



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO
FACOLTÀ DI SCIENZE AGRARIE E ALIMENTARI

Corso di laurea in Valorizzazione e Tutela
dell'Ambiente e del Territorio Montano

La distribuzione e le proprietà biomeccaniche
dell'apparato radicale di *Betula pendula*: indagini in
due boschi del Canton Ticino (Svizzera)

Relatore: Prof. Gian Battista Bischetti

Correlatore: Prof. Massimiliano Schwarz

Elaborato finale di:
Nicole Personeni
Matr. n. 852205

Anno Accademico 2019 - 2020

Sommario

Riassunto	4
1. Introduzione	5
2. Il dissesto idrogeologico	6
2.1. Le frane.....	6
2.2. Vegetazione e difesa del suolo.....	9
2.3. Il bosco di protezione	12
2.3.1. La funzione protettiva	13
2.3.2. La gestione del bosco di protezione.....	15
3. Obiettivi del lavoro di tirocinio.....	17
4. Materiali e metodi.....	18
4.1. <i>Betulla pendula</i> (Roth)	18
4.1.1. Biologia ed ecologia.....	18
4.1.2. La distribuzione in Europa.....	20
4.2. Aree di lavoro	21
4.3. Campagna di misure.....	24
4.3.1. Procedura	24
4.3.2. Selezione degli esemplari.....	24
4.3.4. Prove di pull-out.....	29
5. Analisi dati e risultati.....	35
5.1. La distribuzione media orizzontale	35
5.2. La distribuzione media verticale	39
5.3. La distribuzione in uno scavo completo.....	42
5.4. Le prove di pull-out	46
6. Discussione.....	47
6.1. Distribuzione orizzontale.....	47
6.2. Distribuzione verticale.....	48
6.3. Le prove di pull-out	49
7. Conclusioni	50
Ringraziamenti	51
8. Bibliografia	52

Riassunto

La betulla bianca, *Betula pendula* (Roth), è una specie pioniera caratterizzata dalla capacità di colonizzare velocemente suoli privi di altra vegetazione arborea (come i pascoli abbandonati) o perturbati da eventi ad alto grado di disturbo (slavine, frane e/o incendi). Viene anche definita una specie transitoria perché, data la capacità di crescita su terreni difficili, è in grado di creare delle condizioni favorevoli per altre specie più esigenti.

Lo scopo di questo lavoro è comprendere come si sviluppa l'apparato radicale di betulla e le proprietà biomeccaniche delle radici in relazione al loro diametro per una più ampia valutazione del rinforzo radicale di *Betula pendula*.

Per la raccolta dati sono stati selezionati due boschi in Canton Ticino (Svizzera) situati nei comuni di Cugnasco e Arbedo. Per comprendere la distribuzione orizzontale e verticale degli esemplari adulti di betulla si è proceduto utilizzando il metodo delle trincee e uno scavo completo. Il metodo delle trincee consiste nello scavare una buca a tre diverse distanze (1,5 m, 2,5 m e 3,5 m) e contare tutte le radici di betulla presenti in questi scavi classificandole per classi diametriche e profili di profondità. Per lo scavo completo sono state scavate due trincee sulle circonferenze a 1,5 m e 2,5 m, contate come nel metodo precedente, e poi l'esemplare è stato estratto tagliando le radici a 1,5 m e trasferito per un riconteggio. Per le proprietà biomeccaniche si è proceduto con delle prove di pull-out: con un macchinario apposito sono state sottoposte a una trazione statica radici di diversi diametri ai fini di quantificare la forza massima di rottura a cui resistono.

Per l'analisi dati sulle distribuzioni è stata prima calcolata la distribuzione media delle radici degli esemplari adulti, in seguito è stato fatto un paragone tra le diverse distanze degli scavi e anche tra i due diversi siti di studio per comprendere eventuali differenze. Per le prove di trazione sono stati ricavati i dati dalle misurazioni e poi si è proceduto con il rappresentare graficamente il rapporto tra forza-diametro delle singole radici al fine di ottenere una curva di regressione da cui ricavare le costanti necessarie al calcolo del rinforzo radicale.

Dai risultati emerge che l'apparato radicale di *Betula pendula* tende a svilupparsi nei primi 60 cm di profondità del suolo soprattutto con radici di classi diametriche basse: 1-2 mm. Radici grosse con diametri maggiori a 20 mm sono rare e si limitano a poche unità per albero perché la betulla possiede un apparato radicale fascicolato: le radici di grandi dimensioni sviluppandosi si biforcano in esemplari di minor diametro. Gli esemplari di età media sono simili agli adulti, mentre i soggetti giovani tendono a sviluppare 1-2 radici principali da cui si sviluppano poi tutte le radici secondarie.

I risultati delle prove di trazione mostrano che la betulla ha caratteristiche biomeccaniche analoghe ad altre specie presenti nei boschi popolati da *Betula pendula*; il limite principale ai fini del rinforzo radicale è rappresentato dal basso numero di radici di diametro superiore a 20 mm.

1. Introduzione

Vivere in montagna, soprattutto in passato, ha comportato impegno, e talvolta sacrificio, nel cercare di ottimizzare le risorse che tale ambiente riesce ad offrire. Nei confronti dell'uomo, i boschi hanno sempre garantito notevoli risorse da cui dipendevano le vite dei diversi insediamenti. Nei secoli scorsi, infatti, buona parte dell'economia montana era basata sul bosco: riconosciuto come elemento essenziale, esso costituiva una fonte di cibo e di materie prime (legna per costruire e da ardere). Per questo motivo, la vicinanza al bosco ha permesso a numerose generazioni di avere una dignitosa qualità di vita. D'altro canto, ai giorni nostri, l'economia tradizionale legata al legname e ai boschi da frutto ha pian piano perso la sua importanza, non garantendo i ricavi necessari ad una vita tranquilla. Le montagne hanno subito, in particolare negli ultimi 40 anni, un processo di abbandono del territorio, sia delle attività tradizionali che delle località più remote, causando, ciò che è spesso definito come "lo spopolamento delle aree montane". Tuttavia, la vita in montagna non è scomparsa, ma semplicemente cambiata: si è sviluppato un modo di vivere e lavorare in montagna sostanzialmente diverso. Il bosco, soprattutto se facilmente accessibile, è - ancora oggi - in parte un'area produttiva e in parte un elemento fondamentale per innalzare la qualità di vita delle popolazioni montane. Le nuove prerogative che si stanno affrancando hanno portato a riconoscere al sistema bosco nuovi ruoli legati al paesaggio, al turismo, alla ricreazione, all'ecologia e alla terapeutica.

Fra tutte queste funzionalità, il bosco ha mantenuto nel tempo la funzione protettiva, che ha garantito una maggiore sicurezza agli abitanti delle vallate delle Alpi (Motta e Haudeman, 2000). Infatti, già nel Medioevo, l'uomo si era reso conto che i versanti coperti dai boschi risultassero meno suscettibili ad alcuni pericoli naturali come frane e crolli, rispetto a porzioni del territorio completamente denudate per raccogliere legname. Al giorno d'oggi, tale consapevolezza è cresciuta. Eventi calamitosi, definibili con il termine di "dissesto idrologico diffuso" si verificano con maggiore frequenza. Le cause per cui frequenza e intensità di tali fenomeni siano cresciute sono riconducibili alle conseguenze del cambiamento climatico e da una maggiore incidenza della presenza umana sul territorio. Da qui nasce la necessità d'intervenire sui territori montani per ridurre il rischio garantendo alle popolazioni di continuare a vivere in montagna, a tutelare le proprie attività e tradizioni. Citando la Commissione De Marchi (1970), per difesa del suolo s'intende *"ogni attività di conservazione dinamica del suolo, considerato nella sua continua evoluzione per cause di natura fisica e antropica, e ogni attività di preservazione e di salvaguardia di esso, della sua attitudine alla produzione e delle installazioni che vi insistono, da cause straordinarie di aggressione dovute alle acque meteoriche, fluviali e marine o di altri fattori meteorici"*.

Per riuscire a trovare delle soluzioni di prevenzione e azione efficienti e durature nel tempo, è necessario comprendere cosa s'intende per dissesto idrogeologico.

2. Il dissesto idrogeologico

La Commissione De Marchi (1970) fornisce una definizione molto precisa di dissesto idrogeologico: ossia *“quei processi che vanno dalle erosioni contenute e lente, alle forme più consistenti della degradazione superficiale e sotto superficiale dei versanti, fino alle forme imponenti e gravi delle frane”*.

In seguito, il Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche (GNDCI) del Consiglio Nazionale delle Ricerche (CNR) istituito nel 1984, ha declinato il termine come *“qualsiasi disordine o situazione di squilibrio che l’acqua produce nel suolo e/o nel sottosuolo”*.

Tuttavia, la più recente definizione ufficiale si trova nell’articolo 54 del Decreto Legislativo 152/06 secondo cui il dissesto idrogeologico è *“la condizione che caratterizza aree ove processi naturali o antropici, relativi alla dinamica dei corpi idrici, del suolo o dei versanti, determinano condizioni di rischio sul territorio”*.

Da quest’ultima definizione emerge che i fattori principali all’origine del dissesto idrogeologico diffuso sono le condizioni climatiche e geomorfologiche di un dato territorio, a cui è necessario aggiungere l’intervento antropico dell’uomo. Quest’ultimo difficilmente risulta essere un fattore predisponente, ma molto spesso concorre ad aggravare l’intensità dei fenomeni (Forlì e Guida, 2009).

2.1. Le frane

I fenomeni di dissesto idrogeologico comprendono sia processi di deflusso incontrollato delle acque sia quelli legati all’instabilità di versante. Pertanto, all’interno della definizione *“dissesto idrogeologico”* rientrano diverse categorie di eventi quali: erosione superficiale e profonda, erosione costiera, alluvioni, valanghe e subsidenza (Gisotti, 2012). Ai fini di questo lavoro ci concentreremo sulle frane perché, in tale contesto, la funzione del bosco è più incisiva nella mitigazione e riduzione del fenomeno e potrebbe fornire una soluzione adeguata a tale tipologia di problema (FOEN, 2016).

Le frane, rispetto all’erosione superficiale, coinvolgono spessori di terreno superiori e perciò vengono anche chiamate movimenti di massa. I movimenti franosi sono dei fenomeni di massa che possono coinvolgere rocce, detriti o terre, attraverso i quali si manifesta la tendenza, da parte di una massa, al raggiungimento di un minimo di energia potenziale (Varnes, 1978).

Nei movimenti franosi l’acqua agisce come *“agente scatenante”* o *“forzante destabilizzante”* principale, o come concausa del movimento, mentre la forza di gravità rappresenta la forza direzionale del movimento.

Sebbene questi fenomeni possano essere classificati in diversi modi, il sistema più frequentemente adottato è quello proposto da Varnes nel 1978 (Tabella 1).

Tabella 1 - Sistema di classificazione delle frane di Varnes (1978).

TIPO DI MOVIMENTO	TIPO DI MATERIALE		
	Roccia (<i>Bedrock</i>)	Terreno	
		Detrito (<i>Debris</i>)	Terra (<i>Earth</i>)
Crollo (<i>fall</i>)	Crollo di roccia (<i>rock fall</i>)	Crollo di detrito (<i>debris fall</i>)	Crollo di terra (<i>earth fall</i>)
Ribaltamento (<i>topple</i>)	Ribaltamento di roccia (<i>rock topple</i>)	Ribaltamento di detrito (<i>debris topple</i>)	Ribaltamento di terra (<i>earth topple</i>)
Scivolamento rotazionale (<i>slump</i>)	Sciv.rot. di roccia (<i>rock slump</i>)	Sciv.rot. di detrito (<i>debris slump</i>)	Sciv.rot. di terra (<i>earth slump</i>)
Scivolamento traslativo (<i>slide</i>)	Sciv.trasl. di roccia (<i>rock slide</i>)	Sciv.trasl. di detrito (<i>debris slide</i>)	Sciv.trasl. di terra (<i>earth slide</i>)
Espansione laterale (<i>lateral spread</i>)	Espansione di roccia (<i>rock spread</i>)	Espansione di detrito (<i>debris spread</i>)	Espansione di terra (<i>earth spread</i>)
Colamento (<i>flow</i>)	Colamento di roccia (<i>rock flow</i>)	Colamento di detrito (<i>debris flow</i>)	Colamento di terra (<i>earth flow</i>)
Complesso (<i>complex</i>)	associazione di diversi meccanismi		

Tra i fenomeni franosi più diffusi sull'arco alpino, le frane superficiali costituiscono una delle più serie minacce, in particolare quando innescate da eventi piovosi estremi, poiché diverse osservazioni dimostrano la relazione tra regime delle precipitazioni e frequenza delle frane (IReR 2008; Gisotti 2012).

Si definisce frana superficiale un movimento di massa con profondità massima di 2 m (Lateltin, 2005; Rickli and Graf, 2009). Nonostante le ridotte dimensioni, sono fenomeni pericolosi a causa della velocità di movimento e della capacità di aumentare il proprio volume nel movimento verso valle. Possono essere traslazionali e/o rotazionali a seconda di come si sviluppa il processo.

I versanti maggiormente predisposti a questo tipo di dissesto sono quelli a copertura detritica con pendenza variabile tra 25 e 40°, a prato o talvolta anche a bosco; in particolare i dissesti si localizzano in piccole concavità dove la copertura detritico-colluviale

è più potente rispetto al resto del versante e dove si concentra il deflusso sotto superficiale (Bischetti,2003).

Nella Figura 1, i tipi di fenomeni franosi sono rappresentati schematicamente.

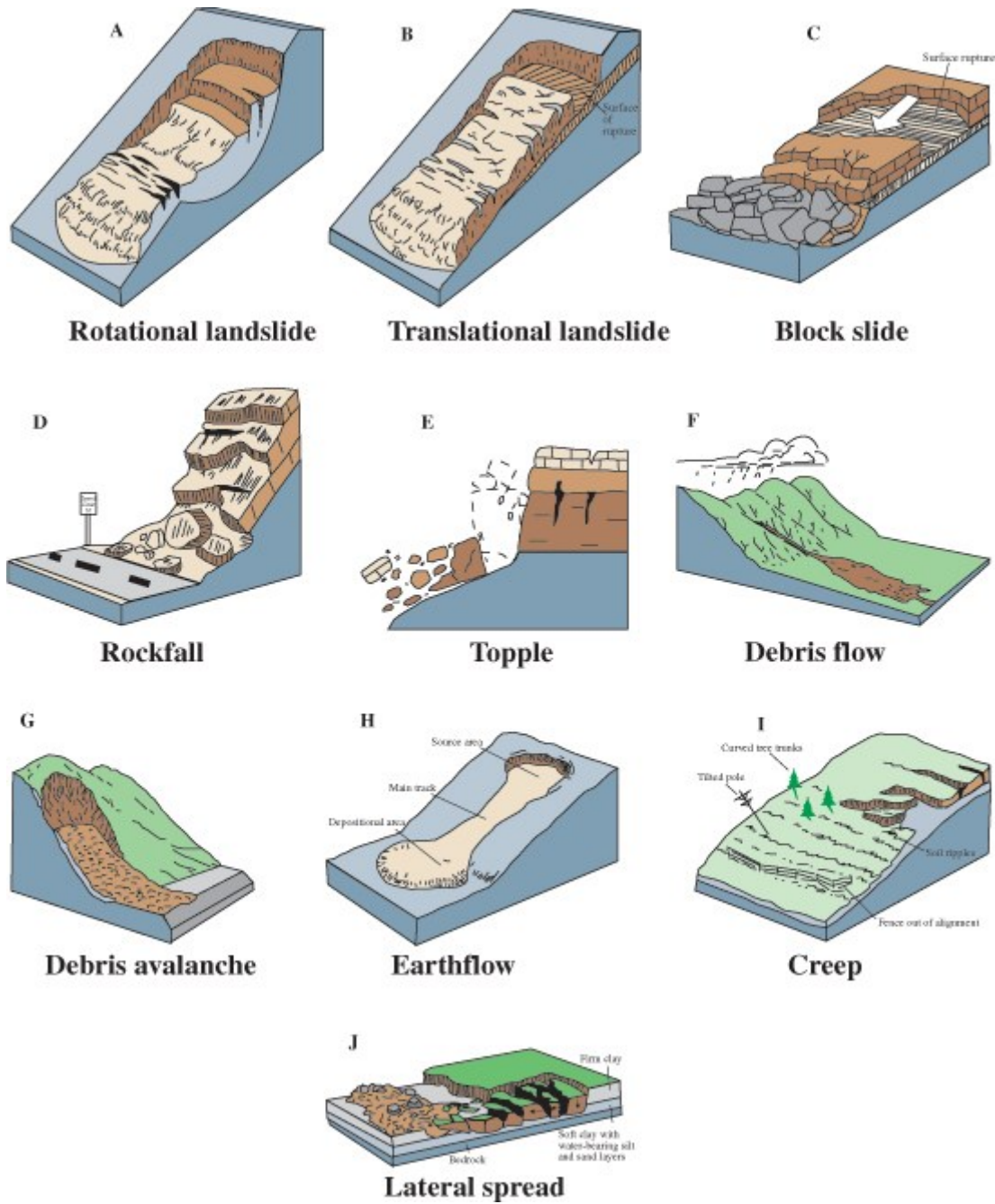


Figura 1 – Rappresentazione grafica di alcuni tipi di movimenti franosi. Fonte: U.S. Geological Survey

2.2. Vegetazione e difesa del suolo

Contro i fenomeni di dissesto come le frane, l'uomo ha sempre cercato di rimediarvi attraverso due distinte soluzioni: le opere di ingegneria geotecnica ("classiche") e le sistemazioni idraulico forestali. All'interno di queste ultime, la vegetazione gioca un ruolo chiave sia da un punto di vista ecologico che ingegneristico, talvolta anche economico. L'utilizzo della vegetazione, oltre ad aumentare l'efficacia nel tempo, risulta spesso più efficiente dal punto di vista dei costi (Motta e Haudemand, 2000; Brauner et al., 2005). La vegetazione contribuisce sia al riequilibrio dei processi idrologici all'interno dei bacini idrografici sia all'incremento della stabilità dei versanti attraverso meccanismi idrologici e meccanici (Moos, 2016).

I principali meccanismi idrologici (Figura 2) sono:

- **Intercettazione fogliare.** Intercetta parte della precipitazione impedendo che arrivi interamente al suolo; questo porta a una riduzione dell'effetto erosivo della precipitazione diretta.
- **Suzione ed evapotraspirazione.** La vegetazione per mezzo delle radici estrae l'umidità nel suolo attraverso il meccanismo di suzione. L'assorbimento dell'acqua necessaria al processo evapotrasportativo è la principale causa di riduzione del contenuto idrico del suolo; genera effetti positivi sia sulla resistenza al taglio sia ai tempi di recapito in rete.
- **Infiltrazione.** La presenza della vegetazione migliora la struttura del suolo aumentando la dimensione dei meati, con presenza di macropori che favoriscono l'ingresso e il movimento di acqua nel terreno. Questo effetto risulta in parte positivo e in parte negativo: incrementando la quantità d'acqua all'interno del suolo potrebbe ridurre la resistenza al taglio dei versanti e aumentare le forze di taglio.

Inoltre, i boschi hanno un elevato tasso di infiltrazione rispetto ai suoli non vegetati. Questo accade perché le porosità create dal decadimento delle radici o dalle tane degli animali, provocano l'allontanamento del flusso sotto-superficiale verso strati più profondi e con maggiore velocità (Vergani, 2013). Quindi, se da una parte non ci sarà erosione superficiale, dall'altra il contenuto di acqua nel suolo aumenterà.

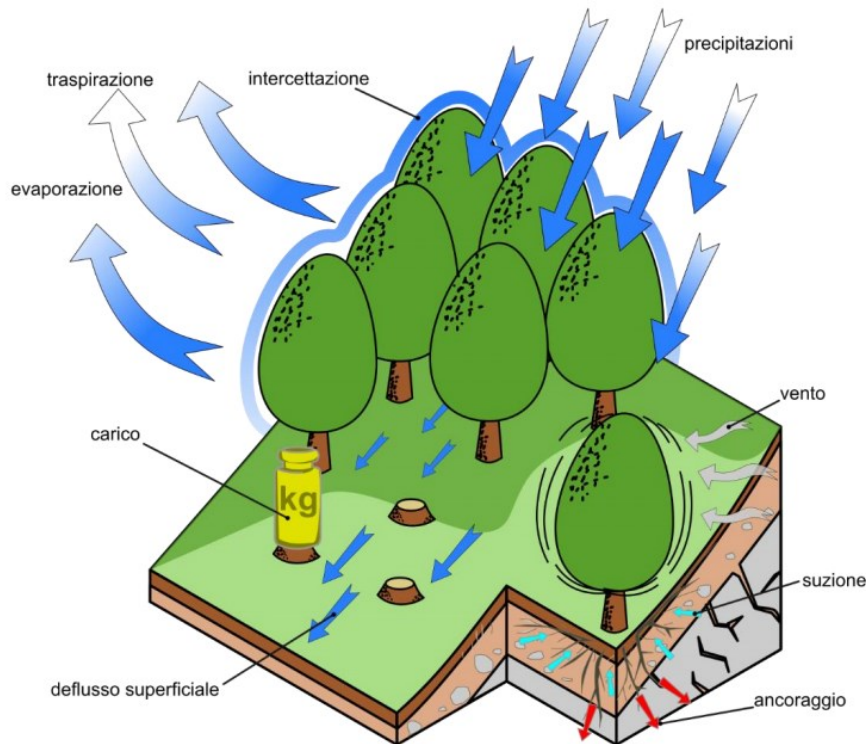


Figura 2 - Effetti della vegetazione sui versanti (Bischetti et al., 2010)

Dal punto di vista meccanico, la vegetazione agisce positivamente sui processi di dissesto attraverso le azioni di:

- **Ancoraggio.** La vegetazione ancorandosi al substrato attraverso l'apparato radicale è in grado di offrire un supporto alla parte superiore del versante.
- **Effetto contrafforte.** Questo meccanismo si attua quando gli alberi, tenacemente ancorati agli strati più profondi del suolo possono configurarsi come dei piloni in grado di sostenere la porzione di versante ad essi sovrastante.
- **Effetto arco.** Se i singoli alberi sono sufficientemente vicini anche la parte di pendio che non grava direttamente su di essi può beneficiare della loro azione stabilizzante, attraverso l'effetto denominato arco. Questo fenomeno è fortemente influenzato dalla profondità del piano di scivolamento, dall'interdistanza dei piloni e dalle caratteristiche del terreno (Docker, 2003).
- **Rinforzo radicale.** La presenza di radici nel terreno consente di trasferire su di esse una parte delle tensioni che si sviluppano all'interno del terreno aumentandone la resistenza al taglio.

Nella Figura 3 vi è una dimostrazione grafica degli effetti sopracitati.

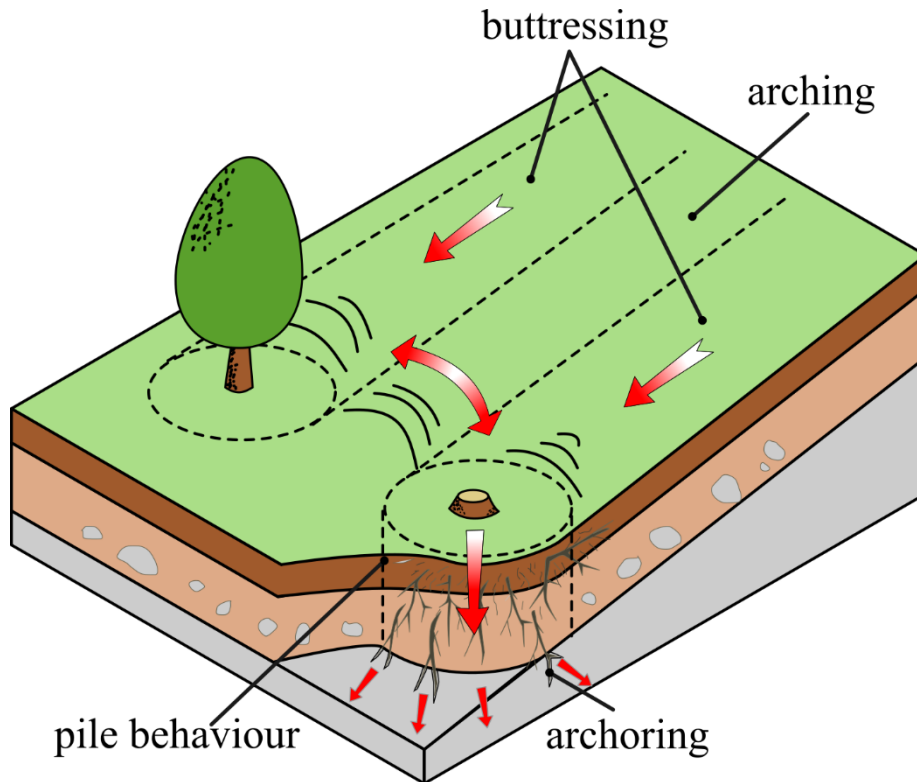


Figura 3 - Effetti meccanici dell'apparato radicale sul versante (Bischetti et al., 2010)

Il suolo è molto resistente alla compressione e molto meno alla trazione, mentre per le radici vale il discorso inverso, ossia sono deboli in fase di compressione e forti nei confronti di uno sforzo di trazione. Considerando però la combinazione data da suolo e radici, essa avrà caratteristiche di resistenza maggiori a quelle dei singoli elementi che la compongono (De Nicola, 2017). In particolare, le radici più piccole forniscono un grande contributo al rinforzo del terreno aumentando la sua resistenza al taglio (Vergani, 2013). Queste si fanno carico di parte degli sforzi di taglio presenti nel suolo e, successivamente, consentono una benefica redistribuzione degli sforzi, prevenendo in questo modo l'innesco di rotture di tipo progressivo (Docker, 2003).

L'entità di tutti questi meccanismi dipende dallo sviluppo del sistema radicale che è funzione delle caratteristiche genetiche delle specie e ambientali della stazione quali tessitura struttura, areazione, umidità, temperatura e competizione con altre piante (Bischetti et al., 2009).

Nonostante la letteratura scientifica sottolinei che la vegetazione contribuisce sia con effetti positivi che negativi alla stabilità dei versanti, evidenze empiriche mostrano che gli effetti sono prevalentemente stabilizzanti e che le foreste naturali provvedono al più grande livello di protezione comparato con altre forme di uso del suolo (Forbes e Brodhead, 2011).

2.3. Il bosco di protezione

Laddove il bosco risulta essere fondamentale per la propria funzione protettiva e ha come funzione primaria la protezione di persone o beni da rischi naturali, si definisce bosco di protezione (Brang et al, 2006).

Nelle regioni alpine europee, dove le comunità montane coesistono con il rischio idrogeologico, sin dal Medioevo è emersa la necessità di regolare l'uso delle foreste per evitare un uso eccessivo della risorsa boschiva e un conseguente indebolimento della funzione protettiva. In Valle d'Aosta sono stati trovati dei documenti datati circa intorno al XIII secolo che riconoscono la funzione della foresta nel prevenire danni derivanti da eventi estremi e che limitano l'esbosco di legna (Motta e Haudemand, 2000). Regolamenti che cautelano le attività di taglio sono state riscontrate in documenti della Repubblica di Venezia già a partire dal XIII e XIV secolo (Bischetti et al., 2009). Da questi primi passi, poi, nel XIX secolo, questi regolamenti si sono trasformati in vere e proprie leggi in alcuni paesi dell'arco alpino.

Ampiamente tenuta in considerazione da Austria e Svizzera, che annualmente impiegano risorse ed energie per il mantenimento dell'apparato protettivo forestale, in Italia, la funzione protettiva del bosco non ha ancora trovato un riconoscimento normativo esplicito valido per tutto il territorio nazionale. Tale ragione potrebbe dipendere dal fatto che, mentre le prime due nazioni si sviluppano interamente in territori alpini, l'Italia presenta una geografia molto varia che spazia dalle Alpi alle coste marittime.

In Italia gli aspetti che riguardano i boschi di protezione sono inclusi nella normativa forestale più generica: il R.D.L. 30 dicembre 1923, n. 3267, la Legge Serpieri, è pertanto la legge di riferimento italiana. Nello specifico il R.D.L. individua come strumento idoneo per la tutela di questo tipo di boschi il vincolo idrogeologico che impedisce qualsiasi forma di utilizzazione contrastante che possa arrecare danno, far perdere stabilità o turbare il regime delle acque. L'art. 1 della legge Serpieri afferma infatti che *“sono sottoposti a vincolo per scopi idrogeologici i terreni di qualsiasi natura e destinazione che, per effetto di forme di utilizzazione contrastanti con le norme di cui agli artt. 7, 8 e 9, possono, con danno pubblico, subire denudazioni, perdere la stabilità o turbare il regime delle acque”*.

Nonostante ciò, tutte le regioni italiane dell'arco alpino hanno emanato linee guida e regolamenti per l'individuazione e la gestione di quei boschi con prerogativa protettiva. La provincia autonoma di Trento ha deliberato il 23 maggio 2007 la legge provinciale n. 11 in cui il bosco di protezione trova ampio spazio, di seguito un paragrafo dell'articolo 1 comma 3: *“La Provincia riconosce l'importante interesse pubblico rivestito dal bosco e, più in generale, dalle risorse forestali e montane, per le funzioni produttiva, protettiva e di difesa idrogeologica, ambientale e igienico-sanitaria, con particolare riferimento al mantenimento della funzionalità bioecologica, turistica e culturale”*. In Svizzera il tema è molto centrale nella politica di gestione del territorio, tant'è che esistono norme che

non solo definisco la funzione protettiva, ma ne regolano anche la gestione e gli investimenti necessari per conservare e migliorare il ruolo protettivo del bosco. (Legge Federale sulle Foreste, 921. 0, 4 ottobre 1991 e Ordinanza sulle foreste 921.01, 30 novembre 1992).

2.3.1. La funzione protettiva

Il ruolo protettivo delle aree boscate si esplicita nella protezione, totale o parziale, di esseri umani, beni e infrastrutture dai pericoli naturali e dalla degradazione del suolo. La presenza umana è il fattore discriminante affinché un bosco venga classificato come di protezione: è fondamentale che nelle vicinanze vi sia il rischio concreto di pericolo e di danno a cose o persone.

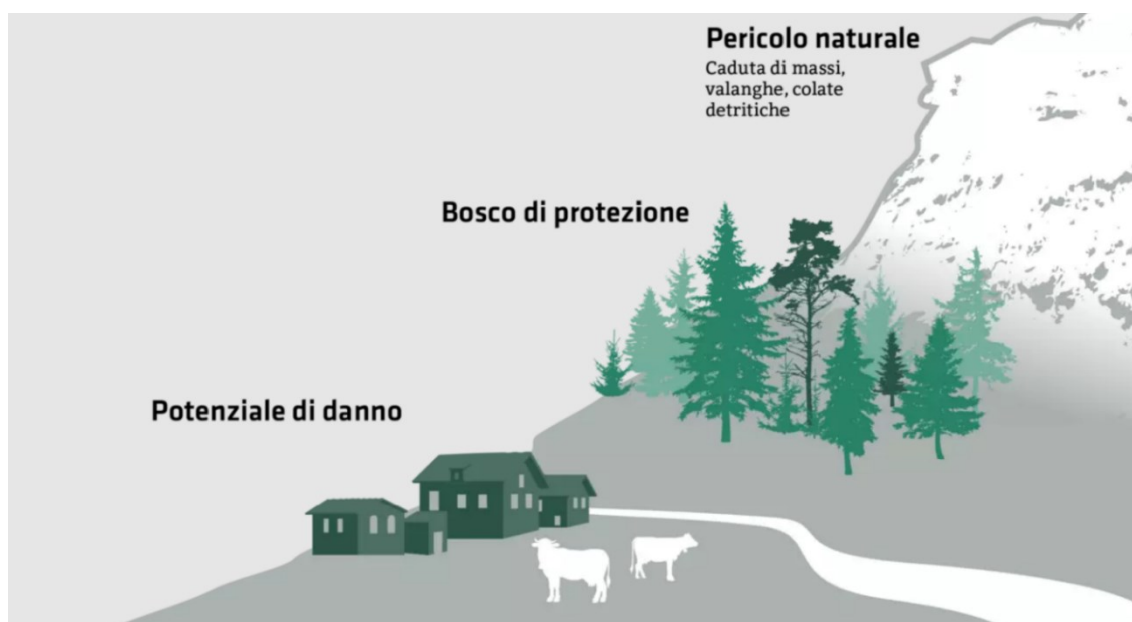


Figura 4 – Rappresentazione degli elementi che definiscono un bosco di protezione: il bosco che protegge un insediamento umano da un pericolo naturale a cui è potenzialmente esposto. Fonte: BAFU

Di conseguenza la foresta protegge la comunità collocata in tale luogo, le attività e gli interessi dei residenti; un esempio potrebbe essere rappresentato dalla Figura 4: un insediamento umano, rappresentato da case e/o un'azienda agricola, esposti a un rischio naturale limitrofo che potrebbe essere una parete rocciosa da cui si staccano dei massi. Un bosco di protezione posto e gestito in modo corretto potrebbe sia deviare il materiale in discesa che rallentarne la corsa ostacolandone fisicamente la traiettoria.

La foresta di protezione svolge questo ruolo in diversi modi, riassumibili in due differenti modalità (Brang et al., 2006, Meloni et al., 2006):

- **Modalità diretta.** La protezione diretta avviene quando ci sono contemporaneamente pericoli naturali e potenziali danni, questo è il fattore discriminante. È la funzione che la foresta svolge contrastando e mitigando pericoli naturali come valanghe, cadute massi, scivolamenti superficiali e colate. La parte degli alberi coinvolta attivamente è il fusto, il quale contrasta fisicamente il materiale in movimento. L'azione dell'apparato radicale è importante ai fini di garantire la stabilità degli alberi.
 Per questo tipo di protezione è necessaria una corretta gestione del soprassuolo boschivo, il quale deve avere determinate caratteristiche: composizione, densità, stratificazione e tessitura in funzione del pericolo da affrontare.
- **Modalità indiretta.** Definita anche protezione generica, si attua semplicemente grazie alla presenza del bosco e riguarda la conservazione del suolo dall'erosione diffusa o incanalata e dai fenomeni idrologici. Viene svolta da tutti i popolamenti forestali, in modo diverso a seconda della composizione della foresta, dell'età e delle diverse specie che la compongono. L'apparato radicale è il principale esecutore di questa funzione e comprende anche le specie erbacee e arbustive.

Nella Figura 5 vengono mostrate le due diverse modalità di protezione. La colonna a sinistra rappresenta nel primo riquadro (F3), in rosso, le aree esposte a un rischio naturale simile a valanghe o caduta massi. Nel riquadro sottostante (E3) vengono mostrati gli effetti della foresta di protezione che riduce sensibilmente il rischio nelle aree prima rosse attraverso la modalità diretta.

Nella colonna di destra, invece, in azzurro viene mostrato nel primo riquadro (F4) una zona esposta a un rischio idrogeologico dovuto a instabilità di versante ed erosione superficiale. Il riquadro (E4) mostra come la presenza di un bosco di protezione potrebbe regimare i vari deflussi idrici stabilizzando il versante e riducendo i fenomeni di dissesto o erosione idrica.

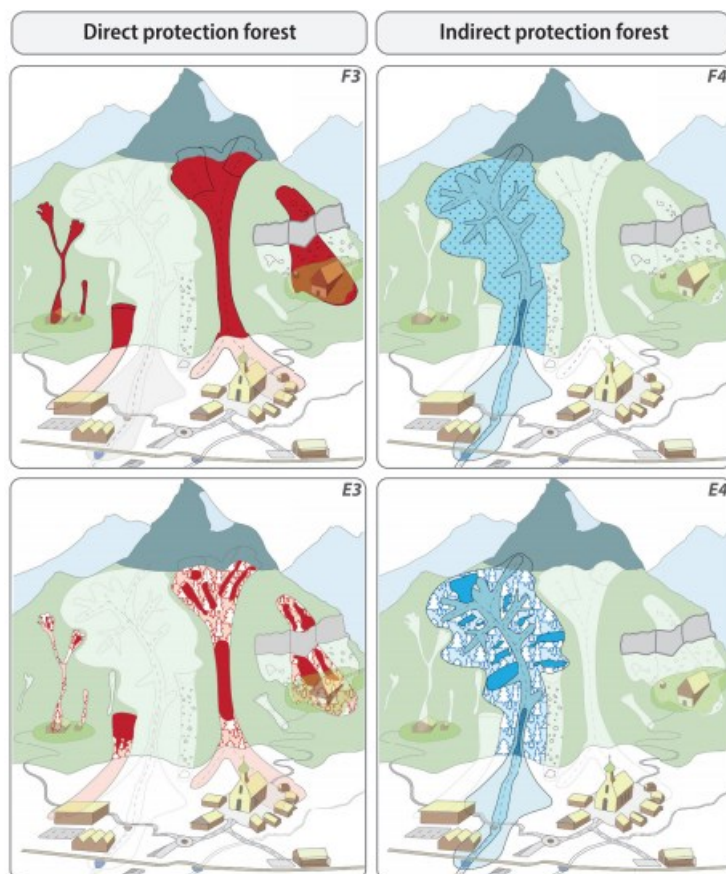


Figura 5 – La colonna a sinistra rappresenta il ruolo della protezione diretta: le aree a rischio (F3) e gli effetti della protezione (E3). La colonna a destra rappresenta il ruolo di protezione indiretta: le aree a rischio (F4) e gli effetti della protezione (E4). Fonte: Karl Kleemayr, Austrian Research Centre for Forests (BFW), 2019

2.3.2. La gestione del bosco di protezione

Le varie funzioni che il bosco assolve risultano essere espletate al massimo in alcune fasi evolutive dei processi dinamici che avvengono a scala di popolamento mentre sono svolte con minore efficacia o disattese in altre. Per quanto riguarda la funzione di protezione vi è l'esigenza, da parte dell'uomo, che il ruolo protettivo venga svolto in modo costante dal bosco. In una foresta non gestita, soggetta ad evoluzione naturale, la funzione di protezione non viene svolta in modo continuo dai popolamenti forestali.

Nella gestione del territorio l'obiettivo primario è rafforzare i boschi così che possano svolgere in modo ottimale il proprio ruolo. Gli interventi selvicolturali nei boschi con prevalente funzione protettiva risultano essere generalmente a macchiativo negativo, onerosi, in quanto questi popolamenti sono comunemente situati in condizioni di elevata pendenza e, in genere, limitata fertilità. (Meloni et al., 2006)

Nel caso di un bosco di protezione l'obiettivo consiste nell'ottenere un soprassuolo forestale, perciò occorrerà in particolare controllare la mescolanza specifica, mantenere una struttura stratificata e adottare misure che favoriscono la rinnovazione naturale. (Graf, 2004)

Per esempio, la Confederazione Svizzera attraverso l'Ufficio del Dipartimento federale dell'ambiente, dei trasporti, dell'energia e delle comunicazioni (DATEC) ha fornito una pubblicazione per chiarire i vari passaggi in merito.

Innanzitutto, è necessario comprendere quale profilo sia richiesto e, in secondo luogo, paragonare lo stato attuale del bosco a ciò a cui si ambisce. Nello specifico vengono ipotizzate due possibilità come profilo meta: il profilo minimo e il profilo ideale.

Il primo rappresenta le esigenze minime in base al pericolo naturale e serve da unità di riferimento per stabilire la necessità di intervento o meno. Valutando la probabile evoluzione del popolamento in assenza d'interventi per i prossimi 50 anni, si tiene conto anche della dinamica naturale del bosco. Il paragone si esegue per tutte le caratteristiche salienti del popolamento.

Il profilo ideale invece si prefigge un obiettivo selvicolturale a lungo termine. (Continuità nel bosco di protezione e controllo dell'efficacia Istruzioni per le cure nei boschi con funzione protettiva, Frehner et al., DATEC, 2005)

3. Obiettivi del lavoro di tirocinio

Al fine di quantificare il ruolo protettivo dei boschi, già dalla fine degli anni '60, numerosi studiosi hanno intrapreso campagne di rilevazione dati per analizzare gli apparati radicali delle diverse specie. L'obiettivo di tali studi è riuscire a costruire un modello grazie al quale (inserendo specie, quantità, distribuzione ed età dei diversi soggetti) sia possibile stimare la capacità di trattenuta del suolo e quindi comprendere quanto una superficie boscata sia o meno centrale per la stabilità di versante.

Molti studi si sono dedicati alle specie più comuni nell'arco alpino (Vergani 2012, Vergani 2014, Giadrossich 2016), tralasciando le specie pioniere le quali garantiscono una fondamentale transizione nella successione vegetale tra gli arbusti e lo sviluppo vero e proprio del bosco. Tra queste vi è la betulla bianca o *Betula pendula*.

Nella letteratura di settore, pochissimi studi hanno analizzato l'apparato radicale della *Betula pendula*, e nessuno ha osservato in dettaglio la distribuzione delle radici nel suolo. Per colmare questa carenza, il tirocinio ha avuto come obiettivo quello di osservare come si sviluppa l'apparato radicale della betulla bianca sia sul piano orizzontale che su quello verticale.

Inoltre, una parte della raccolta dati è stata dedicata alle prove di trazione statica al fine di quantificare la resistenza delle singole radici in relazione ai diversi diametri di queste.

In questo elaborato verranno pertanto discussi i seguenti punti:

- la distribuzione orizzontale e verticale delle radici di esemplari adulti di *Betula pendula*;
- il confronto dei dati tra le due aree prese in esame;
- la relazione tra diametro e resistenza alla trazione delle radici di betulla.

4. Materiali e metodi

4.1. *Betula pendula* (Roth)

La betulla è un albero deciduo a vasta distribuzione eurosiberiana, che all'interno della classificazione in zone fitoclimatiche del Pavari trova spazio soprattutto nel *Fagetum*. È una pianta eliofila pioniera: ha la capacità di colonizzare velocemente suoli privi di vegetazione arborea (come, ad esempio, pascoli abbandonati) o perturbati da eventi ad alto grado di disturbo (slavine, frane, incendi). Il pionierismo di *Betula pendula* consente di creare tutte quelle condizioni necessarie all'inserimento e crescita di specie arboree più esigenti.

4.1.1. Biologia ed ecologia

La *Betula pendula*, nome scientifico della betulla bianca, è una specie caducifoglie a crescita rapida, di media grandezza, dalla tipica corteccia bianca tendente a sfaldarsi. Gli esemplari di betulla raramente superano i 30 metri di altezza, anche su terreni ottimali come quelli del Nord Europa, l'altezza media si assesta normalmente al di sotto dei 25 m. In genere le betulle raggiungono al più un'età massima di 100 anni, anche se sono stati rinvenuti esemplari vissuti fino a circa 150 anni.

La specie possiede un fusto generalmente dritto e slanciato che presenta rami primari ascendenti e obliqui, mentre quelli secondari sono penduli.

Betula pendula è caratterizzata da foglie semplici, alterne e picciolate; largamente ovate, da giovani e nei polloni sono pubescenti, per poi diventare glabre.

Il metodo principale di riproduzione è attraverso i semi, che sono numerosi, piccoli e strutturalmente atti ad essere dispersi dal vento. La specie è monoica: sullo stesso esemplare si trovano sia amenti femminili che maschili; quest'ultimi si sviluppano al termine dell'estate e sono visibili durante l'inverno, mentre quelli femminili svernano in germogli che fioriscono solamente in primavera. Grazie a un meccanismo chimico che impedisce la crescita dei tubi pollinici sugli stigmi della stessa pianta, la *Betula pendula* non può autofecondarsi.

Nella Figura 6 le diverse parti della betulla bianca in una tavola grafica botanica.

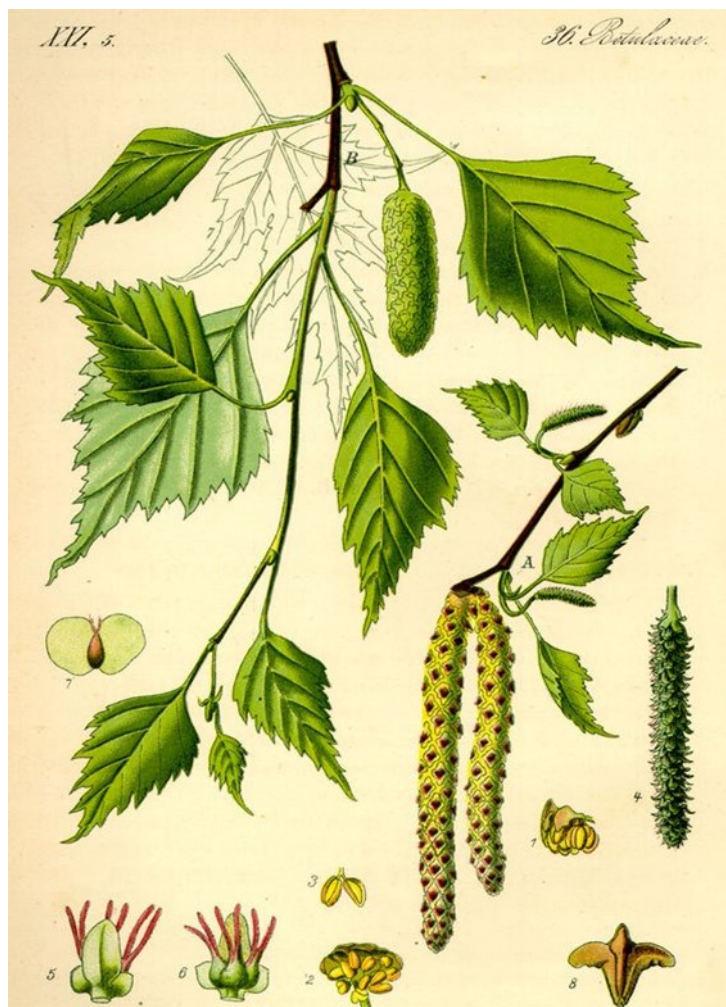


Figura 6 – Tavola grafica di *Betula pendula* (biolib.de)

Betula pendula è dotata di grande plasticità ecologica: dato il temperamento eliofilo la specie predilige terreni scoperti e soleggati ed esposizioni a luminosità prolungata; tuttavia, è possibile trovare esemplari anche in boschi mesofili, in luoghi più freschi e ombrosi. Predilige terreni sciolti, sabbiosi e ciottolosi; acidi e poveri di nutrienti.

La betulla bianca svolge il ruolo da pioniera anticipando le specie di transizione e quelle di climax, creando e fornendo un ambiente adatto allo sviluppo di tali organismi. Quando il bosco ha raggiunto la fase successiva, presentando scarsa luminosità e una lettiera più densa, la germinazione di nuovi esemplari di betulla diviene difficoltosa e perciò tende a diminuire (Plini e Tondi, 1989). In sostanza, quando *Betula pendula* entra in concorrenza con le specie sciafile a lei successive nella colonizzazione di un'area, per le varie dinamiche che regolano la cenosi, tende gradualmente a regredire fino ad azzerare la sua presenza.

4.1.2. La distribuzione in Europa

La distribuzione della *Betula pendula* è molto ampia, infatti, la specie copre quasi tutta l'Europa: dalle zone del Mediterraneo a sud, sino alla latitudine 70° a Nord. La betulla è molto abbondante dell'Europa Settentrionale dove la distribuzione è maggiore e, oltre a foreste di composizione mista, è anche possibile trovare foreste composte quasi esclusivamente da betulle.

Nelle zone occidentali e meridionali d'Europa, *Betula Pendula*, si trova ad altitudini più elevate. La specie è assente in Islanda, nella maggior parte della penisola Iberica e in Grecia. In Italia la specie è comune nell'arco alpino e prealpino (Plini e Tondi, 1989).

Nella Figura 7 la distribuzione di betulla bianca nel continente europeo.

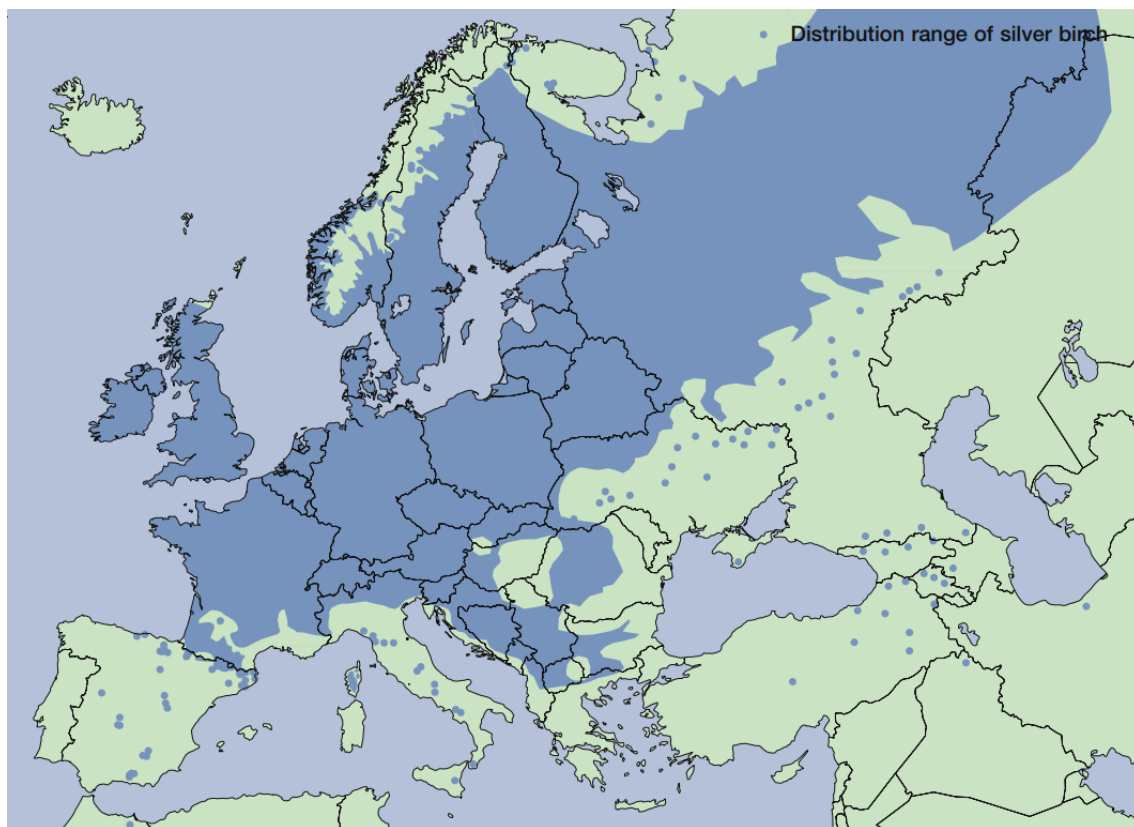


Figura 7 – Mappa della distribuzione di betulla bianca in Europa (EUFORGEN, 2021)

4.2. Aree di lavoro

L'attività di tirocinio è stata condotta in due aree del Canton Ticino (Svizzera), sotto la supervisione di Marco Conedera del centro WSL di Cadenazzo e del Prof. Massimiliano Schwarz. Durante l'esperienza svolta dall'agosto all'ottobre 2017 è stata effettuata la raccolta dati per la specie *Betula pendula*.

Le aree studio selezionate sono un bosco dei Monti di Ditto, località di Cugnasco, e un bosco dei Monti di Laura, nel comune di Arbedo. Entrambe le zone sono state oggetto di incendi e presentano all'interno della popolazione forestale esemplari di betulla.

La prima area di lavoro presa in considerazione è stato un bosco nei pressi della località Monti di Ditto, a Cugnasco, a 862 m s.l.m. L'area ha subito un incendio il 19 maggio 2006.

Il bosco in cui è stata effettuata la raccolta dati è costituito prevalentemente da esemplari di faggio (*Fagus sylvatica* L.) e di castagno (*Castanea sativa* Mill), mentre le betulle per lo più sono dislocate in modo sparso nella parte toccata marginalmente dall'incendio. Le betulle di età maggiore sono riconducibili al passaggio prato-pascolo a bosco, mentre i campioni giovani esaminati sono collegate alle dinamiche post-incendio.

Cugnasco presenta un clima caldo e temperato, con piovosità significativa durante tutto l'anno, anche nei mesi più secchi, con una media annuale di 1514 mm. Il clima è stato classificato come Cfb, in accordo con Köppen e Geiger, il che significa che si tratta di un clima temperato umido con estate tiepida. La temperatura media annuale di Cugnasco è 8.1 °C. (Climate-Data.org, 2021).

Nella Figura 8 è possibile vedere una ripresa da satellite del bosco di Cugnasco preso come prima area di lavoro, nella Figura 9 lo stesso su carta.



Figura 8 – Vista dal satellite del bosco numero 1 nell'area dei Monti di Ditto, SwissTopo 2021



Figura 9 - Rappresentazione cartografica dell'area dei monti di Ditto, Cugnasco, SwissTopo, 2021

La seconda area di lavoro riguarda un bosco sui Monti di Laura, nel comune di Arbedo-Castione, a 1400 m s.l.m. Il sito ha subito un incendio superficiale il 20 marzo 1976.

L'area boschiva oggetto di studio è per lo più composta da soggetti maturi di *Fagus sylvatica* L., gli esemplari di *Betula pendula* sono sporadici e inseriti nel cuore del bosco, anch'essi con un'età superiore ai 40 anni. Una particolarità del sito, emersa chiaramente durante l'operazione di scavo, è rappresentata dal suolo classificato come cambisol umico (Blaser e al., 1997).

Il comune di Arbedo-Castione si trova a 241m sopra il livello del mare e presenta un clima caldo e temperato con piovosità significativa durante l'anno con una media annuale di 1514 mm e temperatura media annuale di 6.8 °C. Il bosco, seconda area di studio selezionata, si trova ad un'altitudine maggiore, di conseguenza il clima è quello più tipicamente alpino: freddo e umido con temperature medie annuali di 6°C (Blaser et al., 1997).

Nelle Figure 10 e 11 viene mostrato il secondo bosco oggetto di studio.



Figura 10 – Vista dal satellite del bosco numero 2 nei Monti di Laura, Arbedo, SwissTopo 2021



Figura 11 - Rappresentazione cartografica dell'area dei monti di Laura, Arbedo, SwissTopo, 2021

4.3. Campagna di misure

4.3.1. Procedura

Il lavoro in campo è stato condotto secondo la seguente procedura

1. selezione degli esemplari su cui compiere le misurazioni;
2. raccolta dati della distribuzione orizzontale e verticale attraverso il metodo delle trincee;
3. prove di pull-out;
4. rielaborazione dei dati.

Tale metodologia è andata sviluppandosi e affinandosi attraverso il percorso di diverse esperienze scientifiche precedenti: Dazio (2016) ha effettuato uno studio su *Castanea sativa*, mentre De Boni (2017) ha preso in esame *Ailantus altissima*. Entrambi gli studi sono stati supervisionati dal professor Massimiliano Schwarz (BFH-HAFL).

4.3.2. Selezione degli esemplari

Nel periodo del tirocinio, il numero di esemplari selezionati è stato di 8 alberi adulti (> 15 anni), 4 di media età (tra i 10 e 15 anni circa) e 10 di giovane età (con meno di 10 anni).

Una volta giunti nell'area di lavoro, i criteri di scelta erano basati per lo più sulla disposizione in bosco delle piante e sulla distanza rispetto agli altri alberi. Gli esemplari selezionati si presentavano abbastanza isolati, questo per evitare casi di competizione con altre specie che andassero ad influire sulla distribuzione radicale della betulla presa in esame.

Per gli alberi adulti si procedeva quindi a numerare la pianta e a misurarne il diametro ad altezza petto d'uomo.

Per gli esemplari di età media e giovane, presenti nella parte di bosco soggetta ad incendio e quindi circondati dalla vegetazione, il criterio di scelta si spingeva sull'accessibilità della zona e possibilmente scegliendo sempre esemplari non limitrofi ad altre specie arboree.

Per quanto riguarda la scelta degli esemplari per le prove di trazione la preferenza ricadeva su soggetti adulti isolati non troppo distanti dal punto di accesso al bosco a causa della strumentazione particolarmente ingombrante e pesante da trasportare.

4.3.3. Distribuzione radicale

Per gli esemplari più giovani le piante sono state completamente scavate rimuovendo completamente il suolo. Attraverso l'uso di uno zappettino da giardino e partendo a una distanza di circa 50 cm dalla piantina si procedeva allo scavo: una volta incontrate le radici principali le si seguiva fino al centro e così per tutto l'apparato radicale. A questo punto gli esemplari venivano portati al centro dove venivano catalogati, fotografati e misurati (Figura 12).

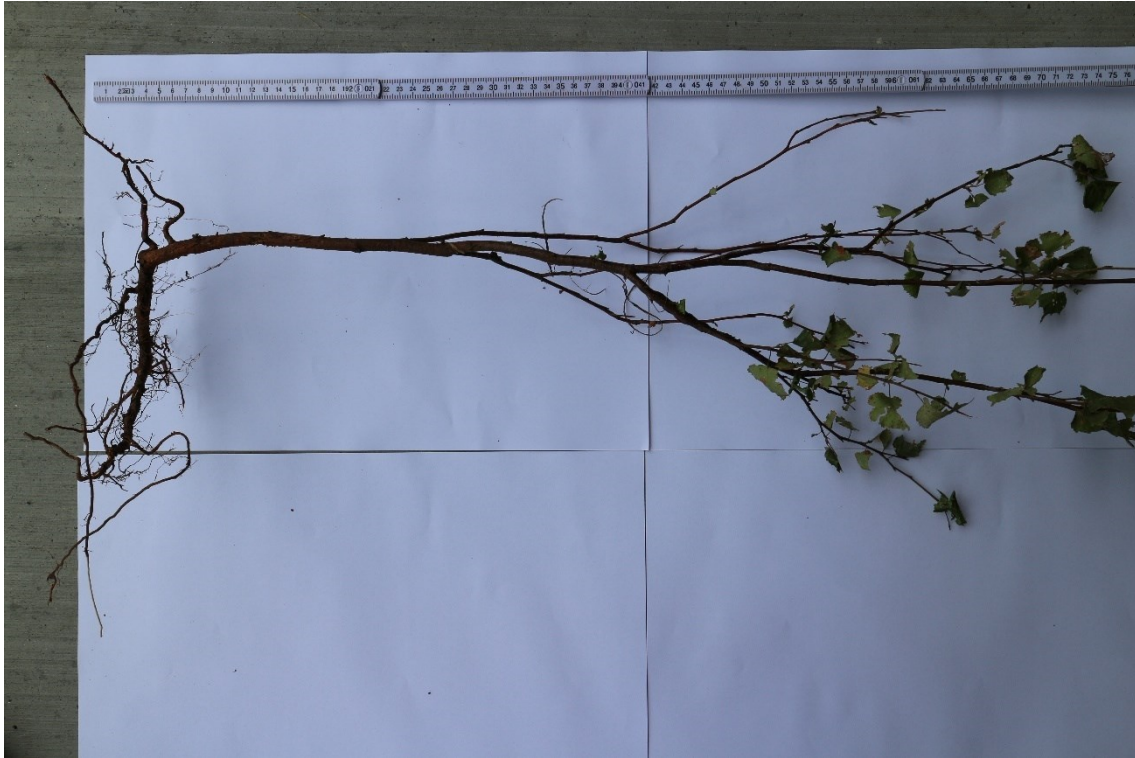


Figura 12 – Esemplare di betulla giovane durante la catalogazione

Lo stesso metodo è stato applicato per gli esemplari tra i 10 e i 15 anni con una variante: anziché partire da 50 cm, al momento dello scavo, si partiva a circa 2 m per non danneggiare eccessivamente l'apparato radicale. Anche in questo scavo, per lo scavo è stato utilizzato uno zappettino da giardino, per le radici più piccole e per le parti più profonde, mentre per lo scavo principale sono stati utilizzati pala e piccone. Una volta estratto l'apparato radicale completo e misurata l'altezza del candidato, alla base del fusto è stato fatto un taglio e al centro dell'Istituto Federale di Ricerca WSL di Cadenazzo è stato portato solo l'apparato radicale (Figura 13).



Figura 13 - Esemplare di 9 anni estratto dal suolo

Al centro WSL l'apparato è stato poi misurato nelle tre dimensioni appendendolo a un organetto ed elevato; al suolo è stato posto un cartellone con segnate tre diverse circonferenze (a 20, 40 e 60 cm) e la ripartizione di queste in gradi, ogni 10° è stato fatto un segno, al fine di avere un'orientazione sommaria delle radici rispetto al Nord che la pianta aveva in campo.

Una volta fissata la pianta e sistemato al suolo il cartellone si procedeva con la misurazione delle radici analoga al sistema delle trincee degli adulti: la misurazione avveniva per profili di 15 cm fino a una profondità di 75 cm (poiché l'apparato radicale della betulla tende ad essere poco profondo), e con l'aiuto di una palina graduata seguendo le circonferenze tracciate a terra avveniva la misurazione dei diametri delle radici nei diversi profili; ottenendo così una visione complessiva del candidato.

Come detto poco sopra, per gli esemplari adulti è stato utilizzato il sistema delle trincee che consiste nello scavare delle trincee di 1 m di larghezza e 1 m di profondità distanti le une dalle altre 1 m: rispettivamente a 1,5 m, 2,5 m e 3,5 m dal tronco. Le trincee venivano generalmente rivolte verso monte e orientate in modo che fossero il meno possibile vicine, e perciò influenzate, da altre piante presenti in bosco. Una volta segnati i punti da scavare avveniva la ripulitura del soprassuolo da foglie, giovani piantine ed eventuali sterpaglie e col piccone e la pala si procedeva allo scavo (Figura 14).



Figura 14 – Misurazione delle tre distanze per le trincee e pulizia dell'area

Con un metro si procedeva alla misura dei diversi profili, dopo di che si proseguiva con la conta delle radici e la ripartizione in classi diametriche per ogni profilo (Figura 15).



Figura 15 – Misurazione del profilo prima di iniziare la conta delle radici

I profili si sviluppavano per profondità di 15 cm ma già a 60 cm la presenza di radici di betulla è davvero rara. Una volta terminata la conta le trincee venivano richiuse e sistemate. Al candidato adulto numero 2 esaminato a Cugnasco non è stato applicato il metodo delle tre trincee, bensì l'esemplare è stato completamente estratto e misurato su tutta la circonferenza: a 1,5 m e 2,5 m (sia in campo che successivamente). Per questo lavoro è stato fatto lo scavo a 2,5m con il piccone e la pala creando una trincea attorno all'albero, in seguito con lo zappettino da giardino, partendo dalla corona centrale e andando verso l'esterno, sono state estratte tutte le radici al fine di portare fuori dal bosco l'intero apparato radicale. Nelle foto è possibile vedere il lavoro in corso (Figura 16), il risultato finale (Figura 17) e un particolare delle fitte radici vicino alla corona (Figura 18).



Figura 16 – Scavo in corso dell'esemplare numero 2



Figura 17 – Scavo terminato, fase prima dell'estrazione



Figura 18 – Particolare delle radici vicino alla corona

Per la conta delle radici della pianta numero 2 di Cugnasco si è proceduto dividendo la trincea a 2,5 m in 15 settori larghi 1 m (come la misura delle trincee), mentre alla distanza di 1,5 m la circonferenza ottenuta è stata divisa in 10 settori sempre di 1 m di larghezza. Poi si è proceduto alla conta delle radici per profilo di profondità come nel metodo delle trincee. Dividere le due circonferenze in settori normalizzati a 1 m di larghezza ha permesso di utilizzare anche i dati dello scavo completo nella comparazione con i dati degli altri alberi adulti.

4.3.4. Prove di pull-out

Il pullout è il metodo di rilievo utilizzato per la raccolta dati delle prove di trazione statica. Il procedimento impiegato è lo stesso di quello utilizzato da altri autori (Schwarz et al. 2012; Dazio 2016; Vergani et al. 2016; Vergani et al. 2017). In queste misurazioni l'obiettivo è quello di misurare la forza di trazione massima prima della rottura della radice e per raggiungere tale scopo si va ad esercitare una forza sulla radice presa in esame. Questo procedimento serviva a simulare il comportamento dell'apparato radicale durante un evento quale una frana superficiale, testando l'apporto che le radici di Betulla portano alla resistenza del suolo.

Dopo aver selezionato un albero adatto alle misurazioni, si procedeva con lo scavare una buca a distanza di 1,5 m, 2,5 m e 3,5 m. Lo scavo non doveva essere necessariamente profondo, ma doveva portare all'individuazione di radici utilizzabili alla prova privilegiando gli esemplari con diametri superiori ai 10 mm. Una volta individuata la radice da

testare si scavava in modo che questa sporgesse liberamente dal terreno per almeno 20-30 cm in caso di radici con diametro compreso tra 10-20 mm, mentre per soggetti con diametri inferiori bastava avere una lunghezza di 10 cm (Vergani e al. 2017). Si procedeva col numerare la radice e misurarne il diametro in dettaglio con il calibro appun- tando il tutto su un'apposita tabella con data, ora della rilevazione ed eventuali note aggiuntive.

Esemplari con diametri maggiori a 20 mm sono stati difficili da riscontrare, poiché l'apparato radicale della betulla tende ad avere numerose radici sottili, piuttosto che con grandi diametri.

Nella Figura 19 è possibile vedere il macchinario e parte della strumentazione sistemati in modo da iniziare la registrazione dei dati.



Figura 19 – Macchinario per la trazione pronto alla prova

Per effettuare la misurazione la radice veniva ancorata con un sistema che la ingabbiava in modo che durante la trazione non si sfilì. Il sistema di ancoraggio era composto da un anello di metallo su una vite lunga 15 cm. La vite era legata alla radice utilizzando delle fascette di plastica per le radici più sottili (Figura 20), mentre per grandi diametri veniva utilizzato il fil di ferro (Figura 21). Il procedimento è stato affinato dopo diversi tentativi, poiché le radici di betulla essendo abbastanza delicate, se non legate in modo corretto si rompevano ancor prima della trazione.



Figura 20 – Fissaggio di una radice di diametro inferiore a 20 mm al moschettone



Figura 21 – Fissaggio di una radice di diametro superiore a 20 mm all'asta di ferro

Il sistema di ancoraggio era collegato a una cella di carico, con capacità di trazione di 2000 kg, tramite un moschettone; inoltre, alla cella era collegato un sensore di spostamento a filo, fondamentale per misurare l'allungamento della radice prima della rottura. Il sensore, fissato su un paletto di legno, non veniva posto in linea alla direzione di trazione, ma posto sul lato della suddetta linea. Questa precauzione voleva evitare la rottura del sensore nel caso in cui il moschettone si fosse staccato bruscamente, causando un repentino rientro del filo all'interno dello strumento.

La cella di carico e il sensore di spostamento erano collegati a un data logger (CR 1000 Campbell Scientific) che effettuava più misurazioni al secondo. I dati registrati dal data logger venivano scaricati ogni 3 misurazioni su un portatile, per evitare di perdere informazioni a causa della limitata memoria dello strumento e salvate in formato .dat.

Nella Figura 22 è possibile vedere la postazione di misurazione delle prove statiche con tutto il materiale predisposto alla rilevazione.



Figura 22 – Postazione per la misurazione delle prove di pull-out

Per la maggior parte delle radici, al fine di applicare la forza statica, solo per le radici di grande calibro è stato utilizzato un verricello legato al tronco dell'albero mediante una cinghia.

La trazione delle radici avveniva nella direzione in cui queste entravano nel suolo, ponendo perciò lo strumento su una retta immaginaria dello sviluppo della radice. Questo era importante per cercare di raccogliere dati quanto più possibile aderenti alla realtà. Nel caso in cui la radice presentasse una curvatura ad angolo nella parte interrata, possiamo essere certi che la rottura avverrà in tale punto con un lavoro e un tempo inferiori rispetto ad una trazione lineare.

Durante la misurazione era importante applicare una forza costante al fine di minimizzare le variazioni date da diverse velocità di tiraggio: con lo strumento del prof. Schwarz era importante ruotare la leva lentamente, mantenendo sempre la tensione, fino a che non avveniva la rottura. Per l'altro metodo di trazione invece, l'uso del verricello, conferiva dei salti nelle misurazioni proprio perché la forza applicata non poteva essere dosata gradualmente: l'attrezzo non permette un incremento lineare e costante della forza esercitata sulla radice, perché dopo che la leva è arrivata in battuta bisogna farla tornare al punto di partenza.

Le radici una volta rotte venivano catalogate e misurate nel punto di rottura, il quale veniva segnato sull'apposita tabella e registrato

4.4. Strumenti utilizzati in campo

Gli strumenti utilizzati per i rilevamenti e raccolta dati in bosco per la parte della distribuzione radicale sono mostrati della Figura 23, nella Tabella 2 vengono riportati i nomi degli attrezzi.



Figura 23 – Strumenti utilizzati per la raccolta dati della distribuzione orizzontale

Tabella 2 – Elenco degli strumenti presenti in Figura 23

Numero	Strumento
1	Roncole
2	Picconi
3	Vanga e pale
4	Cesoie
5	Palette
6	Zappettini da giardino
7	Metro flessometro
8	Metro
9	Calibro elettronico
10	Vernice spray

Per quanto riguarda le prove di trazione, il materiale utilizzato è rappresentato nella Figura 24 e i relativi nomi nella Tabella 3.

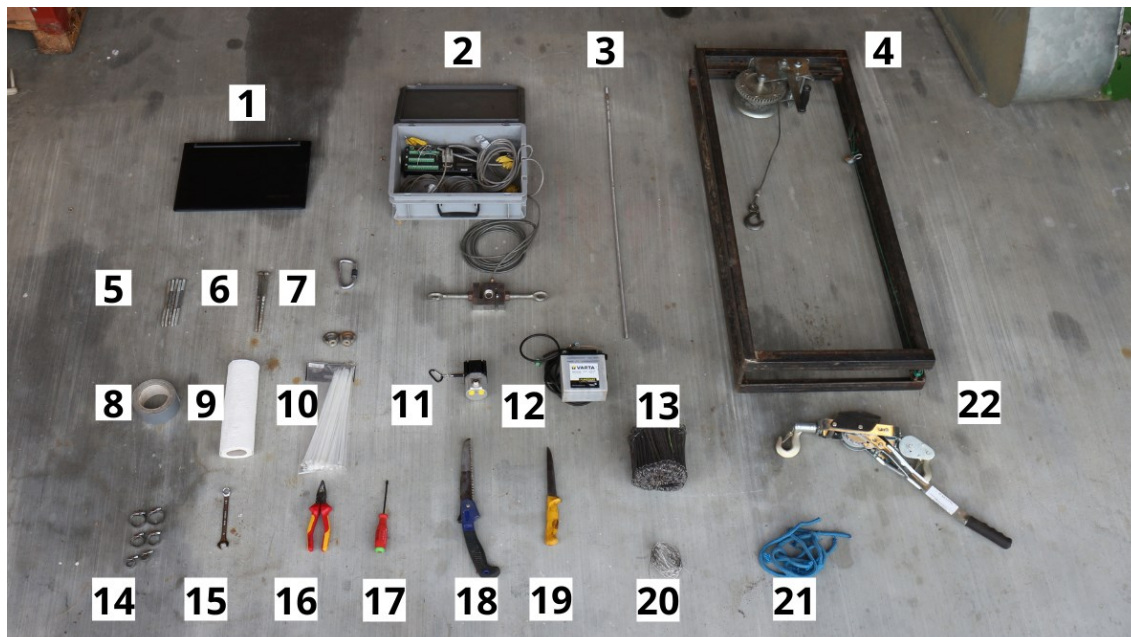


Figura 24 – Strumenti utilizzati per le prove di pull-out

Tabella 3 – Elenco degli strumenti presenti in Figura 24

Numero	Strumento
1	Portatile
2	Data logger e cella di carico
3	Asta di ferro
4	Macchinario per la trazione statica
5	Viti per radici minori
6	Vite
7	Moschettone
8	Nastro adesivo
9	Carta assorbente
10	Fascette in plastica
11	Sensore di spostamento
12	Batteria
13	Fascette di ferro
14	Fascette di ferro
15	Chiave inglese
16	Pinza
17	Cacciavite
18	Seghetto pieghevole
19	Seghetto
20	Fil di ferro
21	Corda
22	Verricello manuale

5. Analisi dati e risultati

5.1. La distribuzione media orizzontale

La Figura 25 ci permette di osservare la distribuzione media radicale nelle misurazioni ottenute dalle trincee a 1,5 m di distanza dal tronco. Appare evidente che il numero maggiore di radici corrisponde alla classe diametrica più bassa: infatti l'apparato radicale della betulla tende a sviluppare numerose radici sottili. Diametri che raggiungono il centimetro o più sono limitati a pochi esemplari; l'esemplare più alto misurato nelle diverse trincee scavate ha un diametro di 28 mm, ma si tratta di unico caso sporadico.

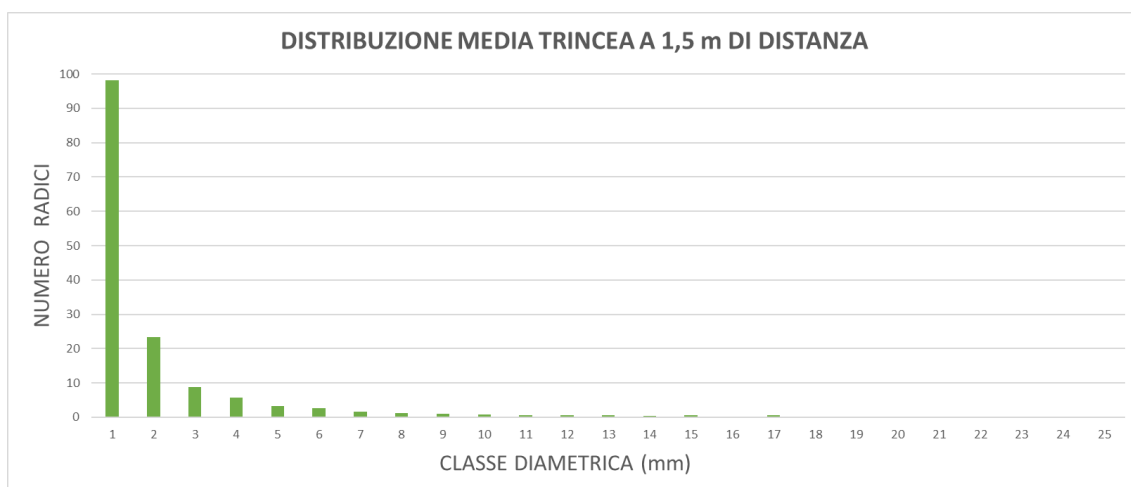


Figura 25 – Distribuzione media orizzontale delle radici nelle trincee a 1,5 m di distanza dal tronco

Per le trincee scavate a 2,5 m di distanza il risultato ottenuto mostra una diminuzione del numero di radici osservate. Il grafico mostra la distribuzione media ricavata dall'elaborazione dati: si riconferma con il maggior numero di soggetti la classe diametrica di 1 mm. Per le altre classi diametriche il numero di esemplari subisce un calo sensibile, soprattutto nelle classi più alte dove non sono presenti radici al di sopra dei 20 mm di diametro (Figura 26).

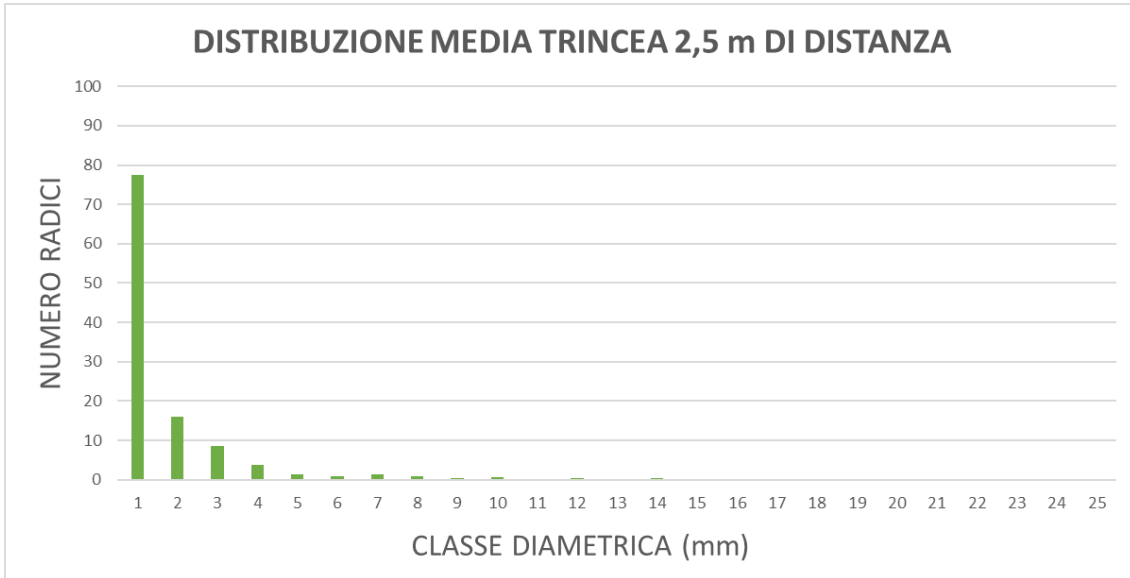


Figura 26 - Distribuzione media orizzontale delle radici nelle trincee a 2,5 m di distanza dal tronco

Per quanto riguarda la trincea più distante, i risultati della distribuzione media mostrano la tendenza invariata: il maggior numero di radici è sempre della classe di 1 mm ed esemplari con diametri maggiori sono difficili da riscontrare (Figura 27).

Durante la raccolta dati era evidente il calo del numero di esemplari nelle trincee a 3,5 m: questo perché l'apparato radicale di *Betula pendula* si sviluppa maggiormente in un raggio di 1,5 – 2 m come verrà mostrato di seguito nel caso dello scavo completo.

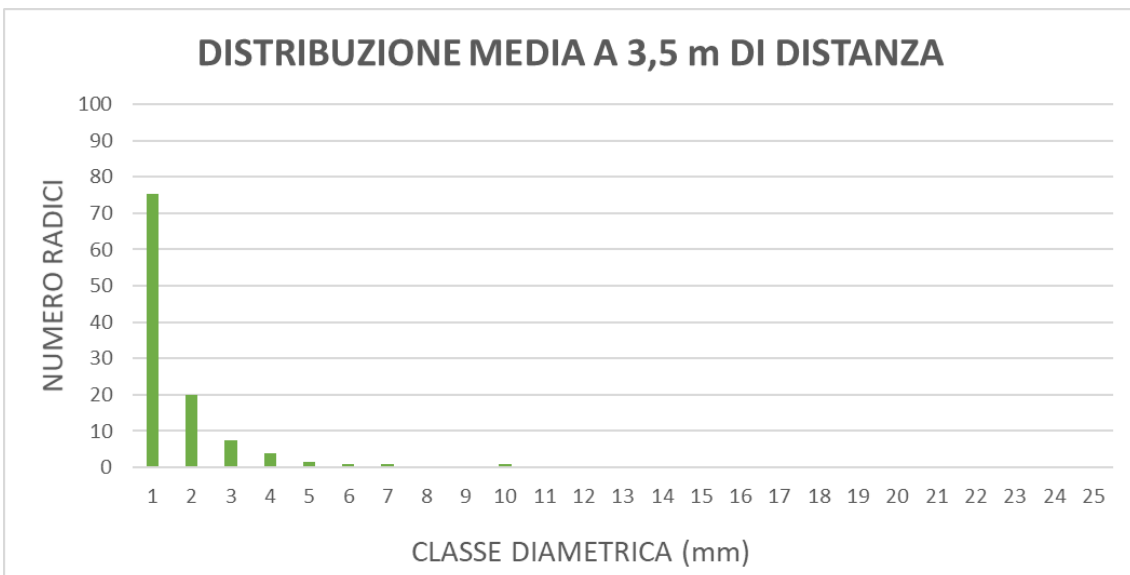


Figura 27 - Distribuzione media orizzontale delle radici nelle trincee a 3,5 m di distanza dal tronco

Comparando i dati soprariportati in unico grafico, Figura 28, è possibile notare che le curve della distribuzione hanno lo stesso andamento, pur discostandosi leggermente nel valore. Gli esemplari con diametri maggiori si trovano nelle trincee a 1,5 m, mentre a distanze superiori è raro trovare radici che raggiungano i 20 mm.

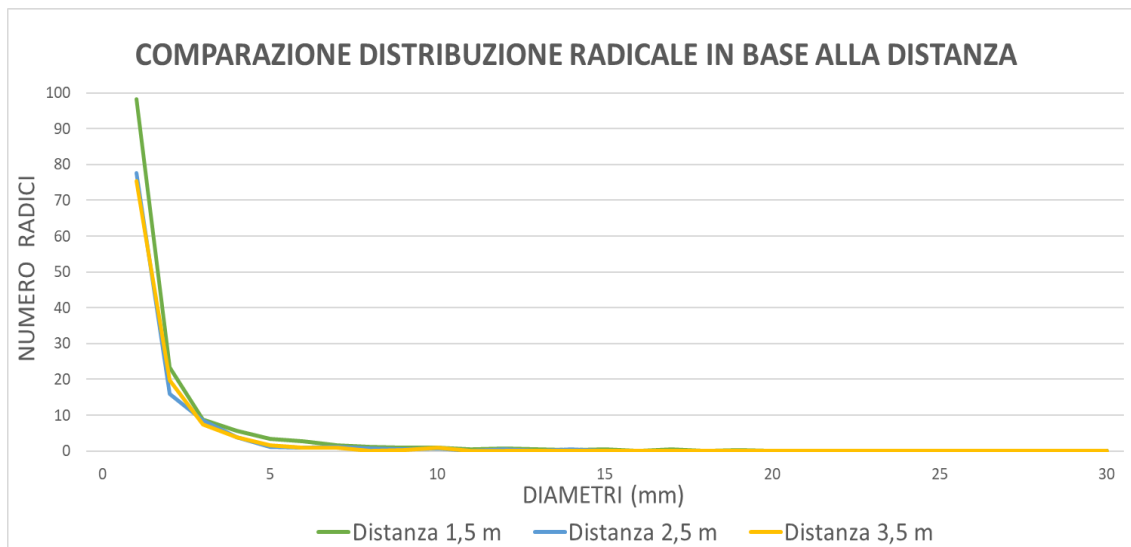


Figura 28 – Grafico riassuntivo delle tre distribuzioni medie

Andando ad analizzare le medie delle due rispettive aree di studio, Figure 29 e 30, vi sono alcune differenze legate alla distribuzione dei valori che dipendono dalla diversa conformazione dei due boschi e dal diverso accrescimento che presentano gli stessi. Prendendo in analisi i soggetti analizzati ad Arbedo è evidente il numero inferiore di radici rispetto agli alberi di Cugnasco. Questa differenza potrebbe trovare una delle sue ragioni nel fatto che i casi presi in esame ad Arbedo sono inseriti in una faggeta matura: le rare betulle presenti risentono dei fenomeni di competizione con le altre specie, di conseguenza il loro accrescimento, sia per la parte epigea che per la parte ipogea, è inferiore rispetto ad esemplari con condizioni migliori.

Un'altra osservazione possibile facendo riferimento ai due grafici è la similitudine della distribuzione: un'alta presenza di radici per le classi diametriche più basse e pochi esemplari per i diametri maggiori ai 10 mm.

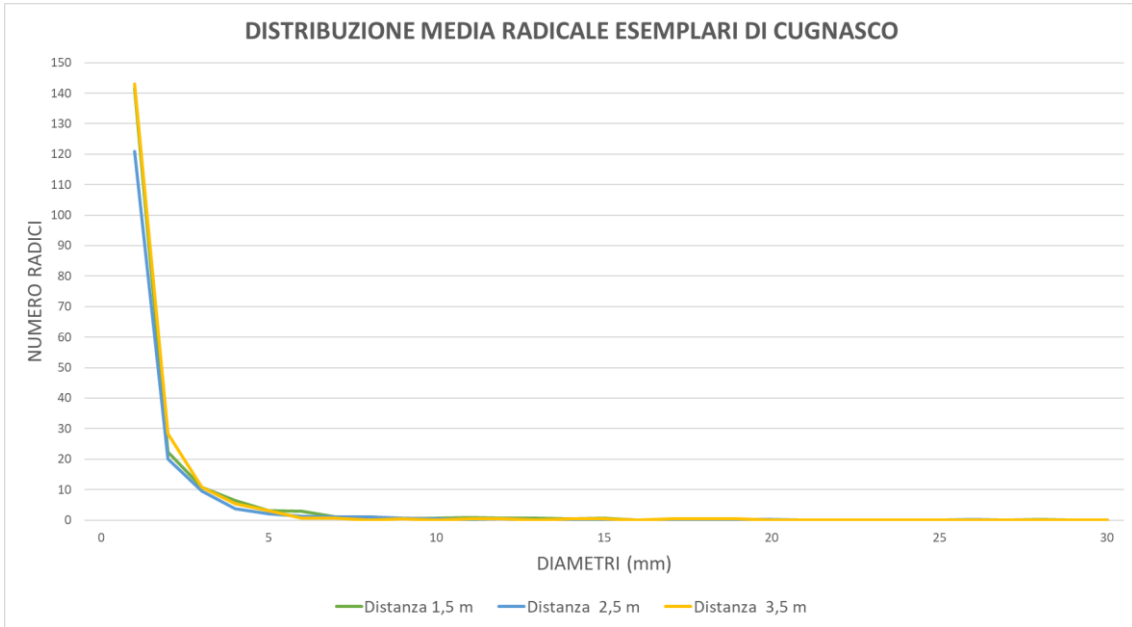


Figura 9 – Distribuzione orizzontale media degli esemplari di Cugnasco

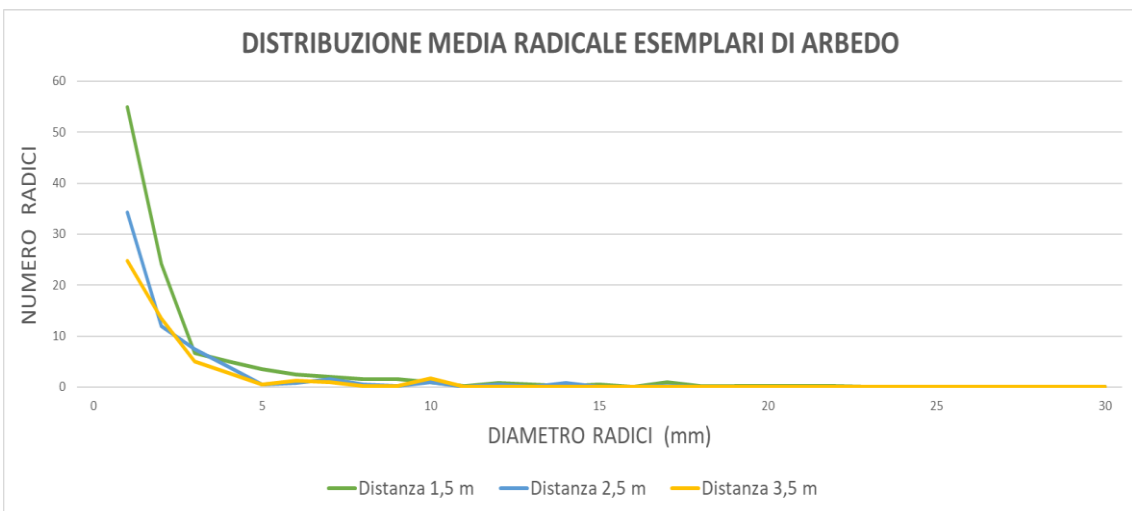


Figura 30 – Distribuzione orizzontale media degli esemplari di Arbedo

5.2. La distribuzione media verticale

Oltre alla distribuzione orizzontale, durante gli scavi, sono stati raccolti anche i dati relativi alla distribuzione verticale. Nella Figura 31, un esempio di un profilo prima della conta delle radici.



Figura 31 – Profilo superiore di una trincea prima della conta delle radici

Di seguito la restituzione grafica della distribuzione media degli otto esemplari presi in esame. Nella Figura 32 è riportata la distribuzione media verticale delle trincee a 1,5 m di distanza. Risulta evidente che il maggior numero di esemplari si concentra nei primi 30 cm di suolo con circa 70 radici ripartite nelle diverse classi diametriche. Da 30 a 90 cm diminuisce significativamente la presenza di radici sottili (1-2 mm). Alla profondità di circa un metro non si rivengono altre radici e nemmeno scavando ulteriormente.

Nonostante la prossimità al tronco è già visibile come la betulla non esplori il suolo in profondità, ma si limita prevalentemente nei primi 30 cm.

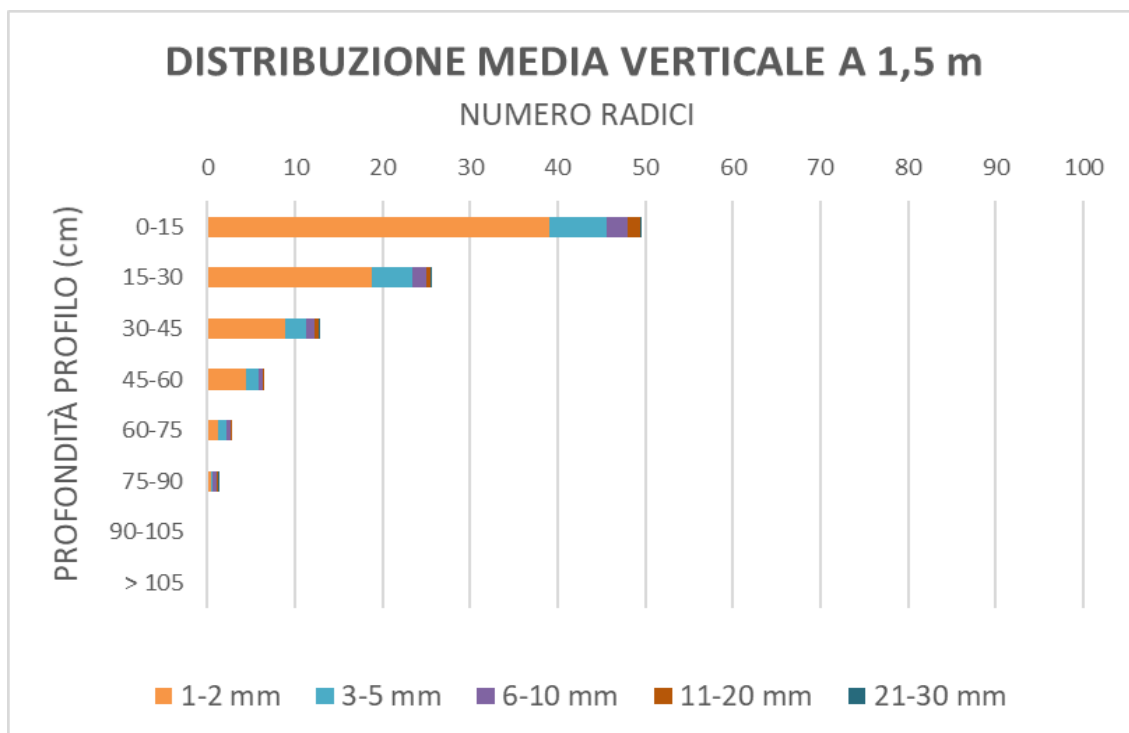


Figura 32 – Distribuzione media verticale delle radici di betulla a 1,5 m di distanza

Nella Figura 33 è riportata la distribuzione media verticale delle radici delle trincee a 2,5 m. Allontanandosi dal tronco diminuisce non solo il numero medio di radici, ma anche la profondità del suolo che queste esplorano: già a partire dal profilo 70-95 cm non sono più presenti radici di *Betula pendula*. Per quanto i profili da 0 a 60 cm notiamo un aumento del numero complessivo di radici distribuite nelle diverse classi diametriche.

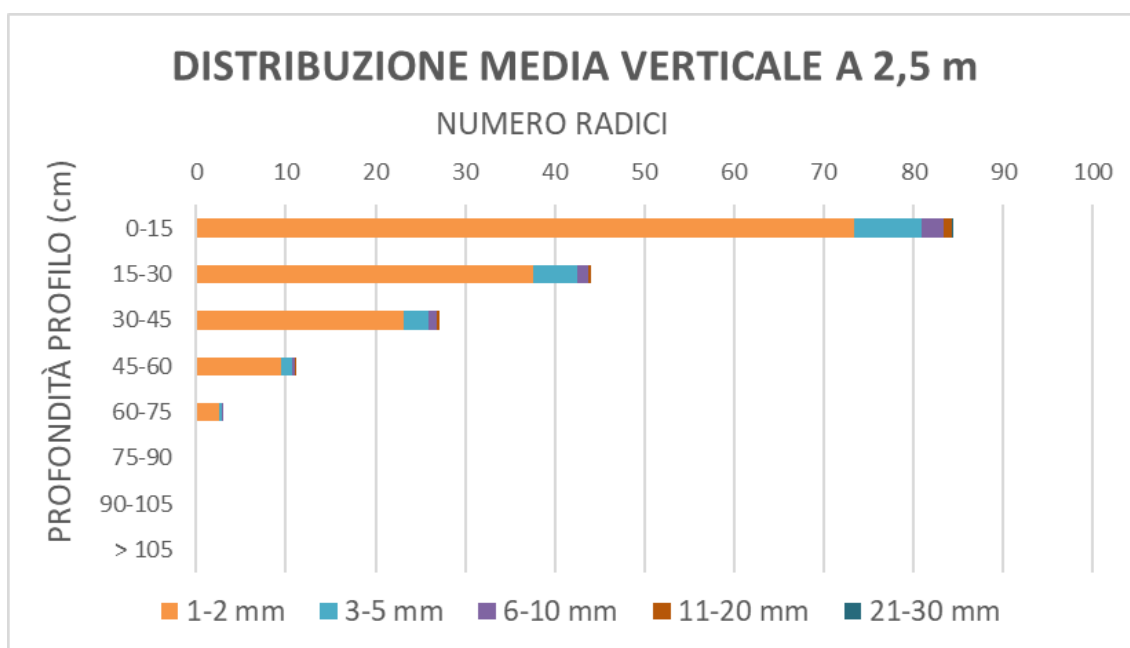


Figura 33 – Distribuzione media verticale delle radici di betulla a 2,5 m di distanza

Come sempre si ha una prevalenza dei diametri 1-2 mm, mentre le altre classi sono presenti in misura decisamente inferiore.

Per le radici delle trincee a 3,5 m di distanza dal tronco viene confermata la tendenza a non approfondire il suolo oltre i 75 cm di profondità. La quantità di radici per ogni profilo diminuisce, così come diminuisce la variabilità delle classi diametriche presenti: le classi presenti sono solamente tre, dalla 1-2 mm a 6-10 mm (Figura 34).

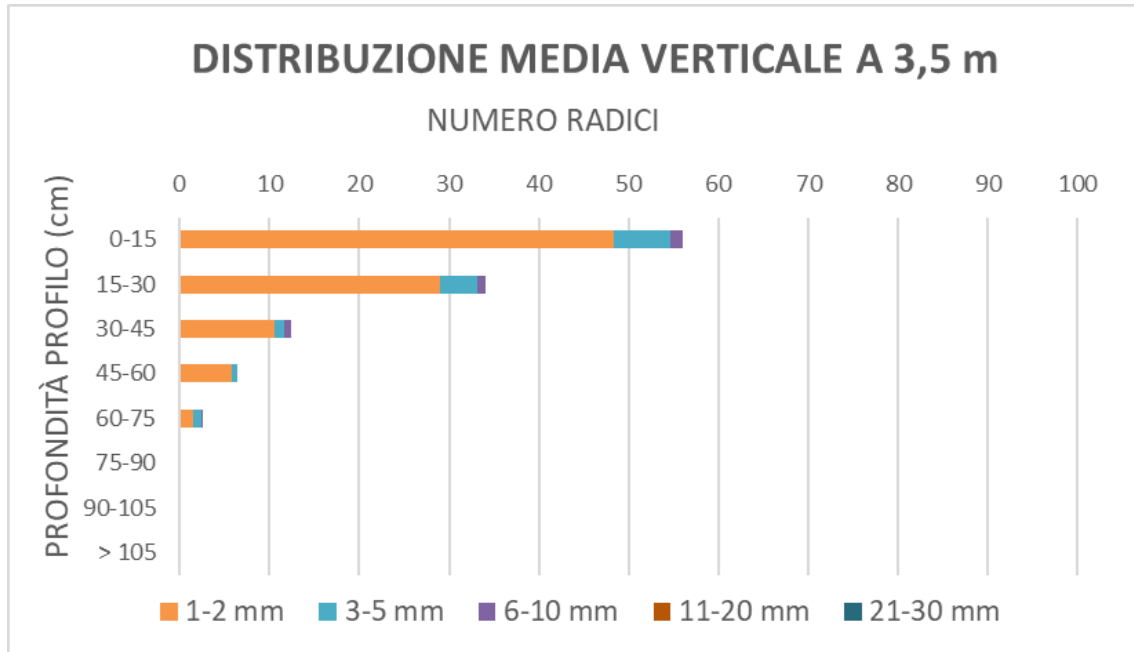


Figura 34 – Distribuzione media verticale delle radici di Betulla a 3,5 m di distanza

5.3. La distribuzione in uno scavo completo

Nella località di Cugnasco è stato effettuato uno scavo completo di un esemplare di Betulla di 69 anni per comprendere lo sviluppo globale dell'apparato radicale di un esemplare (Figure 16 e 17).

Per analizzare l'esemplare numero 2 di Cugnasco sono state tracciate 2 circonferenze: a 1,5 m e a 2,5 m; in seguito, queste sono state divise in settori in modo da normalizzare gli scavi delle trincee al metro di larghezza. Per la circonferenza minore sono state ottenute 10 trincee, mentre per la maggiore 15. Per ognuno dei 25 settori è stata raggiunta la profondità di circa 1 metro, poiché oltre non era presente alcuna radice.

Di seguito vengono riportati i grafici relativi alla distribuzione media orizzontale e verticale dell'esemplare.

Come già visto per la distribuzione media generale, anche nel grafico della Figura 35, troviamo una netta preponderanza delle radici di classi diametriche basse (1-2 mm). Esemplari con diametri maggiori a 10 mm sono sporadici già alla distanza di 1,5 m. La distribuzione presenta numeri così contenuti perché in prossimità della corona, la betulla presenta poche radici principali che poi si diramano successivamente a maggior distanza (Figura 36).

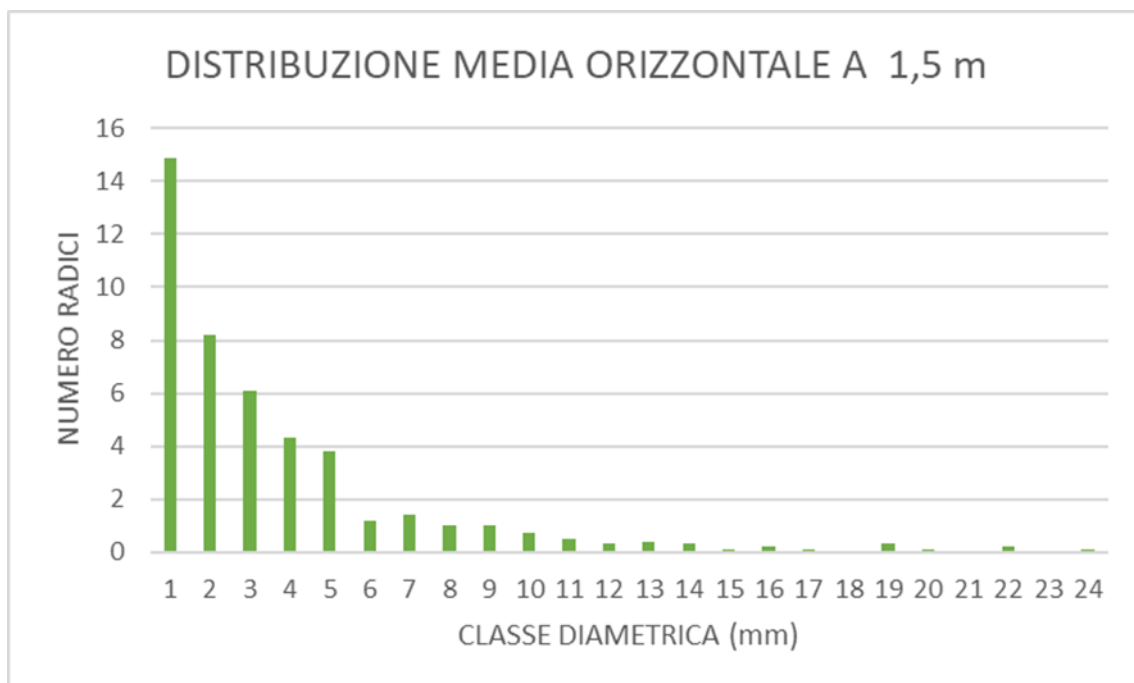


Figura 35 – Distribuzione media orizzontale delle radici dell'esemplare 2 di Cugnasco a 1,5 m di distanza dal tronco



Figura 36 – Immagine della distribuzione delle radici dal tronco fino a 1,5 m

A 2,5 m il numero di radici di classe diametrica 1 mm sono presenti in numero altissimo, a conferma della ramificazione che si va a delineare man mano che le ci si allontana dal tronco (Figura 37).

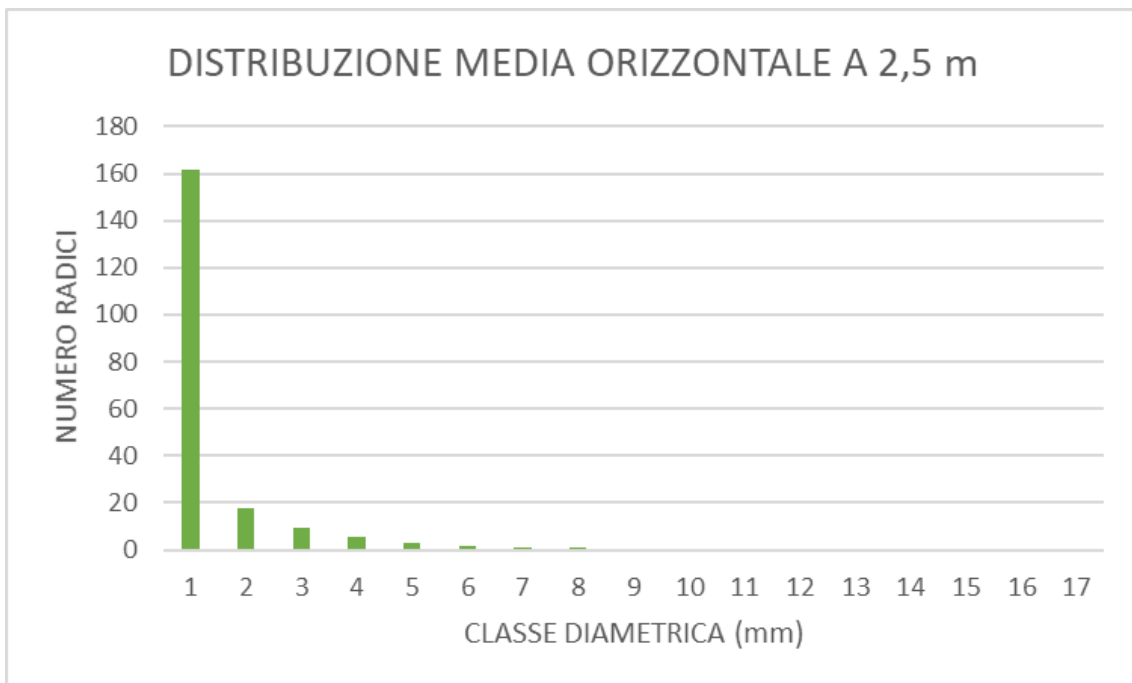


Figura 37 – Distribuzione media orizzontale delle radici dell'esemplare 2 di Cugnasco a 2,5 m di distanza dal tronco

Radici di diametri maggiori sono visibili alla Figura 38 che è un ingrandimento del grafico precedente.

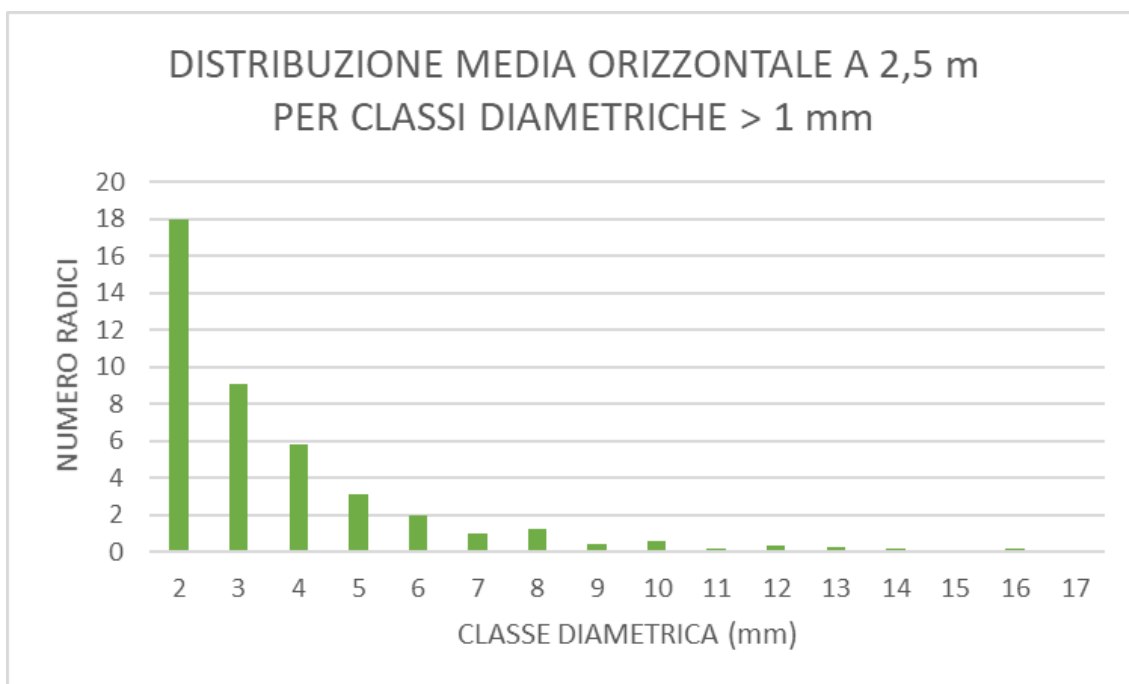


Figura 38 – Ingrandimento del grafico sulla distribuzione orizzontale dell'esemplare 2 di Cugnasco a 2,5 m di distanza dal tronco

Gli esemplari con diametro da 3 a 4 mm sono presenti, in media, con circa 6-10 esemplari ciascuno. Per classi diametriche maggiori il numero di esemplari diminuisce sensibilmente: per soggetti dai 6 ai 10 mm sono presenti singole radici. Mentre per diametri maggiori a 1 cm le radici diventano rare e sporadiche, limitando la presenza in qualche trincea sparsa.

Per quanto riguarda la distribuzione verticale si conferma la tendenza già vista per la media generale: a 1,5 m le radici raggiungono al più una profondità di 75 cm; oltre non vengono ritrovate radici di betulla. In realtà la maggior parte delle radici ritrovate nel profilo di 60-75 cm rientrano nei primi 10 cm, oltre si trova qualche singola radice molto sottile (Figura 39).

Il profilo che presenta il più alto numero di radici è lo 0-15 cm, quello più superficiale, seguito dal 30-45 cm e poi dal 15-30 cm. Le radici di classe diametrica di 1-2 mm sono le più numerose in tutti i profili eccetto che nel 60-75 cm, dove la classe numericamente maggiore è la 6-10 mm. La differenza rispetto alla media generale è data dalla presenza ben visibile della classe diametrica 11-20 mm nei profili 0-15 e 30-45.

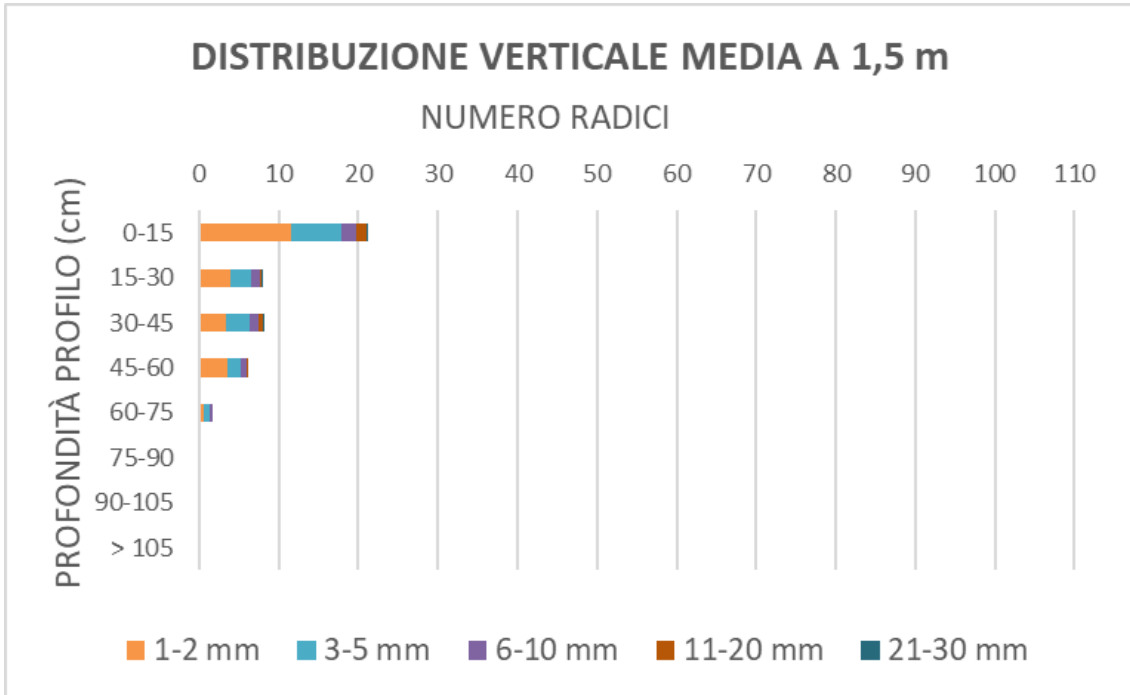


Figura 39 – Distribuzione media verticale della Betulla 2 di Cugnasco a 1,5 m di distanza

A 2,5 m dal tronco, la distribuzione verticale vede ancora la presenza maggiore di radici nel profilo 0-15 cm e nel 15-30 cm. Le radici non sono presenti oltre i 75 cm. I profili che vanno da 30 a 75 cm presentano un limitato numero di esemplari (Figura 40).

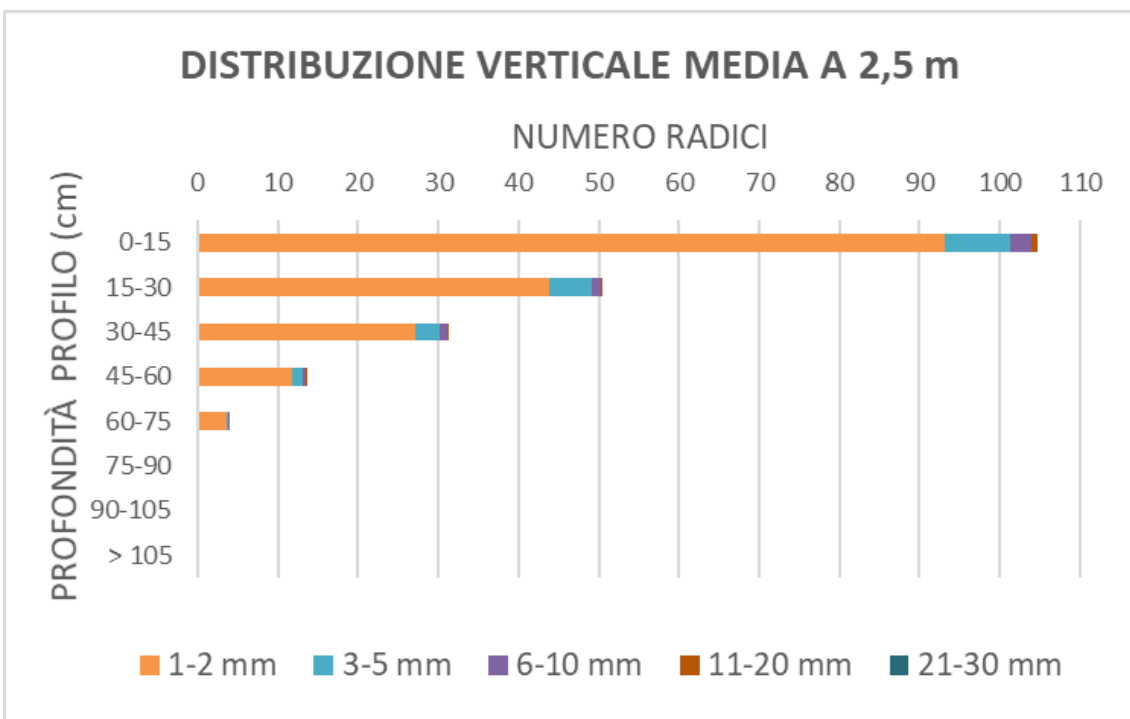


Figura 40 – Distribuzione media verticale dell'esemplare 2 di Cugnasco a 2,5 m di distanza

5.4. Le prove di pull-out

I dati delle prove di trazione statica sono stati elaborati e poi inseriti in un grafico, indicando le forze di trazione massime in relazione con il diametro delle radici (Figura 41).

I dati delle singole radici prese in esame sono rappresentati con dei cerchi verdi. L'analisi della regressione di questi dati, rappresentata dalla linea tratteggiata, mette in relazione la forza di trazione ed i diametri delle radici. Attraverso questa stima è possibile ipotizzare al meglio la forza di trazione massima delle radici i cui diametri non sono stati misurati in campo. Con questo modello, inoltre, si ottengono le costanti della curva di regressione che sono necessarie per il calcolo del rinforzo radicale.

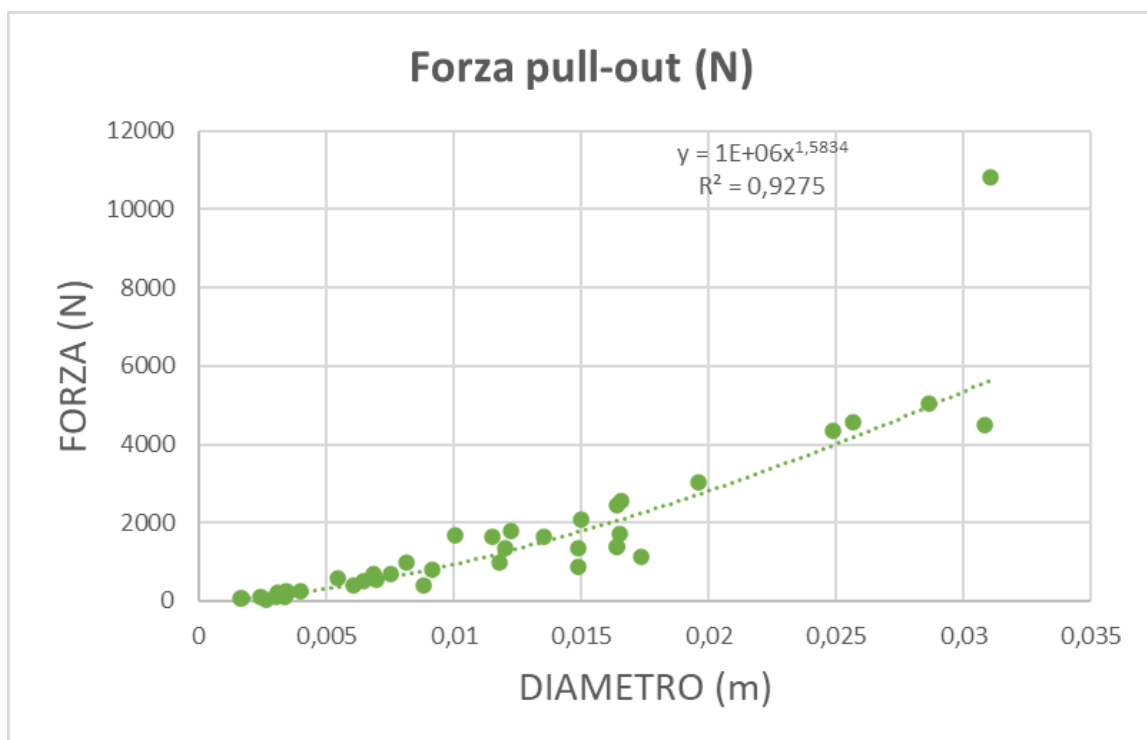


Figura 41 – Grafico delle forze massime e diametro radici ottenuto con i dati del pull-out

Le misurazioni svolte sulle radici più piccole (tra 1-4 mm) presentano una bassa variabilità e si trovano quindi molto vicine alla linea, mentre per diametri maggiori (da 5 mm a 10 mm) esiste una variabilità minima, la quale risulta invece più marcata per diametri superiori ai 10 mm.

Rispetto alla curva ottenuta dalle prove con l'ailanto (Gottardi, 2017), nella betulla non abbiamo un'elevata variabilità: le radici di quest'ultima si sviluppano in modo abbastanza lineare anche nei diametri maggiori e non presentano angolature significative, fatta eccezione per la presenza di ostacoli.

6. Discussione

6.1. Distribuzione orizzontale

Il lavoro di raccolta dati è stato svolto per colmare una lacuna sulle specie pioniere rimasta nella trattazione scientifica sul rinforzo radicale delle diverse specie dell'arco alpino. Perciò è stata scelta la specie *Betula pendula* come oggetto di studio.

Per la betulla erano stati condotti degli studi riguardo la forza di trazione per radici con diametro inferiore a 2 mm (Giadrossich, 2016); tuttavia poco si conosceva in merito alla sua distribuzione radicale, fondamentale per un'elaborazione completa del rinforzo radicale (Schwarz, 2012). Per questa ragione sono state raccolte le informazioni su come si sviluppa l'apparato radicale di *Betula pendula* nel suolo.

L'apparato radicale della betulla si sviluppa, soprattutto nelle fasi giovanili, nella parte superficiale con una/due radici principali. Da queste si ramificano una serie di radici sottilissime, dal diametro inferiore a 1 mm. Queste radici, con il progredire dell'età, tendono a morire lasciando solo le radici con diametri maggiori nelle parti più datate nella radice, mentre ai margini è possibile notare un'elevata ramificazione di giovani e sottili radici.

Dall'elaborazione della distribuzione orizzontale dell'apparato radicale degli esemplari adulti emerge chiaramente che il maggior numero di radici si trova nella trincea più prossima al tronco: a 1,5 m la classe diametrica prevalente è quella di 1 mm con poco meno di 100 esemplari. Diametri compresi tra i 10-25 mm sono limitati a qualche caso: il diametro più alto misurato in assoluto è pari a 28 mm. Inoltre, durante gli scavi, è emersa la tendenza delle radici principali a biforcarsi in esemplari di diametro inferiore man mano che ci si allontana dal tronco.

Questa è la ragione per cui a 2,5 m il diametro massimo misurato è di 26 mm ma limitato a questo singolo caso isolato, tutte le altre radici rientrano al di sotto dei 20 mm. Anche a questa distanza la tendenza maggiore è dettata dalle classi diametriche più basse.

I risultati riportati nella terza trincea mostrano un numero stabile di radici delle classi diametriche inferiori. Per quanto riguarda radici con diametri maggiori a 10 mm sono stati misurati pochi singoli casi. Il diametro maggiore rilevato a questa distanza è pari a 20 mm.

Da questi risultati emerge chiaramente la tendenza della betulla a sviluppare un apparato radicale composto da pochi esemplari con diametri elevati, i quali si sviluppano e diramano. È evidente, per di più, come *Betula pendula* tenda a sviluppare un alto numero di radici di classe diametrica inferiore ai 2 mm. Inoltre, come dimostrato da Vergani (Vergani 2016), le radici sottili hanno un rapido turnover, in pochi mesi, rispetto a radici di diametri maggiori che hanno un turnover fino a una decina di anni.

Comparando i soggetti delle due diverse aree di studio emerge una differenza nel numero di radici maggiore rinvenute a Cugnasco rispetto che ad Arbedo. Le ragioni di questa differenza potrebbero dipendere dalla diversità delle due aree: il bosco preso in esame a Cugnasco è posto a un'altitudine inferiore rispetto al bosco di Arbedo; inoltre, anche la struttura del bosco è abbastanza diversa. Gli esemplari oggetto di studio a Cugnasco sono maggiormente esposti al sole e meno soggetti a fenomeni di competizione: gli esemplari di faggio di quest'area sono distanti dagli esemplari di betulla. Di conseguenza le betulle hanno avuto modo di crescere maggiormente. Ad Arbedo invece gli esemplari presi in esame sono nel cuore di una faggeta: l'incendio avvenuto negli anni Settanta è stato solo superficiale e perciò non ha comportato a una vera e propria distruzione del bosco. Gli esemplari di *Fagus sylvatica* presenti creano limitate condizioni di accrescimento per le betulle che ne risentono, perciò, anche dal punto di vista dell'accrescimento radicale.

6.2. Distribuzione verticale

Approfondendo l'analisi alla distribuzione verticale, che è rilevante per il rinforzo basale al suolo (Stokes, 2009), emergono dati chiari. La quasi totalità delle radici di *Betula pendula* si trova nei primi 30 cm di profondità del suolo. Guardando i grafici della distribuzione verticale appare evidente come a qualsiasi distanza dal tronco la tendenza rimanga invariata: la betulla sviluppa la maggior parte del suo apparato da 0 a 30 cm; mentre al di sotto dei 30 cm troviamo in minor numero di radici, il quale si azzerà al di sotto dei 75 cm di profondità.

Solamente nelle trincee a 1,5 m dal tronco abbiamo qualche radice di basso diametro nel profilo 75-90 cm.

Le radici di diametro maggiore si sviluppano per la maggior parte entro i 30 cm di profondità. La tendenza che emerge è quella per cui radici con diametri maggiori (superiori a 10 mm) diminuiscono sensibilmente il loro numero all'aumentare della profondità rispetto all'aumentare della distanza dal tronco. Questo conferma che anche gli esemplari adulti di *Betula pendula* tendono a sviluppare maggiormente il proprio apparato radicale in superficie piuttosto che approfondire l'esplorazione del suolo.

Alberi con apparati radicali che esplorano più in profondità il terreno permettono di avere un miglior effetto di ancoraggio (Rayner e Nicoll, 2012); tuttavia i dati dimostrano come la betulla non rientri in questa categoria dato il suo sviluppo limitato negli strati più profondi del terreno.

In casi in cui le radici si sviluppino in una rete parallela al versante e non penetrino negli strati più profondi del suolo, il meccanismo di rinforzo radicale dominante è quello del rinforzo laterale (Schwarz, 2010a). Questo è il caso della betulla bianca.

6.3. Le prove di pull-out

Nell'analisi delle prove di trazione statica è necessario partire col dire che vi è un grosso limite posto dalle dimensioni del diametro delle radici: trovare esemplari con diametri uguali o superiori ai 20 mm non è semplice. La betulla non tende a sviluppare numerose radici di grandi diametri e nel rinforzo radicale basale gli esemplari influenti hanno misure che partono dai 20 mm di diametro.

Comparando i risultati con quelli ottenuti da studi precedenti su altre specie (Dazio 2016; Vergani 2016; De Boni 2017; Vergani 2017) la betulla tende ad avere proprietà meccaniche simili a quelle del castagno, del pino silvestre e dell'ailanto.

Le radici di betulla non presentano una grande variabilità nei dati. Questo potrebbe dipendere dal fatto che l'apparato radicale di *Betula pendula* non presenta tortuosità nel suo sviluppo, a meno che non incontri degli ostacoli nel suolo come rocce o massi. Inoltre, dalla distribuzione è emerso come si sviluppi in maniera piuttosto orizzontale, invece di scendere e approfondire il suolo.

La bassa variabilità è anche rappresentata dal fatto che non sono emerse particolarità per le diverse radici degne di nota, se non alcune radici con degli angoli vivi a causa di un ostacolo che portano a risultati che si discostano maggiormente dalla linea di regressione.

7. Conclusioni

L'analisi delle distribuzioni e delle proprietà meccaniche delle radici riveste un ruolo fondamentale per comprendere il loro contributo riguardo la protezione contro pericoli naturali come le frane superficiali.

Betula pendula è una specie pioniera che tende a colonizzare aree a seguito di fenomeni di disturbo come incendi o altri eventi che sconvolgono l'assetto del bosco e ne modificano sensibilmente la composizione. Per questa ragione è utile conoscere l'apporto che questa specie può dare all'interno di un bosco di protezione: per capire se anche la fase transitoria costituita da specie pioniere può rivestire un ruolo di protezione o meno.

L'obiettivo di questo lavoro è comprendere l'architettura dell'apparato radicale e misurare la resistenza alla trazione statica della betulla.

Per quanto riguarda la distribuzione delle radici, *Betula pendula*, dimostra un'omogenea distribuzione nel suolo. L'apparato radicale tende a non approfondirsi nel suolo: l'esplorazione delle radici si mantiene per lo più nei primi 30-45 cm di suolo, raggiungendo al più i 60 cm di profondità.

L'apparato radicale tende a svilupparsi in modo fascicolato: nella fase adulta ritroviamo qualche radice principale da cui si diramano numerosissime radici minori, infatti la tendenza dimostrata nelle distribuzioni è proprio quella di un alto numero di radici con classe 1 mm.

Per i dati sulla trazione la betulla risulta in linea con altre specie misurate, il grande limite che presenta ai fini del rinforzo radicale è lo scarso numero di radici dal diametro utile per la mitigazione delle dinamiche provocate da dissesto idrogeologico.

Dato lo sviluppo radicale superficiale e fine è possibile affermare che il principale meccanismo di rinforzo radicale contro le frane superficiali di *Betula pendula* è il rinforzo radicale laterale.

In futuro potrebbe essere ampliare il numero di casi raccolti, soprattutto in merito alle prove di trazione. Inoltre, sarebbe interessante effettuare rilevazioni su suoli diversi da quelli incontrati in questo studio, per capire se l'apparato radicale tende a svilupparsi in maniera omogenea anche su suoli difficili.

Ringraziamenti

Vorrei ringraziare il Prof. Massimiliano Schwarz per l'esperienza in campo, seguendomi nel lavoro di raccolta dati e il Prof. Gian Battista Bischetti per la premura dimostrata durante l'attività di tirocinio in Svizzera e insieme al Dott. Ing. Alessio Cislighi per l'analisi dei dati e la stesura dell'elaborato.

Un grazie speciale anche al centro di ricerca WSL di Cadenazzo e a tutto il personale che mi ha seguito, aiutato e con cui ho collaborato durante l'esperienza di tirocinio.

E infine un grazie a chi mi ha incoraggiato a non mollare mai.

8. Bibliografia

- A.A.V.V., 2005, Linee guida per la valutazione del dissesto idrogeologico e la sua mitigazione attraverso misure e interventi in campo agricolo e forestale
- A.A.V.V., 2005, Mitigation of hydro-geological risk in Alpine Catchments, pag 13-18,
- A.A.V.V., 2003, Operatore nei cantieri d'ingegneria naturalistica, casa editrice stefanoni,
- A.A. V.V., 2006, Foreste di protezione diretta - Selvicoltura e valutazioni economiche nelle Alpi occidentali, Compagnia delle Foreste
- A.A.V.V., 2008, Definizione delle soglie pluviometriche d'innescio di frane superficiali e colate torrentizie: accorpamento per aree omogenee, IReR – Istituto regionale di ricerca della Lombardia, Codice IReR: 2007B023
- A.A.V.V., 2006, Fenomeni di dissesto geologico - idraulico sui versanti, APAT - Agenzia per la protezione dell'ambiente e per i servizi tecnici
- Bischetti et al., 2009, Root cohesion of forest species in the Italian Alps, Plant Soil
- Bischetti e D'Agostino, 2010, Sistemazioni Idraulico Forestali: Indirizzi per gli interventi, Quaderni della Ricerca n. 116
- Blaser et al., 1997, Cryptopodzolic Soils in Switzerland
- Brang et al., 2006, Management of protection forests in the European Alps: an overview,
- Brauner e al., 2005, Forest management decision support for evaluating forest protection effects against rockfall
- CNEL, 2000, L'evoluzione della politica forestale italiana dalla legge Serpieri alle sfide europee: obiettivi e strategie, Consiglio Nazionale dell'Economia e del Lavoro – Gruppo di Lavoro sulle materie afferenti il settore Legno
- Commisione de Marchi, 1970, Atti della Commisione – Relazione conclusiva
- Dazio, 2016, Root reinforcement of different silvicultural management types of *Castanea sativa*, Master Thesis, University of Bern
- De Boni, 2017, Root system analysis of the tree of heaven (*Ailanthus altissima* (Mill.) Swingle) and its reinforcement to the soil, Master Thesis, University of Bern
- De Nicola, 2017, Il ruolo del ceduo di castagno sulla stabilità dei versanti: un caso di studio in Valsesia – Piemonte, Tesi di laurea specialistica, Università degli studi di Milano
- Docker, 2003, Biotechnical engineering on alluvial riverbanks of southeastern Australia: A quantified model of the earth-reinforcing properties of some native riparian trees. A PhD thesis of the School of Geosciences of University of Sydney

Dorren et al., 2004, Integrity, stability and management of protection forests in the European Alps, *Forest Ecology and Management* 195 (2004) 165–176

Epis, 2010, Valutazione del rinforzo radicale del suolo operato dalle radici delle principali specie forestali della Lombardia, Tesi di dottorato, Università degli studi di Milano.

EUFORGEN, 2009, Silver birch *Betula pendula*, Technical guidelines for genetic conservation and use

Ferrucci, 2006, Lezioni di diritto forestale, Il vincolo idrogeologico, Capitolo VIII, ISBN 88-7178-783-8

FOEN, 2016, Protection against Mass Movement Hazards. Guideline for the integrated hazard management of landslides, rockfall and hillslope debris flows. Federal Office for the Environment, Bern. The environment in practice no. 1608: 97 p

Forbes and Broadhead, 2011, Forest and Landslides. The role of trees and forests in the prevention of landslides and rehabilitation of landslide-affected areas in Asia. FAO; RAP Publication 19/2011.

Forli e Guida, 2009, Il rischio Idrogeologico in Italia – Adempimenti e tecniche operative di intervento, Sistemi Editoriali

Frehner et al., 2005, Continuità nel bosco di protezione e controllo dell'efficacia Istruzioni per le cure nei boschi con funzione protettiva, DATEC

Gisotti, 2012, Il dissesto idrogeologico. Previsione, prevenzione e mitigazione del rischio, Dario Flaccovio Editore, capitoli 1 e 6

Graf Christopher, 2004, Uso delle piante per contrastare l'erosione e smottamenti superficiali, Sherwood N.99, 5-11

Gottardi, 2017, Analisi del rinforzo radicale dell'ailanto, Bachelor thesis, University of Bern

Lateltin et al., 2005, Landslide risk management in Switzerland, *Landslides* (2005) 2: 313–320 DOI: 10.1007/s10346-005-0018-8

Losey e Wehr, 2013, Forêt protectrice en Suisse Du projet SilvaProtect-CH à la forêt protectrice harmonisé

Meloni et al., 2006, Analisi della funzione protettiva delle foreste: l'esempio della "Carta delle foreste di protezione diretta della Valle d'Aosta", Italian Society of Silviculture and Forest Ecology. vol. 3, pp. 420-425.

Moos et al., 2016, How does forest structure affect root reinforcement and susceptibility to shallow landslides?, *Earth Surf. Process. Landforms*, Vol. 41, 951–96

Motta e Haudemand, 2000, Protective Forests and Silvicultural Stability an Example of Planning in the Aosta Valley, Mountain Research and Development. Vol. 20, n 2, 180-187

Plini e Tondi, 1989, La distribuzione appenninica della Betulla bianca, Natura e Montagna, n. 36

Rayner et Nicoll, 2012, Potential for woodland restoration above the A83 in Glen Croe to reduce the incidence of water erosion and debris flows, Research Agency of the Forestry Commission

Rickli & Graf, 2009, Effects of forests on shallow landslides - case studies in Switzerland, Forest Snow and Landscape Research, 82(1), 33-44.

Schwarz et al., 2010, Quantifying the role of vegetation in slope stability: A case study in Tuscany (Italy) Ecological Engineering 36 (2010) 285

Schwarz et al., 2012, Spatial characterization of root reinforcement at stand scale: Theory and case study, Geomorphology 171-172 (2012) 190–200

Schwarz et al., 2015, Root reinforcement of soils under compression, J. Geophys. Res. Earth Surf, 120 (10), 2103–2120

Stokes et al., 2009. Desirable plant root traits for protecting natural and engineered slopes against landslides, Plant Soil 324, 1–30

Stokes et al., 2014, Ecological mitigation of hillslope instability: ten key issues facing researchers and practitioners, Plant Soil (2014) 377:1–23

USGS, 2004, Landslide type and process, U.S. Department of the Interior U.S. Geological Survey, Fact Sheet 2004-3072

Varnes, 1978, Landslide Types and Processes, Capitolo III

Vergani et al., 2013, Root strength and density decay after felling in a Silver Fir-Norway Spruce stand in the Italian Alps, Plant Soil 377:63–81

Vergani et al., 2016, Root reinforcement dynamics of European coppice woodlands and their effect on shallow landslides: A review, Earth-Science Reviews 167 (2017) 88–102

Vergani et al., 2017, Investigation of root reinforcement decay after a forest fire in a Scots pine (*Pinus sylvestris*) protection forest, Forest Ecology and Management 400 339–352