forestale, caratterizzato da prevalenza di *Fagus sylvatica* (L.); *ii*) la quota, i siti hanno

una differenza altitudinale di circa 100 m; *iii*) geologia, i siti ricadono nella zona dei Calcari Grigi con alcune variazioni specifiche; *iv*) l'esposizione, ovvero ovest.

Tuttavia, successivamente alle analisi, ci si è accorti che il sito numero 5 presentava un'esposizione non coerente con gli altri siti e, per ovviare a tale problema, è stato scartato. Di seguito vengono riportati i dati analitici anche di esso ma questi non sono stati inclusi nella trattazione statistica.

In Tabella 1 e nelle figure 7 - 8 sono riportati i siti con le principali caratteristiche topografiche e geologiche.

Tabella 1 – Caratteristiche topografiche e geologiche dei siti (Monte Bondone, TN)

SITO	ESPOSIZIONE	TIPOLOGIA FORESTALE	ALT	GEOLOGIA (substrato)	PENDENZA (gradi)	PIANO FORESTALE	PARTICELLA FORESTALE	COORDINATE (WGS84 °N, °E)
P_8	W	Pineta con faggio o specie nobili	871	Calcare Oolitico di Massone	29.05	4	338	46.041954°, 11.000382°
P_1	W	Faggeta tipica a dentarie	1035	Formazione di Rotzo	20.90	3	842	46.051406°, 11.005773°
P_2	W	Faggeta tipica a dentarie	1093	Formazione di Rotzo	20.42	6	356	46.056544°, 11.007616°
P_3	W	Faggeta tipica a dentarie	1194	Formazione di Monte Zugna	23.83	8	356	46.054579°, 11.011720°
P_4	W	Faggeta tipica a dentarie	1317	Formazione di Loppio	23.83	20	827	46.046877°, 11.014115°
P_5	N - W	NA	1393	Formazione di Rotzo	NA	NA	NA	46.053214°, 11.023062°
P_7	W	Faggeta tipica a dentarie	1423	Calcare Oolitico di Loppio	27.46	12	836	46.037123°, 11.017309°
P_6	W	Faggeta tipica a dentarie	1510	Calcare Oolitico di Massone	34.18	22	827	46.041907°, 11.022709°

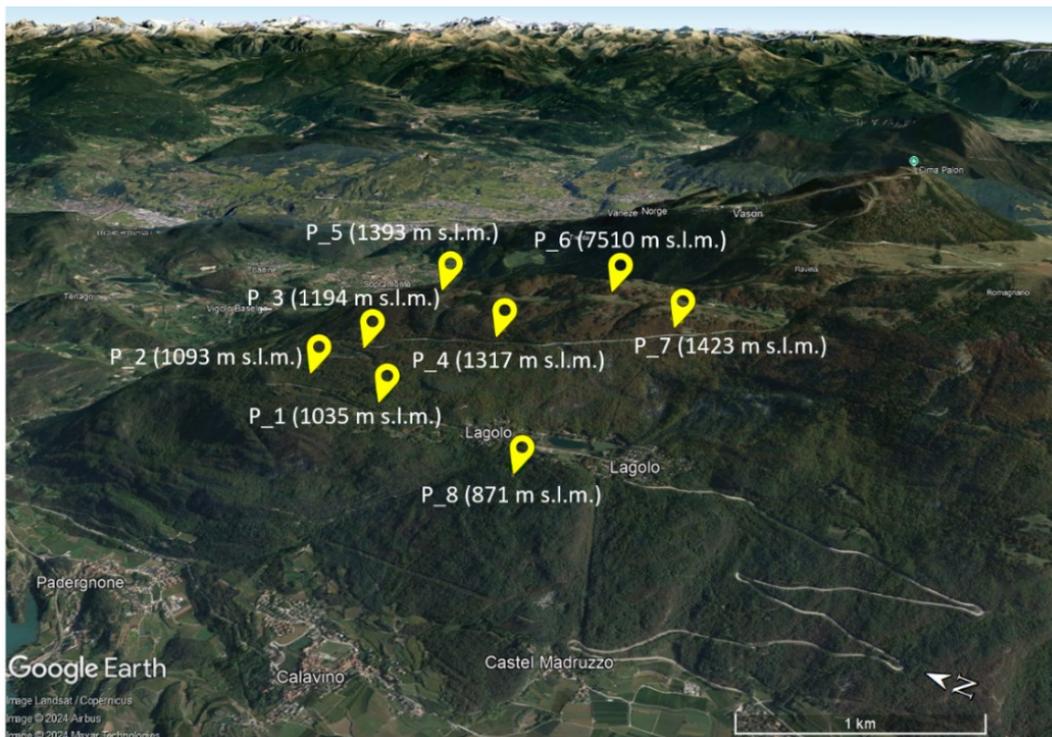


Figura 7 - Siti di campionamento, versante ovest del Monte Bondone

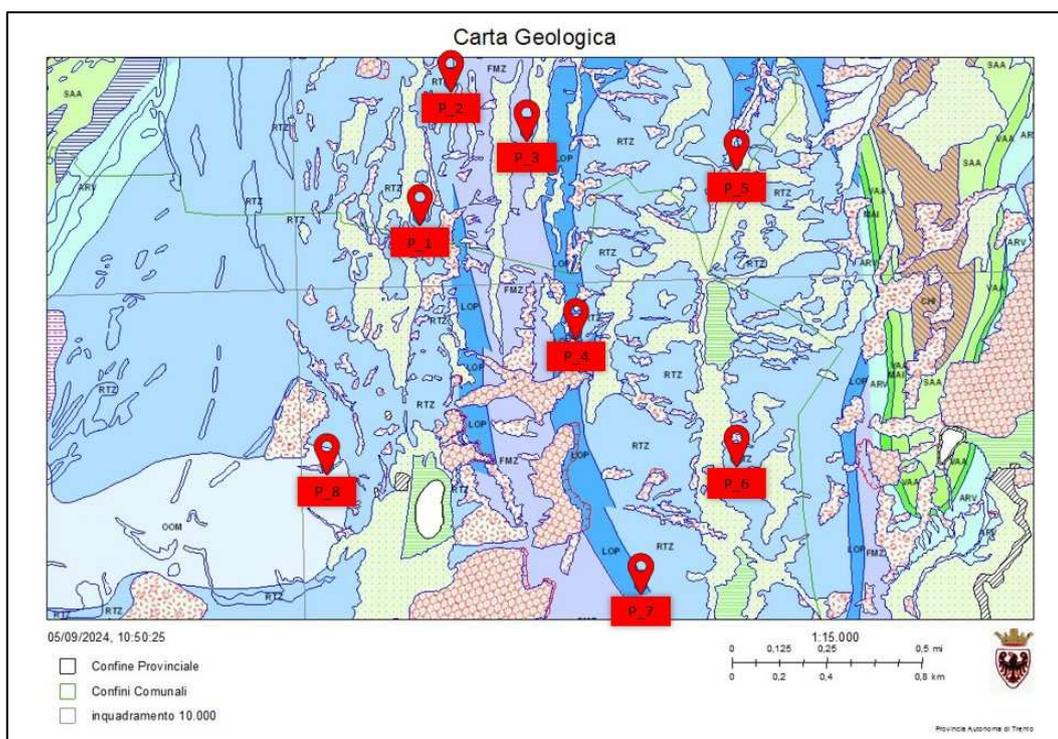


Figura 8 – Carta geologica dell'area dei siti di studio

Ogni sito di indagine copre un'area di saggio circolare avente raggio di 15 metri, all'interno di essa sono stati individuati cinque punti di prelievo del campione di suolo: uno centrale e quattro disposti e orientati verso i principali punti cardinali ad una distanza compresa tra i 2 e 5 metri da quello centrale (figura 9). Una volta identificati tali punti, per ogni sito l'approccio di campionamento condotto prevedeva la raccolta di campioni di: *i*) lettiera (orizzonti genetici O), *ii*) orizzonti organo-minerali (OR), corrispondente genericamente ad un orizzonte genetico A (circa 30 cm) e, *iii*) orizzonti minerali (MIN), corrispondente genericamente ad un orizzonte genetico A sottosuperficiale o A/C.

I campioni raccolti sono stati successivamente analizzati dal punto di vista fisico e chimico.

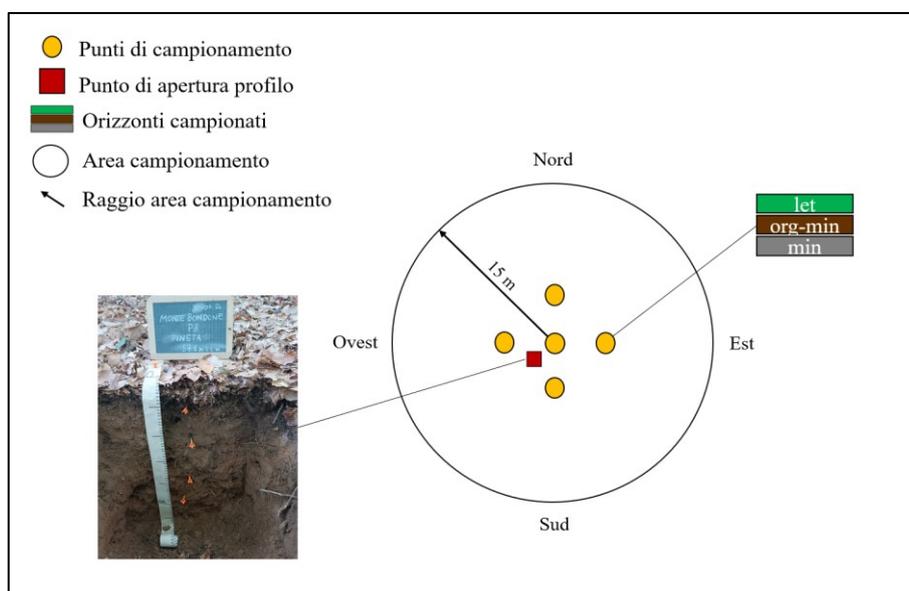


Figura 9 - Schema di campionamento

3.3 Preparazione del campione di lettiera del suolo

Una volta in laboratorio, i campioni di lettiera sono stati sottoposti a essiccamento e triturazione. I campioni di suolo, sia organo-minerali che minerali, invece, sono stati sottoposti a essiccamento, setacciatura a 2 mm e rimozione dello scheletro. Solo successivamente ad esse, per i campioni di suolo, è stata fatta la tessitura.

3.3.1 Essiccamento

Si è proceduto con l'essiccamento, a temperatura e umidità ambientale, sia dei campioni di lettiera che di suolo. Procedura che ha come obiettivo la riduzione dell'attività biologica nei campioni per limitarne l'alterazione.

3.3.2 Triturazione lettiera

La riduzione della dimensione delle componenti della lettiera ha previsto l'utilizzo di un tritatore elettrico che ha permesso di ottenere una frazione di campione più omogenea che è stata poi vagliata a 0.1 mm. Con il campione così trattato si è proceduto con l'analisi del contenuto di carbonio e azoto totale.

3.3.3 Setacciatura a 2 mm e rimozione dello scheletro del suolo

La setacciatura e la rimozione dello scheletro (particelle con $\varnothing > 2$ mm) sono operazioni fondamentali perché tutte le ulteriori analisi vengono svolte per convenzione sulla frazione di suolo più reattiva ed omogenea, ovvero quella con particelle di dimensione inferiore ai 2 mm. Il campione viene grossolanamente sminuzzato con mortaio e pestello di ceramica e successivamente vagliato tramite setacci con una maglia con lume di 2 mm (figura 10). Un'aliquota della terra fine che viene raccolta sotto i 2 mm è macinata più finemente tramite mortaio di agata e nuovamente setacciata con conseguente raccolta del campione le cui particelle hanno un $\varnothing < 0.1$ mm.

In seguito, per tutto il suolo non passato per il setaccio provvisto di maglia con dimensione di 2 mm ci si avvale ulteriormente del mortaio in ceramica e del pestello. Attraverso l'applicazione di una forte pressione ed il movimento rotatorio del pestello avviene la disgregazione del suolo il quale, poi, viene fatto passare un'ulteriore volta nei setacci. infine, dopo aver svolto tale operazione diverse volte, viene eliminata manualmente tutta la parte del campione formato da particelle superiori ai 2 mm, detta scheletro.



Figura 10 - Mortaio e vaglio

3.4 Analisi fisiche

3.4.1 Tessitura

L'analisi della tessitura svolta ha previsto l'utilizzo del metodo della pipetta (Day, 1965) basato sull'applicazione della legge di Stokes.

Ad ogni campione di suolo sono stati prelevati 20 gr ed aggiunti 100 ml di H₂O e posti successivamente nell'agitatore meccanico per un tempo corrispondente a 2 ore. Dopo di che è stato svolto il setacciamento con l'utilizzo di 5 setacci aventi maglie di differente dimensione, cioè: 0.5 mm, 0.25 mm, 0.1 mm e 0.053 mm. Grazie ad essi è possibile svolgere la separazione della sabbia molto grossa, grossa, media, fine e molto fine. Tutte le particelle fermatesi nei setacci sono state asciugate in stufa ad una temperatura di 50 °C e pesate una volta raffreddate (figura 11).

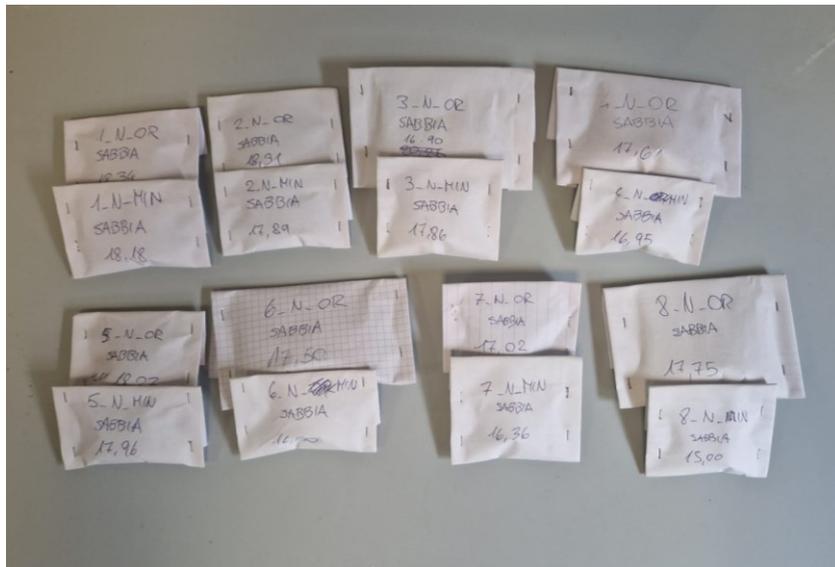


Figura 11 - Buste con sabbia pesata dopo l'asciugatura in stufa

La soluzione rimanente nel fondo dell'ultimo setaccio è quindi composta da acqua, argilla e limo, ovvero le particelle non bloccate dalle maglie dei setacci. Questa soluzione rimanente è versata in un cilindro, all'interno del quale viene aggiunta acqua distillata fino a che il livello di essa non raggiunge i 30 cm di altezza (figura 12).

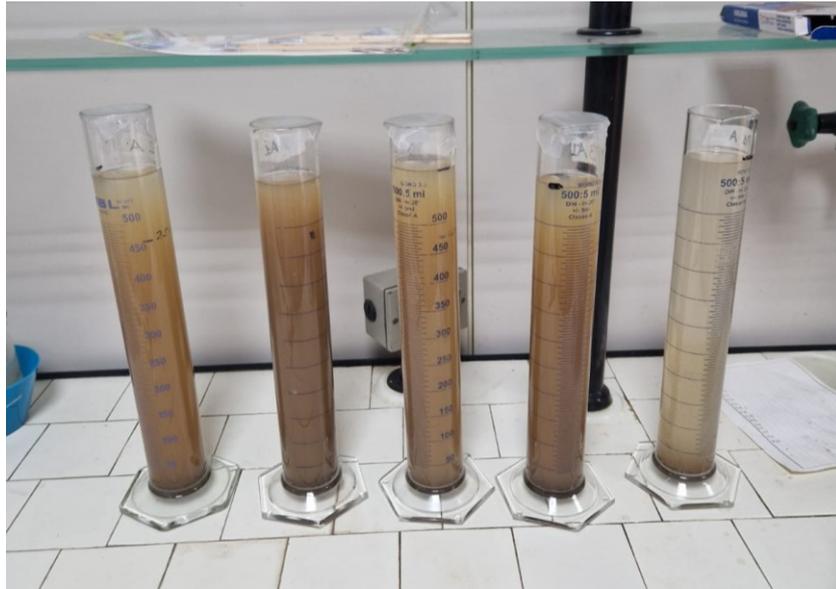


Figura 12 - Cilindri per la tessitura

Successivamente si procede con il campionamento diretto di una parte di sospensione a profondità e tempi prefissati mediante una pipetta, in particolare vengono prelevati 10 ml ad altezze note e posti in stufa per essere essiccati ed in seguito pesati in modo da ricavare la massa corrispondente di limo e argilla.

Dopo di che la sospensione è mescolata per alcuni secondi e lasciata risposare. Quest'ultima fase permette la deposizione delle particelle di limo che corrispondono alla tipologia a quelle con diametro maggiore di 0.002 mm. Grazie a ciò si può successivamente proseguire con il calcolo del peso dell'argilla svolgendo un ulteriore prelevamento di 10 ml e fatti anch'essi essiccare in stufa.

Il peso corrispondente a limo si ricava grazie alla differenza con il peso ottenuto in precedenza. La legge di Stokes permette di ricavare il tempo di prelevamento (t) utile per far sì che avvenga la separazione delle diverse frazioni; infatti, la formula utilizzata è:

$$t = \frac{18 * \eta l * h}{(\rho_s - \rho_l) * g * d^2}$$

Dove:

η = viscosità della soluzione

ρ_s = densità delle particelle

ρ_l = densità della soluzione

h = altezza percorsa da particelle di un definito diametro

g = accelerazione gravitazionale

d = diametro della particella

Una volta determinata la distribuzione granulometrica delle particelle, per definire la classe tessiturale dei campioni ci si avvale del triangolo della tessitura USDA (figura 13).

Quest'ultimo permette di determinare la nomenclatura del suolo in base alle percentuali di: sabbia, limo e argilla corrispondenti alla porzione di terra fine dei campioni che presenta diametro inferiore ai 2 mm.

Nello specifico, la terra fine comprende:

- Sabbia: particelle con dimensioni comprese tra 2 mm e 0.05 mm;
- Limo: particelle di dimensioni comprese tra 0.05 mm e 0.002 mm;
- Argilla: particelle con dimensioni inferiori a 0.002 mm

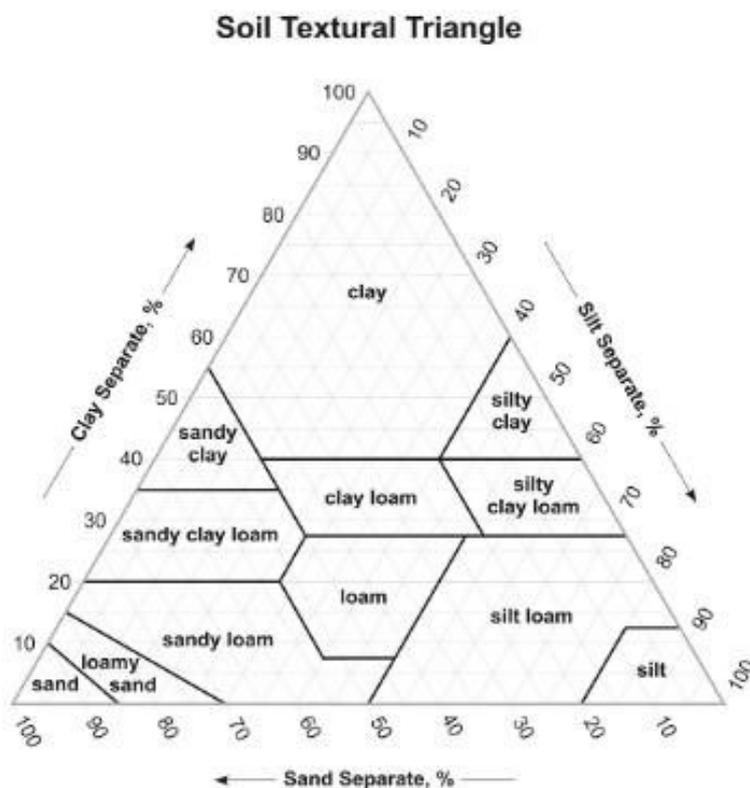


Figura 13 - Triangolo della tessitura USDA

3.5 Analisi chimiche

3.5.1 pH

Per la determinazione del pH di campioni di suolo minerale sono stati prelevati 5 gr e aggiunti 12.5 ml di acqua deionizzata, seguendo quindi un rapporto 1:2.5. Successivamente il composto ottenuto, situato in un barattolo di plastica, è stato messo in agitatore meccanico per un tempo pari a 2 ore (figura 14).



Figura 14 - Agitatore meccanico

I campioni di lettiera e di suolo organico, avendo un quantitativo di sostanza organica superiore, hanno richiesto un adattamento al metodo ufficiale ed è stato adottato un rapporto suolo:acqua pari a 1:8 e un tempo di contatto di 24 ore. Il composto finale, mantenendo il precedente rapporto, non avrebbe avuto una quantità di soluzione minima per la misurazione del pH. Trascorso il tempo necessario la soluzione viene lasciata decantare circa 30 minuti per poi procedere con la determinazione del pH tramite piaccametro (figura 15).

Prima di ciascun set di campioni lo strumento viene calibrato con l'utilizzo con due soluzioni standard a pH noto, ovvero: soluzione tampone a pH 7.01 (neutra) e una a pH 4.01 (acida). Infine, una volta fatta la calibrazione dello strumento, l'elettrodo è stato sciacquato con acqua distillata e asciugato per procedere poi con l'analisi dei campion (figura 15).



Figura 15 - Piaccametro e elettrodo

3.5.2 analisi del Carbonio Totale (TC) e Azoto Totale (TN)

Per l'analisi relativa al carbonio e azoto totale presenti all'interno dei campioni di lettiera e suolo è stato utilizzato un analizzatore elementare CHN (figura 16)



Figura 16 - Analizzatore elementare CHN

I campioni, preparati secondo le modalità precedentemente descritte, sono stati pesati tramite bilancia con sensibilità al mg (circa 1.5 mg e 1.0 mg per minerale e lettiera rispettivamente) e inseriti capsule di stagno e chiuse con pinzette (figura 17).



Figura 17 - Capsule di stagno e bilancia

Prima di proseguire con l'analisi dei campioni è indispensabile svolgere la calibrazione dell'analizzatore elementare attraverso l'utilizzo di uno standard (atropina), che presenta i valori di carbonio e azoto a concentrazione nota. Quest'ultima fase descritta è bene svolgerla pure durante l'analisi dei campioni per essere certi che il macchinario rimanga calibrato e che quindi lavori in maniera corretta. Come ultimo passaggio avveniva il posizionamento delle capsule negli appositi fori dell'analizzatore e da computer veniva avviato il processo di bruciatura e analisi.

La combustione avviene ad alte temperature (900°-1200°) in atmosfera arricchita di ossigeno, essa porta all'ossidazione di tutti gli elementi organici e inorganici presenti nel campione e li trasforma in gas semplici, ovvero: il carbonio viene ossidato a CO₂ e l'azoto ossidato a NO_x (ossidi di azoto) e poi ridotto a N₂ (azoto molecolare). Oltre ai gas appena citati si presentano pure alcuni sotto prodotti, tra cui il vapore acqueo.

Successivamente, per mezzo di un gas di trasporto (l'elio), i gas ottenuti dalla combustione sono trasportati all'interno di una colonna cromatografica che separa i composti e li analizza. La colonna cromatografica presenta due diverse fasi, cioè: *i*) una fase stazionaria, al cui interno può essere composta da un materiale solido o liquido che interagisce con i gas e, *ii*) una fase mobile che trasporta i gas combusto lungo la colonna.

L'analisi dei composti avviene grazie alle differenti proprietà fisiche di essi, ovvero: *i*) il vapore acqueo viene rimosso grazie ad un essiccatore chimico come Mg(ClO₄)₂ o P₂O₅, *ii*) la CO₂, essendo più pesante e polare rispetto all'azoto, ha una maggiore interazione con la fase stazionaria della colonna e impiega più tempo ad attraversarla e, *iii*) l'N₂ che, essendo più leggero e meno polare rispetto all'anidride carbonica, attraversa la colonna velocemente. È proprio grazie a questa separazione temporale tra i gas che un rilevatore di conducibilità termica (TCD) è in grado di rilevare essi e produrre segnali che permettono la quantificazione.

3.6 Elaborazione dei dati e analisi statistica

L'analisi multivariata è stata eseguita nel software R (versione 4.0.3) per l'interpretazione dei risultati. La Principal component analysis (PCA) è stata eseguita al fine di raggruppare orizzonti con le stesse proprietà fisico-chimiche [pacchetto R "FactoMiner"], identificando i parametri che maggiormente guidano la separazione.

L'analisi della varianza (ANOVA) a due vie è stata eseguita al fine di investigare differenze nei parametri fisico-chimici analizzati, considerando l'altitudine e l'orizzonte (lettiera, organo-minerale, e minerale) come fattori. Gli assunti di applicabilità dell'analisi ANOVA sono stati valutati eseguendo il test Shapiro-Wilk e il test Levene (R pacchetto R "car") entrambi al 5% di significatività per normalità e omoschedasticità, rispettivamente. In caso di dati non parametrici, il dato è stato trasformato attraverso "trasformazione BoxCox" e gli assunti di normalità e omoschedasticità sono stati valutati sui residui dei dati trasformati entrambi al 5% di significatività. Un'ANOVA a due vie su dati non trasformati è stata adottata anche quando la normalità era violata, grazie alla robustezza del test con dati non normali (Schmider et al., 2010). Il test ANOVA è stato considerato significativo con $p \leq 0.05$. I dati relativi al P_5 sono stati esclusi dalla trattazione statistica perché non rispondenti ad alcuni parametri comuni agli altri siti.

Capitolo 4

RISULTATI E DISCUSSIONI

4.1 Descrizione morfologica dei profili

La descrizione morfologica dei profili è riportata in Tabella 2 e le figure 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24 rappresentano i profili.

Generalmente, l'orizzonte organico presenta una lettiera composta principalmente da foglie di faggio, faggioline e rami, ad eccezione del profilo 8, dove si è osservata la presenza di aghi, rami e strobili di pino.

La successione dello strato organico di lettiera tipica di questi suoli è caratterizzata dalla presenza di un orizzonte OL soprastante ad un orizzonte OH, con una profondità variabile rispettivamente tra 4 e 9 cm e 1 e 6 cm. Alcune eccezioni alla sequenza degli orizzonti organici sono evidenti nel profilo P_2 (assenza di OH) e P_6 (assenza di OH e presenza di un OF).

L'orizzonte organo-minerale (A e AB) è ben distinguibile in quasi tutti i profili, principalmente per la colorazione scura che varia dal nero al marrone scuro. La profondità e lo spessore di questo orizzonte mostrano una maggiore variabilità rispetto all'orizzonte organico (profondità minima 19 cm e massima 61 cm). La struttura è generalmente molto sviluppata, con dimensioni degli aggregati prevalentemente "fini" e con forme granulari o a blocchi, sia angolari che subangolari. Le radici sono state riscontrate soprattutto nelle porzioni più superficiali dell'orizzonte, con una presenza significativa di radici di grosso diametro oltre a quelle di piccole dimensioni. Questo può anche essere dovuto alla presenza di scheletro che, negli orizzonti sub-superficiali (Bw e A/C), è del 60% circa, con dimensioni che raggiungono i decimetri. La consistenza risulta generalmente leggermente o moderatamente appiccicosa, con una plasticità leggera.

Il profilo 8 presenta un orizzonte peculiare, individuato come orizzonte Bh la cui genesi è ipoteticamente dovuta alla diversa composizione della lettiera rispetto agli altri siti. Il suffisso "h" (che identifica un orizzonte sombric) viene utilizzato solamente per orizzonti pedogenetici B e indica la presenza di un accumulo illuviale di sostanza organica. Questa situazione si riscontra generalmente nelle regioni fredde, in ambiente acido e sotto conifere, dove la lettiera

acidifica la matrice e mobilizza le sostanze umiche, che vengono trasportate in profondità da eventi piovosi e accumulandosi comportano una colorazione scura dell'area interessata da questo fenomeno.

Per quanto riguarda la classificazione, i suoli sono stati denominati secondo la Soil Taxonomy (SSS, 1999). È stata riportata una ipotesi di classificazione poiché la conferma della correttezza nell'attribuzione dei sottogruppi può essere certificata solamente da specifiche analisi. I profili P_1, P_3, P_4 e P_6 sono stati classificati come Mollisol, più specificatamente Typic Hapludoll. Questa classificazione indica la presenza dell'orizzonte mollic in ambiente con regime di umidità del suolo udico e in assenza di altre evidenze pedogenetiche, ad eccezione del P_6 dove è molto evidente la presenza di scheletro di dimensioni decimetriche che ha condotto ad un Skeletic Hapludoll. Il Profilo 7, data l'assenza di orizzonti cambic (Bw), è rientrato nell'ordine degli Entisol, dove la presenza di orizzonti A molto scuri fa supporre un Typic Haplorthent, poiché l'orizzonte mollic è escluso perché i valori di pH (mostrati successivamente) fanno ipotizzare una saturazione in basi (SB) < 50%. Similmente per il profilo P_2 e P_8 dove però la presenza di orizzonti cambic ben espressi ha permesso la classificazione come Inceptisol (Typic Dystrudept).

Tabella 2. Proprietà morfologiche dei suoli del Monte Bondone, Trento (Italia). Codici secondo Schoeneberger et al. (2012). Per i simboli guardare la legenda.

Orizzonte	Profondità cm	Spessore cm	Limite ^a	Colore ^b	Struttura ^c	Radici ^d	Scheletro ^e	Consistenza ^f	Osservazioni ^g
<i>Profilo 1 (P_1) – Typic Hapludoll (Mollisol)</i>									
OL	0-4	4-10	aw						foglie, faggioline e rami.
OH	4-6	2-5	cw						
A1	6-21	7-15	cw	10 YR 3/2	3 vf-m gr; vf-m sbk	3 vf-m; 1 c; 2 vc	2% cm	d (so), (w) so, (w) ps	
A2	21-35	11-17	cw	10 YR 3/2	3 vf-m sbk; vf, f gr	3 vf-m; 2 c; 1 vc	2% cm	d (so), (w) so, (w) ps	
A3	35-48	9-16	cw	10 YR 3/2	3 vf-f gr; vf-m sbk	3 vf, f; 2 m	40% cm	d (so), (w) so, (w) ps	
A/C	48-52+			10 YR 3/2	3 vf-f gr; vf-f sbk	2 vf, f	70% cm	d (so), (w) so, (w) ps	
<i>Profilo 2 (P_2) – Typic Dystrudept (Inceptisol)</i>									
OL	0-8	8-11	cw						
OLt/A	8-16	4-10	aw	10 YR 2/1	3 vf gr	3 vf; 1 f		d (so), (w) so, (d) po	Presenza di ife.
AB	16-19	3-4	cs	10 YR 3/2	3 vf-vc gr; m sbk	1 vf, f, vc, m		d (so), (w) so, (w) ps	Presenza di ife.
Bw1	19-37	16-17	cw	10 YR 3/3	1 vc; 3 vf-m sbk abk	2 vf-m; 1 vc	10% cm	d (so), (w) so, (w) p	
Bw2	37-57+			10 YR 4/4	3 vf sbk abk	1 vf, f, m, vc; 2c	10% cm dm	d (sh), (w) so, (w) ps	
<i>Profilo 3 (P_3) - Typic Hapludoll (Mollisol)</i>									
OL	0-7	4-7	aw						Presenza ife.
A1	7-20	12-17	cw	10 YR 2/2	3 vf-m gr; vf-m sbk	3 vf,f; 2 m-vc; 1vc	35% cm dm	d (so), (w) so, (w) po	
A2	20-38	14-20	cw	10 YI 3/2	3 vf, f sbk; f, m abk	2 vf-m; 1 c, vc	45% dm	d (so), (w) ss, (w) ps	
Bw	38-57+			10 YR 3/3	3 vf, f sbk abk	1 vf, f, vc	10% dm	d (so), (w) ss, (w) p	
<i>Profilo 4 (P_4) - Typic Hapludoll (Mollisol)</i>									
OL	0-5	4-7	cl						foglie, faggioline e rami.
OH	5-13	5-9	cl						
A1	13-19	5-10	cw	10 YR 2/1	3 vf, f gr sbk	3 vf, f	5% cm dm	d (so), (w) so, (w) ps	
A2	19-52+			10 YR 2/1	3 vf, f gr sbk	3 vf, f; 1 m, c, vc	70% cm dm	d (so), (w) so, (w) ps	

Profilo 6 (P_6) - Skeletic Hapludoll (Mollisol)

OL	0-5	5-6	aw						
OF	5-10	4-9	aw			3 vf, f; 1 m, c			
A/C1	10-26	16-26	cw	5 YR 2.5/1	3 vf, f gr; vf, f sbk	3 vf, f; 2 m, c	60% dm	d (h), (w) ss, (w) ps	
A/C2	26-67+			7.5 YR 2.5/1	3 vf-m abk	2 vf, f	60% dm	d (h), (w) ss, (w) ps	

Profilo 7 (P_7) - Typic Haplorthent (Entisol)

OL	0-9	5-9	cl						foglie, faggiolo e rami. ife fungine.
OH	9-15	6-11	cl						
A1	15-20	4-5	cl	10 YR 2/1	3 vf, f gr sbk	3 vf, f, m	2% mm	d (so), (w) so, (w) po	
A2	20-36	14-17	cw	10 YR 2/2	3 vf-f gr sbk	3 vf-f; 2 c, vc	1% mm	d (so), (w) so, (w) ps	
A3	36-61+			10 YR 2/2	2 vf, f gr; vf, f, m sbk	3 vf, f, m; 2 c, vc	2% mm cm	d (so), (w) so, (w) so	

Profilo 8 (P_8) - Typic Dystrudept (Inceptisol)

OL	0-6	3-7	al						foglie, faggiolo e rami di faggio e pino, strobili.
OH	6-11	1-5	cw						
A	11-24	4-13	cw	10 YR 3/3	3 vf gr; vf-co sbk	3 vf, f; 1 m	2% cm	d (so), (w) ss, (w) ps	
Bh	24-39	4-14	cl	10 YR 4/3	3 vf-m sbk	2 vf, f	2% mm cm	d (so), (w) ss, (w) ps	
Bw1	39-49	10-33	cw	10 YR 4/3	3 vf gr; vf-m sbk	3 vf, f; 2 m	10% cm dm	d (so), (w) ss, (w) ps	
Bw2	49-63+			10 YR 4/4	3 vf-m sbk	2 vf, f	20% mm-dm	d (sh), (w) so, (s) po	

^a V=molto abrupto, A=abrupto, C=chiaro, G=graduato; S=lineare, W=ondulato, I=irregolare.

^b umido, determinato seguendo Munsell Soil Color Charts (Edizione 2022).

^c m=massiva.

^d 0=assenti.

^e a vista seguendo "percent of area covered" riportato in Schoeneberger et al. (2002); mm=dimensioni millimetriche, cm=dimensioni centimetriche.

Riferito all'aggregato di suolo: d(so)=molto leggera resistenza alla rottura da secco; d(sh)=leggera resistenza alla rottura da secco; d(h)= moderata resistenza alla rottura da secco; (w)so=non adesivo; (w)ss=leggermente adesivo; (w)po= non plastico; (w)ps=leggermente plastico

^g abbondanza determinata a vista seguendo "percent of area covered" riportato in Schoeneberger et al. (2002); CH=frammenti di carbone; mm= dimensioni millimetriche, cm=dimensioni centimetriche; RMFs=caratteristiche redoximorfiche; colori determinati seguendo Munsell Soil Color Charts (Edizione 2022).



Figura 21 - Profilo P_8



Figura 20 - Profilo P_1



Figura 19 - Profilo P_2



Figura 18 - Profilo P_3



Figura 22 - Profilo P_4



Figura 23 - Profilo P_7



Figura 24 - Profilo P_6

4.2 Caratterizzazione fisica e chimica dei suoli

La tabella 3 mostra le caratteristiche fisiche attraverso la definizione della tessitura (sabbia, limo e argilla) dei punti di campionamento.

In questo caso non è presente la lettiera in quanto le frazioni in esame non risultano presenti in essa.

La frazione maggiormente rappresentata nei campioni organo-minerali e minerali è quella sabbiosa, con percentuali che vanno dall'82 al 90, mentre il limo risulta essere minormente presente nei campioni di suolo organo-minerale, variando dal 3 al 6 per cento, rispetto ai campioni di suolo minerale che presentano, invece, percentuali variabili dal 7 al 13. Infine, il contenuto di argilla risulta essere simile in entrambe le tipologie di campione con percentuali che si aggirano tra il 3 e il 7.

Gli orizzonti organo-minerali hanno una classe tessiturale sabbiosa (ad eccezione del P_7 che è "sabbioso franco"), mentre gli orizzonti minerali rientrano nella classe "sabbioso franco" (esclusi i punti 3 e 5 che sono "sabbiosi"). I suoli interessati da tali tessiture sono generalmente caratterizzati da un'elevata macro-porosità che ne comporta quindi: *i*) una debole capacità di ritenzione idrica, *ii*) una rapida mineralizzazione (dovuta all'accentuato processo di ossidazione) e, *iii*) uno scarso quantitativo di elementi nutritivi (in quanto molto drenanti).

Tuttavia, è bene specificare che la tessitura non risulta essere un parametro preso in considerazione se si fa riferimento a quelli sensibili al cambio climatico in quanto, essendo legato prettamente a processi geologici e fisici più profondi e lenti, è poco sensibile ad esso.

SITO	ALT (m s.l.m.)	SABBIA		LIMO		ARGILLA		CLASSE TESSITURALE	
		%						Or	Min
		Or	Min	Or	Min	Or	Min		
P_8	871	90 (1)	82 (11)	3 (1)	13 (8)	7 (3)	5 (3)	Sabbioso	Sabbioso franco
P_1	1033	89 (4)	84 (9.)	6 (3)	11 (8)	5 (1)	5 (1)	Sabbioso	Sabbioso franco
P_2	1093	88 (4)	88 (2)	6 (0)	9 (2)	6 (4)	3 (1)	Sabbioso	Sabbioso franco
P_3	1194	90 (7)	91 (2)	3 (1)	6 (0)	7 (3)	3 (2)	Sabbioso	Sabbioso
P_4	1317	91 (4)	87 (4)	3 (1)	7 (1)	7 (5)	6 (4)	Sabbioso	Sabbioso franco
P_5	1393	92 (0)	90 (82)	5 (3)	7 (0)	3 (2)	3 (2)	Sabbioso	Sabbioso
P_7	1423	88 (4)	86 (6)	5 (3)	10 (5)	7 (1)	4 (1)	Sabbioso franco	Sabbioso franco
P_6	1510	98 (15)	90 (10)	1 (0)	8 (2)	1 (0)	2 (1)	Sabbioso	Sabbioso franco

Per quello che riguarda la caratterizzazione chimica dei suoli (tabella 4), il pH, mostra valori da subalcalini ad acidi, con un range compreso tra 7.54 a 4.62.

I valori di TC (carbonio totale) e TN (azoto totale) mostrano generalmente un andamento decrescente all'aumentare della profondità lungo il profilo (Lt > Or > Min), confermando un risultato atteso. Specificatamente, il contenuto di TC nella lettiera è mediamente di 462.7 g kg⁻¹, con valori massimi di 484.0 g kg⁻¹ e minimi di 440.9 g kg⁻¹ (rispettivamente P_8 e P_2).

Il P_2 mostra i valori minimi di TC anche negli orizzonti organo-minerali e minerali, contrariamente al P_8. I valori di TN sono più variabili. Per la lettiera il contenuto medio è pari a 17.7 g kg⁻¹, con massimi di 20.0 g kg⁻¹ e minimi di 14.9 g kg⁻¹, mentre nei campioni di suolo minerale (Or più Min), il contenuto medio è di 10.6 g kg⁻¹ con valori minimi nell'orizzonte minerale (3.60 g kg⁻¹ nel profilo P_2). Il profilo P_6 presenta un contenuto di TN costante fra le tre frazioni.

4.2.1 Effetto di altitudine e tipologia di orizzonte sui parametri chimici del suolo

La PCA (Principal Component Analysis), ha permesso di ottenere un grafico bidimensionale con un grado di spiegazione della varianza pari al 95.8%, di cui il 60.8% nella prima dimensione e il 35% nella seconda.

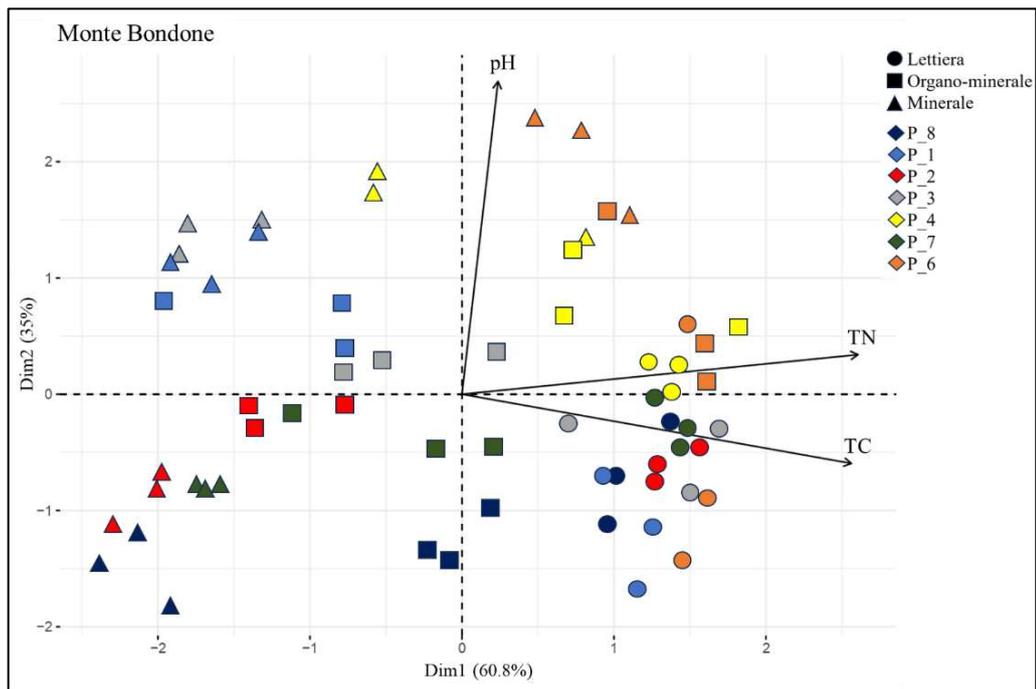


Figure 25 - PCA

Dalla figura 25 è possibile osservare una segregazione degli orizzonti di lettiera rispetto agli orizzonti organo-minerali e minerali lungo la prima dimensione, indipendentemente dall'altitudine (profilo). I risultati dell'analisi multivariata mostrano, quindi, una chiara distribuzione spaziale dei campioni, articolata come segue: *i)* nella porzione destra del grafico si trovano gli orizzonti di lettiera, al centro e a sinistra, con una distinzione meno netta, si collocano gli organo-minerali e i minerali, rispettivamente. Tale separazione è guidata dalle variabili TC e TN, che registrano loadings maggiori nella prima dimensione. Questo risultato è ulteriormente confermato dall'ANOVA a due vie, che tendenzialmente mostra una significativa decrescita dei valori di TC e TN lungo il profilo (Lt, Or e Min) a prescindere dall'altitudine. Contrariamente a queste evidenze, gli orizzonti organo-minerali e minerali nel P_6 si clusterizzano nella porzione destra del grafico insieme agli orizzonti di lettiera. Il risultato trova ulteriore supporto nei risultati dell'ANOVA, che mostrano come i valori medi di TC e TN dei campioni di suolo minerale del P_6 siano significativamente superiori a quelli degli altri siti. Questo fenomeno potrebbe essere attribuito all'altitudine del sito, che si trova a 1510 m s.l.m., un'altezza che comporta temperature medie annue relativamente più basse. Tali condizioni potrebbero aver rallentato i processi biologici, inclusi quelli di mineralizzazione della sostanza organica, determinando un turnover più lento e una più prolungata permanenza

della sostanza organica. Pertanto, maggiore è l'altitudine, maggiore è il TC e TN nell'orizzonte minerale.

Nella seconda dimensione la variabile che contribuisce maggiormente alla separazione degli orizzonti è il pH, suggerendo che le differenze nei valori di questo parametro sono il fattore discriminante lungo questo asse.

Generalmente, gli orizzonti organo-minerali e minerali si distribuiscono nel grafico associati a valori positivi nella seconda componente, ad eccezione degli orizzonti minerali dei profili P_2, P_7 e P_8, che si collocano nel quadrante negativo di sinistra. I risultati dell'ANOVA spiegano questa distribuzione poiché: *i)* gli orizzonti Min di questi profili sono significativamente inferiori rispetto agli orizzonti Min degli altri siti, inoltre *ii)* gli orizzonti Min di questi profili presentano valori significativamente più bassi rispetto a Lt e Or all'interno dello stesso sito. Ciò si discosta dal risultato atteso poiché tendenzialmente una maggiore quantità di sostanza organica, come suggerito dall'ANOVA per i parametri TC e TN negli stessi profili, è generalmente associata a pH più bassi rispetto agli orizzonti minerali in suoli che si sono evoluti su litologia calcaree, come in questo caso secondo la carta geologica. Suoli con tessitura sabbiosa o sabbioso-franca in un contesto ambientale con precipitazioni abbondanti (950-1100 mm) e temperature medie di circa 11°-12° possono indurre ad una lisciviazione più rapida dei cationi come calcio e magnesio, inducendo un progressivo abbassamento del pH. Tuttavia, nel caso specifico, poiché gli orizzonti minerali dei profili P_2, P_7 e P_8 hanno valori di pH dell'orizzonte Min significativamente più bassi rispetto a tutti gli altri siti e rispetto agli orizzonti di lettiera, si ipotizza che questa condizione sia dovuta a particolarità litologiche determinate da caratteristiche sito-specifiche. Tali differenze litologiche condurrebbero anche ad una classificazione dei suoli differenziata in tre tipi di ordine: Mollisol, Inceptisol e Entisol. In aggiunta, il sito 8 presentava una lettiera mista di conifera che potrebbe aver acidificato, anche tramite l'effetto del throughfall e stemflow, ulteriormente la matrice attivando la traslocazione delle sostanze umiche e la successiva formazione di un orizzonte Bh (Rumpel, 2004).

Tabella 4 – Caratterizzazione chimica dei suoli (Monte Bondone, TN).

Le lettere maiuscole poste come esponente indicano differenze significative lungo la stessa colonna, mentre le minuscole indicano differenze significative tra le differenti colonne.

SITO	ALT (m s.l.m.)	pH			TC			TN		
		Lt	Or	Min	Lt	Or	Min	%		
								Lt	Or	Min
P_8	871	5.62 ^{ABa} (0.30)	4.97 ^{Db} (0.20)	4.65 ^{Bb} (0.27)	48.40 ^a (1.65)	30.72 ^{ABb} (2.42)	9.69 ^{Bc} (2.47)	1.48 ^a (0.22)	1.27 ^{Ba} (0.08)	0.39 ^{Bb} (0.13)
P_1	1033	5.15 ^{Bb} (0.41)	6.51 ^{ABa} (0.23)	6.84 ^{Aa} (0.18)	45.82 ^a (1.28)	18.51 ^{Cb} (2.21)	11.20 ^{Bc} (2.00)	1.59 ^a (0.15)	0.67 ^{Bb} (0.51)	0.70 ^{Bb} (0.16)
P_2	1093	5.57 ^{ABab} (0.09)	5.81 ^{BCa} (0.11)	5.15 ^{Bb} (0.18)	44.09 ^a (1.96)	16.73 ^{Cb} (3.54)	9.10 ^{Bc} (1.55)	1.90 ^a (0.15)	0.80 ^{Bb} (0.15)	0.36 ^{Bb} (0.08)
P_3	1194	5.72 ^{ABb} (0.29)	6.15 ^{ABCb} (0.07)	7.05 ^{8Aa} (0.12)	45.91 ^a (1.79)	23.06 ^{BCb} (4.39)	11.45 ^{Bc} (2.46)	1.75 ^a (0.40)	1.23 ^{Bb} (0.26)	0.51 ^{Bc} (0.15)
P_4	1317	6.29 ^{Ab} (0.13)	6.66 ^{Aab} (0.27)	7.25 ^{Aa} (0.25)	46.65 ^a (0.71)	34.71 ^{A^b} (5.92)	21.68 ^{Ac} (5.87)	1.72 ^{ab} (0.13)	1.95 ^{Aa} (0.34)	1.43 ^{Ab} (0.46)
P_5	1393	5.82 (0.06)	5.50 (0.17)	5.15 (0.21)	45.55 (1.36)	22.46 (9.19)	9.76 (0.49)	2.00 (0.23)	1.42 (0.57)	0.40 (0.04)
P_7	1423	5.92 ^{ABa} (0.20)	5.61 ^{CDab} (0.11)	5.52 ^{Bb} (0.01)	47.14 ^a (0.25)	23.22 ^{BCb} (6.24)	12.04 ^{Bc} (0.63)	1.78 ^a (0.08)	1.26 ^{Bb} (0.34)	0.60 ^{Bc} (0.04)
P_6	1510	5.63 ^{ABc} (0.90)	6.51 ^{ABb} (0.54)	7.54 ^{Aa} (0.37)	46.83 ^a (1.18)	36.10 ^{A^b} (7.52)	25.93 ^{Ac} (3.11)	1.90 (0.12)	2.18 ^A (0.12)	2.02 ^A (0.16)

CONCLUSIONI

Gli effetti del cambiamento climatico in corso stanno avendo un impatto significativo sull'intero ecosistema forestale, influenzando vari processi ecologici e biochimici. Per investigare l'impatto che manifesta, la sezione di ecologia forestale (del settore CRI – Centro di Ricerca e Innovazione) della Fondazione Edmund Mach (FEM) ha avanzato un progetto di ricerca riguardante le componenti biotiche (analisi metagenomiche) e abiotiche (analisi chimico-fisiche) del piano altitudinale submontano e medio-montano di faggeta. Di esso, nel presente lavoro di tesi, l'attenzione è stata rivolta sulle componenti abiotiche legate al suolo poiché queste rappresentano un elemento chiave nella comprensione delle dinamiche ecosistemiche. Come variabile sperimentale per simulare e prevedere l'aumento delle temperature, è stata utilizzata l'altitudine, in quanto esiste una correlazione inversa tra questa e la temperatura: all'aumentare dell'altitudine, le temperature medie dell'aria diminuiscono in maniera genericamente prevedibile, permettendo di considerarla un proxy utile per anticipare gli effetti del cambiamento climatico. Lo studio ha previsto un approfondimento delle caratteristiche morfologiche e chimico-fisiche dei suoli posti ad altitudine crescente sul versante con esposizione ovest del Monte Bondone (TN), sotto stessa tipologia di gestione di un bosco a prevalenza di faggio. In particolare, le indagini sono state condotte su orizzonti di lettiera, organo-minerali e minerali. I risultati non hanno evidenziato differenze nette e marcate fra le altitudini rispetto ai parametri investigati (pH, TC e TN). Tuttavia, il sito posto alla quota maggiore (P_6) ha mostrato un contenuto maggiore di TC e TN, suggerendo una più lenta degradazione della sostanza organica rispetto a siti a quote inferiori. Questo risultato conferma la relazione tra aumento dell'altitudine, e quindi la diminuzione delle temperature, e una minore velocità di mineralizzazione della sostanza organica. In un contesto di aumento delle temperature medie, secondo i trend previsti dai modelli climatici, è plausibile ipotizzare che, con l'incremento delle temperature annue anche a quote più elevate, si possa osservare una maggiore accelerazione dei processi di mineralizzazione del suolo. Attualmente, a tali altitudini, la mineralizzazione risulta significativamente rallentata, favorendo una maggiore capacità del suolo di fungere da serbatoio di carbonio organico. Tuttavia, in futuro, con l'aumento delle temperature, è ragionevole aspettarsi una volatilizzazione più elevata di CO₂,

dovuta a un'accelerazione della degradazione della sostanza organica. Questo fenomeno potrebbe ridurre la capacità del suolo di immagazzinare carbonio, contribuendo così all'incremento del rilascio di gas serra nell'atmosfera e intensificando ulteriormente il cambiamento climatico. Nonostante tale risultato, l'assenza di un trend altitudinale più chiaro e definito rende difficoltosa l'elaborazione di ipotesi più solide e generalizzabili. Ciò può essere spiegato con la complessità dei fattori ambientali coinvolti nella comparazione dei siti di studio, che possono aver mascherato eventuali tendenze legate a differenze di temperature medie fra le quote considerate. Le indagini metagenomiche previste, integrate con i dati chimico-fisici già raccolti, potrebbero definire un quadro più dettagliato e definito. La particolarità di alcuni risultati ottenuti in alcuni siti di studio (P_2, P_7 e P_8), soprattutto per quanto riguarda i valori di pH, richiederebbero ulteriori approfondimenti tramite l'adozione di analisi più specifiche (es. mineralogia), per validare ipotesi quali la presenza di condizioni litologiche peculiari sito-specifiche e confermarne la classificazione attribuita. Inoltre un'analisi approfondita delle proprietà chimico fisiche per ciascun orizzonte del suolo potrebbe fornire informazioni importanti nella comprensione dei processi pedologici e pedogenetici che caratterizzano questi suoli, contribuendo a una migliore definizione all'evoluzione di orizzonte specifici, come l'orizzonte Bh del profilo 8.

BIBLIOGRAFIA

- Avanzini, M., Bargossi, G. I. U. S. E. P. P. E., Borsato, A., Selli, L., Balboni, M., Bazzoli, G., ... & Zandonai, F. (2010). Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1: 50.000, foglio 060 Trento. ISPRA Servizio Geologico d'Italia.
- Avanzini, M., Masetti, D., Romano, R., Podda, F., & Ponton, M. (2007). Calcari Grigi. *Cita Sironi MB, Abbate E., Balini M., Conti MA, Falorni P., Germani D., GropPELLI G., Manetti P. & Petti FM (a cura di), Carta Geologica d'Italia-1, 50*, 125-135.
- Baize, D., & Girard, M. C. (2009). *Référentiel pédologique 2008*. Editions Quae.
- Barbieri, G., Grandesso, P., Campana, R., Cucato, M., DEL PIERO, W., DE ZANCHE, V., ... & Zanferrari, A. (2007). Carta Geologica d'Italia alla scala 1: 50.000 con note illustrative: Foglio 082 Asiago. In *Foglio geologico*. APAT-Servizio Geologico d'Italia-Regione del Veneto. Firenze: S. EL. CA (ITALY).
- Cardelli, V., De Feudis, M., Fornasier, F., Massaccesi, L., Cocco, S., Agnelli, A., ... & Corti, G. (2019). Changes of topsoil under *Fagus sylvatica* along a small latitudinal-altitudinal gradient. *Geoderma*, *344*, 164-178.
- Carrer, M., & Urbinati, C. (2006). Long-term change in the sensitivity of tree-ring growth to climate forcing in *Larix decidua*. *New Phytologist*, *170*(4), 861-872.
- Carrer, M., Nola, P., Eduard, J. L., Motta, R., & Urbinati, C. (2007). Regional variability of climate-growth relationships in *Pinus cembra* high elevation forests in the Alps. *Journal of Ecology*, *95*(5), 1072-1083.
- Cocco, S., Corti, G., Agnelli, A., & Basili, M. (2006). Caratteristiche delle soluzioni ecologiche (Stemflow, Throughfall, Litter-leachate da cerro (*Quercus cerris* L.) in suolo acido e sub-alcino. Selva di Gallignano. In *Ancona Atti del XXIII Convegno Nazionale della Società Italiana di Chimica Agraria, Torino, 20-23 settembre 2005*.
- Crocker, R. L. (1952). Soil genesis and the pedogenic factors. *The Quarterly Review of Biology*, *27*(2), 139-168.
- Curtin, D., Beare, MH, & Hernandez-Ramirez, G. (2012). Effetti della temperatura e dell'umidità sulla biomassa microbica e sulla mineralizzazione della materia organica del suolo. *Soil Science Society of America Journal*, *76* (6), 2055-2067.

- Danby, R. K., & Hik, D. S. (2007). Variability, contingency and rapid change in recent subarctic alpine tree line dynamics. *Journal of Ecology*, 95(2), 352-363.
- De Feudis, M., Cardelli, V., Massaccesi, L., Trumbore, S. E., Antisari, L. V., Cocco, S., ... & Agnelli, A. (2019). Small altitudinal change and rhizosphere affect the SOM light fractions but not the heavy fraction in European beech forest soil. *Catena*, 181, 104091.
- Del Favero, R. (2004). *boschi delle regioni alpine italiane*. CLUEP.
- Europeo, P. (2023). Cambiamento climatico: gas a effetto serra che causano il riscaldamento globale. *Data ultima consultazione*, 24(02), 2024.
- Gandolfo, C., & Miori, M. (Eds.). (2018). *I tipi forestali del Trentino: descrizione e aspetti dinamici*. Provincia autonoma di Trento. Servizio foreste e fauna.
- Gelybó, G., Tóth, E., Farkas, C., Horel, Á., Kása, I., & Bakacsi, Z. (2018). Potential impacts of climate change on soil properties. *Agrokémia és Talajtan*, 67(1), 121-141.
- Hofmann, A. (1991). *Il faggio e le faggete in Italia*. Rome: Ministero dell'agricoltura e delle foreste.
- Jantsch, M. C., Fischer, H. S., Winter, S., & Fischer, A. (2014). How are plant species in central European beech (*Fagus sylvatica* L.) forests affected by temperature changes? Shift of potential suitable habitats under global warming. *Annali di Botanica*, 4, 97-113.
- Kankaanpää, S., & Carter, T. R. (2004). *An overview of forest policies affecting land use in Europe*. Helsinki: Finnish Environment Institute.
- Luyssaert, S., Inglima, I., Jung, M., Richardson, A. D., Reichstein, M., Papale, D., ... & Janssens, I. A. (2007). CO2 balance of boreal, temperate, and tropical forests derived from a global database. *Global change biology*, 13(12), 2509-2537.
- Nardi, S., & Pizzeghello, D. (2005). I suoli forestali. In *Fondamenti di Chimica del Suolo* (Vol. 1, pp. 319-340). Patron.
- Ranasinghe, R. (2022). Climate change 2021: Summary for all.
- regimi di temperatura e umidità: USDA - NRCS. Soil Taxonomy, 2nd Edition. Agricultural Handbook n. 436, 1999.
- Rumpel, C., Eusterhues, K., & Kögel-Knabner, I. (2004). Location and chemical composition of stabilized organic carbon in topsoil and subsoil horizons of two acid forest soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 36(1), 177-190.
- Schoeneberger, P. J., Wysocki, D. A., Benham, E. C., & Broderson, W. D. (2002). Field book for describing and sampling soils, Version 2.0.(SCHOENEBERGER et al. Eds.). *Natural Resources Conservation Service, National Soil Survey Center, Lincoln, NE*. 228 p.

- Sequi, P., Ciavatta, C., & Miano, T. (2005). *Fondamenti di Chimica del suolo*. Patron Editore, 620.
- Soil Survey Staff. (1999). **Soil taxonomy: A basic system of soil classification for making and interpreting soil surveys** (2nd ed.). U.S. Department of Agriculture Handbook 436.
- Urbinati, C., Nola, P., Carrer, M., & Motta, R. (2008). Analisi dendroecologiche per la determinazione della sensibilità climatica delle principali conifere forestali in Italia. In *Dendrocronologia per i beni culturali e l'ambiente* (pp. 85-94). Nardini.
- Urbinati, C., Sabatini, N., Lebboroni, L., Salvucci, G., & Mariani, M. (2010). Foreste in forma: quale selvicoltura nei boschi delle Marche?. *SHERWOOD. FORESTE ED ALBERI OGGI*, 161, 9-13.

RINGRAZIAMENTI

Al termine di questo mio percorso, desidero esprimere sincera gratitudine alla mia relatrice, Dott.ssa Valeria Cardelli, per i preziosi suggerimenti, la disponibilità e l'attenzione dedicata al mio lavoro. Un ringraziamento speciale va anche alla Prof.ssa Stefania Cocco, al Dott. Andrea Salvucci e alla Dott.ssa Dominique Serrani per l'aiuto che mi hanno fornito sia nelle attività di campo che di laboratorio. Questo gruppo dell'area di pedologia, oltre a guidarmi durante questo mio lavoro di tesi, mi ha permesso di capire cosa significa lavorare con professionalità all'interno di un ambiente stimolante con un clima contraddistinto da amicizia e collaborazione.

Tengo a ringraziare inoltre Damiano Gianelle, Lorenzo Frizzera, Roberto Zampedri, Isaac Chini e Mauro Cavagna dell'unità di ricerca di ecologia forestale della Fondazione Edmund Mach che, oltre ad accogliermi ed accompagnarmi durante la mia formativa esperienza di tirocinio, hanno svolto il lavoro di pianificazione della ricerca, dei campionamenti di suolo e di supporto con i dati di campo.

Un ringraziamento profondo va alla mia famiglia, grazie mamma, grazie papà e grazie Gabry, siete la mia guida e il mio punto di riferimento! Grazie per credere me e incoraggiarmi anche nei momenti di incertezza, vi voglio un mondo di bene!

Voglio ringraziare anche Francesca per essermi stata accanto in questo mio percorso, sia nella quotidianità che in ambito universitario, e di avermi sostenuto.

Ringrazio i ragazzi della "Sdrogo aus" per i momenti di gioia, spensieratezza, complicità e chilling totale che abbiamo vissuto assieme. È stato un piacere condividere casa con coinquilini e amici come voi.

Grazie ai compagni di corso per questi tre anni caratterizzati da lunghe sessioni di studio, risate e paranoie.

Un grosso ringraziamento anche agli amici dell'università con cui, nonostante non fossero del mio corso, ho legato molto e trascorso momenti che mai avrei immaginato e che, ognuno a modo proprio, mi hanno lasciato qualcosa che porterò con me.

Un grazie di cuore al gruppo dei “Celestini” a cui ormai sono legato da molto tempo e che, nonostante tutti abbiano intrapreso un po’ la propria strada, quando ci si ritrova è sempre stupendo e sembra di essersi visti il giorno prima.

Infine, non per ordine di importanza, voglio ringraziare Gian, Nico e Simo con cui quando torno condivido momenti, oltre che di grandi mangiate, pure di grandi risate e relax.