



UNIVERSITÀ
POLITECNICA
DELLE MARCHE

DIPARTIMENTO DI SCIENZE AGRARIE, ALIMENTARI E AMBIENTALI (D3A)

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

**Analisi dendroanatomiche per valutare la
sensibilità climatica del faggio (*Fagus
sylvatica*) in Appennino centrale.**

Dendroanatomical analysis to estimate the climatic
sensitivity of beech (*Fagus sylvatica*) in the central
Apennines.

Tesi di Laurea di
Arianna Orsetti

Relatore
Prof. Carlo Urbinati

Correlatore
Dr. Enrico Tonelli

ANNO ACCADEMICO 2022-2023

SESSIONE OTTOBRE 2023

Indice generale

1 Introduzione	3
1.1 Contesto della tesi.....	3
1.2 Caratteri biogeografici ed ecologia climatica del Faggio.....	4
1.2.1 Areale distribuzione in Europa ed esigenze edafo-climatiche.....	5
1.2.2 Il faggio in appennino e nelle Marche.....	6
1.2.3 La sensibilità climatica del faggio.....	8
1.3 Dendroanatomia.....	9
1.4 Obiettivi della tesi.....	11
2 Materiali e metodi	12
2.1 Area di studio.....	12
2.1.1 Topografia, geomorfologia e litologia.....	12
2.1.2 Caratteri pedologici e climatici.....	13
2.2 Protocollo di campionamento in bosco.....	13
2.2.1 Realizzazione aree di saggio e rilevamento denrometrico-strutturale..	13
2.2.2 Prelievo dei campioni legnosi per analisi dendrocronologiche e anatomiche.....	15
2.3 Preparazione dei campioni anatomici e metodi di analisi.....	17
2.3.1 Operazioni preliminari.....	17
2.3.2 Taglio di sezioni anatomiche.....	17
2.3.3 Colorazione e fissazione del campione.....	19
2.4 Analisi dendroanatomica (ROXAS).....	21
2.5 Analisi statistiche.....	22
3 Risultati	24
3.1 Parametri dendroanatomici del faggio.....	24
3.2 Variabilità dendroanatomica secondo gradiente altitudinale.....	26
3.3 Variabilità dendroanatomica a seguito gelate tardive.....	34
3.4 Principali fattori di sensibilità climatica del faggio.....	42
4 Conclusioni	43
5 Bibliografia e Sitografia	44

1 INTRODUZIONE

1.1 Contesto della tesi

Il faggio (*Fagus sylvatica*) è la specie forestale più importante e maggiormente diffusa nel piano montano dell'Appennino, ma risulta avere una spiccata sensibilità climatica. Il clima è un fattore fondamentale che influenza la distribuzione geografica delle specie arboree, influenzando la rigenerazione, la crescita e la mortalità. Pertanto, i cambiamenti climatici possono alterare considerevolmente la distribuzione spaziale delle specie arboree e la struttura demografica delle loro popolazioni, il che può causare l'alterazione della composizione delle specie della vegetazione forestale. Tutti questi cambiamenti nelle popolazioni di specie arboree sono più distinti nelle aree soggette a intensi cambiamenti climatici a lungo termine (Klopčič M., Rozman A., Bončina A 2022).

La sensibilità climatica delle specie arboree può essere studiata con un approccio dendrocronologico, in particolare dendroclimatologico, in cui l'ampiezza degli anelli legnosi rappresenta la variabile chiave da analizzare (Schweingruber, 1996), mentre nella dendroanatomia sono i tratti anatomici del legno ad essere soggetto di analisi, lungo una serie annuale di anelli (Solana, 2016). Per analizzare in maniera approfondita quali sono gli effetti dei disturbi climatici anche sul faggio si può applicare la dendroanatomia, detta anche *quantitative wood anatomy* (QWA), tecnica recentemente sviluppata che consente di analizzare e studiare le caratteristiche anatomiche dello xilema, in particolare dei vasi, con una risoluzione annuale (von Arx et al. 2014, Pandey 2021). Le informazioni estratte con QWA consentono di comprendere meglio l'influenza dei fattori biotici e abiotici sull'ecologia delle specie arboree e la loro adattabilità in uno scenario di cambiamento climatico. L'analisi delle caratteristiche anatomiche e la costruzione delle loro serie storiche rappresenta un utile strumento per ricostruire disturbi avvenuti in passato, prima della disponibilità dei dati climatici (Tonelli et al. 2022). Questa tesi si inserisce all'interno di una ricerca dell'area Sistemi Forestali del D3A sul faggio appenninico ed iberico, nell'ambito della quale sono state effettuate sia l'analisi dendrocronologica che dendroclimatologica di alcune popolazioni di faggio, e approfondisce l'analisi dendroanatomica delle stesse popolazioni.

1.2 Caratteri biogeografici ed ecologia climatica del Faggio

Fagus sylvatica (Fig. 1.2.1) appartiene alla famiglia delle *Fagacee* (ordine *Fagales*) ed è una specie di prima grandezza che può raggiungere i 30-35 m di altezza ed anche i 40 m. È una specie molto longeva che può vivere fino a 500 anni. Nella Tabella 1.2.1 sono riportati sinteticamente i caratteri distintivi del faggio.

	CORTECCIA	FOGLIA	FIORI	IMPOLLINAZIONE
<i>Fagus sylvatica</i>	Liscia, sottile e bianco-grigiastra	Semplice, ellittica, colore dal verde chiaro al verde scuro, pelosa negli individui giovani e glabra negli adulti, con un picciolo corto	Sono distinti fiori maschili e femminili sulla stessa pianta	Anemofila

Tab 1.2.1 – Sintesi dei tratti caratteristici del faggio (*Technical guidelines for genetic conservation and use – European beech, Georg von Wühlisch*).

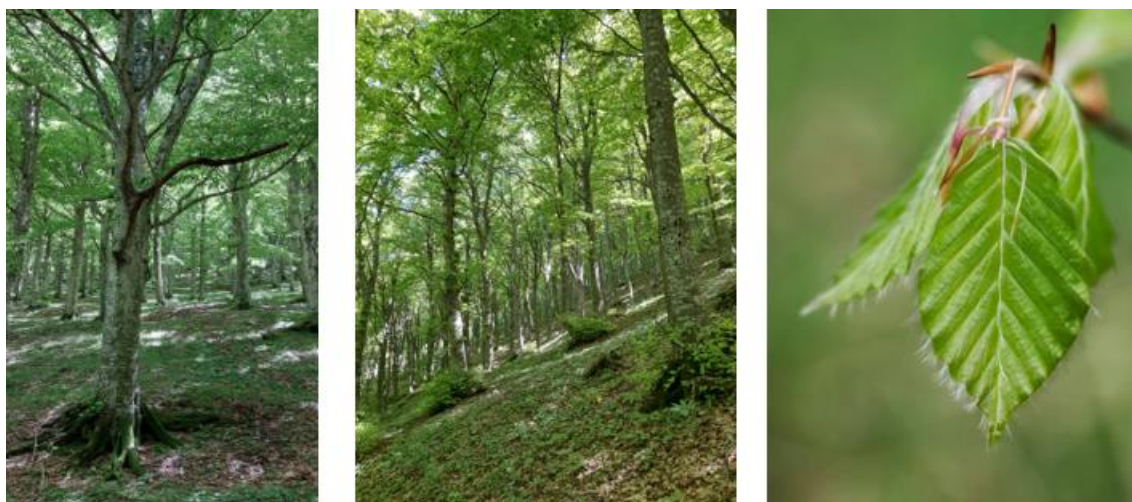


Fig. 1.2.1 – faggeta sul Monte Acuto a sinistra e al centro, a destra una giovane foglia di faggio

Il faggio è una specie molto resistente e si adatta a diverse situazioni. Ad esempio, è la specie arborea che meglio tollera l'ombra tra le specie arboree presenti nel suo areale, le giovani piantine sono infatti in grado di sopravvivere anche su soprassuoli fortemente ombreggiati dalle chiome degli alberi dominanti (Houston Durrant et al., 2016). Il faggio non ha esigenze particolari riguardo al suolo, può infatti stabilirsi su suoli con un pH compreso tra 3.5 e 8.5, ma non tollera condizioni di eccessiva acidità. Predilige comunque suoli moderatamente fertili e calcificati o leggermente acidi (Paule, 1995). Cresce bene su suoli morbidi in cui l'apparato radicale può penetrare, al contrario non prospera su suoli asfittici e regolarmente allagati, poiché ha bisogno di un suolo ben drenato e non compattato (Geßler, et al 2007).

1.2.1 Areale di distribuzione europeo ed esigenze edafo-climatiche

Il faggio è presente in gran parte dell'Europa. La specie è mesofila ed è esigente dal punto di vista climatico, necessitando infatti di condizioni umide e fresche, con precipitazioni comprese fra 800 e 1500 mm ed una temperatura media annua compresa tra i 6°C ed i 12°C (Pignatti, 1982). Le stazioni più favorevoli presentano inverni anche freddi, ma non gelidi (la specie tollera fino a -25°C evidenziando danni non letali già a -15°C). La distribuzione del faggio, prevalente nell'Europa centrale, corrisponde ad un macrobioclimate temperato di tipo continentale, mentre in stazioni influenzate dai mari, come nel caso dell'appennino, il macrobioclimate è di tipo temperato oceanico. I limiti Nord-Sud dell'areale sono condizionati dalla temperatura, infatti nel Sud dell'Europa, Italia compresa, la presenza del faggio è strettamente legata alla presenza di rilievi montuosi, a causa delle temperature troppo elevate. Al contrario al Nord Europa la presenza del faggio è influenzata dalle temperature troppo rigide, tanto da rappresentare la vegetazione collinare o di pianura (IFNC, 2007). Il faggio necessita infatti di una stagione vegetativa di almeno 140 giorni, ed è per questo motivo che non riesce a sopravvivere troppo a nord della Scandinavia. Sul piano latitudinale si espande dalla Sicilia, dove si spinge tra i 1000 e i 2000 m s.l.m per sfuggire alle alte temperature, a Bergen, nel sud della Norvegia, dove si può facilmente incontrare in pianura (Houston Durrant et al., 2016). Confrontando la Figura 1.2.1.1 e la Figura 1.2.1.2 si nota come al limite Nord dell'areale di distribuzione del faggio corrisponda il limite del macrobioclimate temperato. Le temperature rigide del macrobioclimate boreale sfavoriscono la faggeta a favore della Taiga, bioma che presenta boschi di conifere (*Pinus sylvestris*).

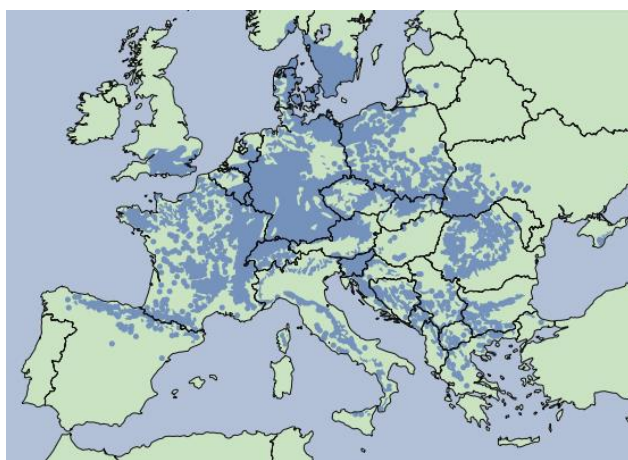


Fig. 1.2.1.1 – Areale di distribuzione Europeo del faggio



Fig. 1.2.1.2 – Macroclimates presenti in Europa

In senso longitudinale l'areale del faggio è invece influenzato dalla crescente continentalità del clima e della forte escursione termica, che rende le piante esposte a danni da gelo. Ad ovest il suo limite è segnato dalla Cordigliera Cantabrica, catena montuosa a nord della Spagna in cui il faggio riesce a sfuggire alle alte temperature, mentre ad est il suo limite è segnato del gruppo montuoso dei Carpazi e dei Balcani. Man mano che il clima diventa più continentale spingendosi verso est il faggio europeo è sostituito dal faggio orientale (*Fagus orientalis*). Ci sono comunque in Europa, delle aree in cui il faggio non si ritrova come specie autoctona, come la pianura padana e la pianura ungherese (T. Houston Durrant, D. de Rigo, G. Caudullo, 2016). I cambiamenti climatici possono avere un impatto sulla sua futura distribuzione, in particolare presso gli estremi del suo areale in cui è probabile che diventi meno competitivo al sud e ad est (principalmente a causa della siccità), ma potrebbe espandere il suo areale in Scandinavia e nel bacino del Mar Baltico (K. Kramer, et al. 2010).

1.2.2 Distribuzione nelle Marche

Nelle Marche la presenza del faggio è strettamente legata all'ambiente montano, in boschi puri o associato a diverse specie a seconda dell'altitudine (Tabella 1.2.2.1). In generale lo troviamo in formazioni pure o associato ad abeti, pini, tasso, frassino maggiore, olmo montano, aceri, sorbi, ciliegio selvatico, carpini, da 800-900 m fino a 1400-1800 m di altitudine (Tab. XX). Non è particolarmente esigente per il terreno, purché sia ben aerato e drenato e non troppo acido. Predilige climi umidi e freschi (Pignatti, 1982).

Tab. 1.2.2.1 – Faggete e relative specie associate lungo il gradiente altitudinale in Appennino centrale

<p>Faggeta submontana: 900-1300 m s.l.m. – querce sp., acero montano (<i>Acer pseudoplatanus</i>), acero riccio (<i>Acer platanoides</i>), maggiociondolo (<i>Laburnum anagyroides</i>), orniello (<i>Fraxinus ornus</i>), frassino maggiore (<i>Fraxinus excelsior</i>) nocciolo (<i>Corylus avellana</i>), carpino bianco (<i>Carpinus betulus</i>), carpino nero (<i>Ostrya carpinifolia</i>), tiglio cordato (<i>Tilia cordata</i>), cerro (<i>Quercus cerris</i>) (il cerro fino a 1400 m s.l.m.), tasso (<i>Taxus baccata</i>), sorbo comune (<i>Sorbus domestica</i>), ciliegio selvatico (<i>Prunus avium</i>)</p>
<p>Faggeta montana: 1300-1500 m s.l.m. – tiglio platifillo (<i>Tilia platyphyllos</i>), frassino maggiore (<i>Fraxinus excelsior</i>), acero montano (<i>Acer pseudoplatanus</i>)</p>
<p>Faggeta altomontana: 1500-1770 s.l.m. – acero montano (<i>Acer pseudoplatanus</i>), abete bianco (<i>Abies alba</i>)</p>
<p>Faggeta di limite: 1770-1850 s.l.m. – in appennino il faggio rappresenta il limite del bosco, tranne nei casi in cui sia presente l'abete bianco (<i>Abies alba</i>)</p>

Il faggio è infatti riscontrabile ad un'altitudine compresa tra gli 900m ed i 1400-1800m, limite al di sopra del quale la specie non riesce a sopravvivere a causa del periodo vegetativo estivo troppo ridotto (minore di 140 giorni). Forma boschi puri o semipuri, governati a ceduo od a fustaia coetaneiforme e si presta con successo alla conversione all'altofusto dei cedui invecchiati (Regione Marche – Faggio (*Fagus sylvatica* L.), 2002). Al suo limite superiore sono presenti popolamenti ridotti, in cui gli individui dominanti non superano i 10-12 m di altezza. Si riscontrano però anche delle eccezioni riguardo l'areale di distribuzione della specie. La sua assenza al di sotto del suo limite potenziale è spesso dovuta all'azione antropica del taglio del bosco, svolta per molti secoli fino al 1960 circa per la realizzazione di zone pascolabili dal bestiame o per la produzione di legna da ardere (Vitali et al.,2018). Alle quote inferiori, al contrario, l'areale del faggio è diminuito a causa della progressiva diminuzione delle precipitazioni e dell'aumento delle temperature durante il corso degli anni, venendo sostituito dal carpino nero (*Ostrya carpinifolia*) o carpino bianco (*Carpinus betulus*). Se il riscaldamento globale continuerà senza un aumento delle precipitazioni si potrà verificare una riduzione dell'accrescimento del faggio anche alle quote più alte (Hacket-Pain and Friend, 2017). L'esposizione è un altro elemento che va a contribuire nella distribuzione del faggio; infatti, nei versanti caldi con suolo profondo esposti a Sud il limite inferiore della faggeta risale fino a 1000 m s.l.m. lasciando spazio alle quote inferiori alla vegetazione alto collinare, mentre in versanti freschi e settori più piovosi sarà in grado di colonizzare le quote inferiore fino agli 800 m s.l.m. (Pignatti, 1982). Le faggete Marchigiane si possono distinguere in basofile e acidofile a seconda del substrato sul quale sorgono, e molte di queste rappresentano un habitat all'interno di Rete Natura 2000:

- **Habitat 9210 – faggeti degli Appennini con *Taxus* e *Ilex***; boschi montani misti di latifoglie decidue mesofile, a dominanza di faggio (*Fagus sylvatica*), che si sviluppano su substrati calcarei, calcareo-selciferi e arenacei, ricoperti da suoli mediamente profondi e umificati, in corrispondenza di versanti ad acclività variabile, tra 900-1000 e 1750-1800 m di quota. Negli strati basso-arboreo e alto-arbustivo sono presenti *Taxus baccata* e *Ilex aquifolium*, che caratterizzano l'habitat. (Rete Natura 2000 Regione Marche, 2016). L'area di studio considerata in questa tesi appartiene al Sito d'Importanza Comunitaria (SIC – IT5310019) “Monte Catria, Monte Acuto” (indicata con la freccia gialla nella figura 1.2.2.1)

- **9220 - Faggeti degli Appennini con *Abies alba* e faggete con *Abies nebrodensis*;** Boschi misti di faggio con abete bianco su suoli di origine silicea ed a reazione subacida; sono presenti sui Monti della Laga e presso Bocca Trabaria, in località Fonte degli Abeti. Nonostante la sua rarità, si ravvisa nel territorio marchigiano la potenzialità per il recupero dell'habitat, aspetto che andrebbe ulteriormente approfondito. L'Habitat è molto raro nelle Marche e per questo è segnalato in due soli siti, IT5310010 “Alpe della Luna - Bocca Trabaria” e IT5340008 “Valle della Corte” che coprono sostanzialmente tutta la sua distribuzione attuale. La superficie complessiva, ricavata dai Formulari, è di appena 37,4 ha. (Rete Natura 2000 Regione Marche, 2016).

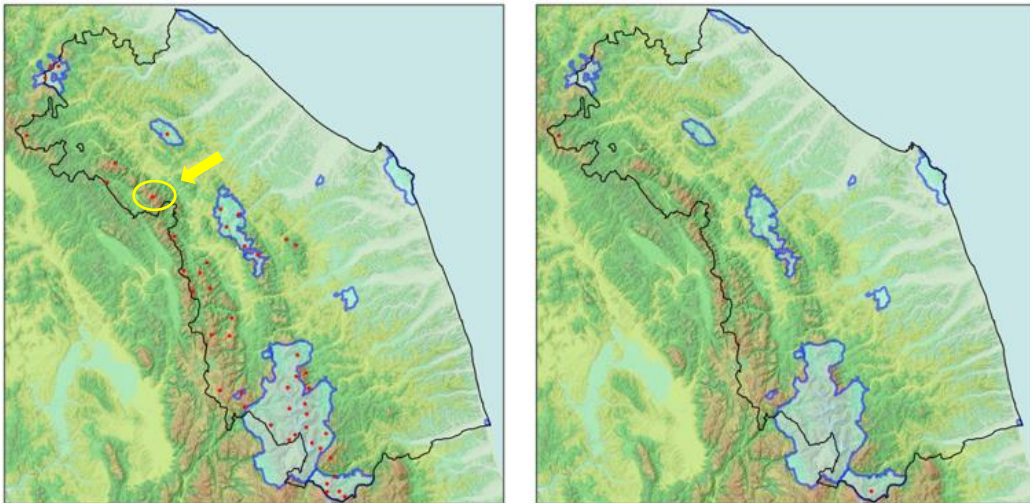


Fig. 1.2.2.1 – Carta della distribuzione degli habitat 9210 (a sinistra) e 9220 (a destra) rappresentati da puntini rossi (Fonte: Rete Natura 2000 Regione Marche)

1.2.3 La sensibilità climatica del faggio

Per gelata tardiva si intende un fenomeno in cui la temperatura scende al di sotto dello zero, quando la pianta è già in ripresa vegetativa o fioritura. In un normale anello di accrescimento, infatti, è ben distinguibile il legno primaverile da quello estivo, mentre in un anello con accrescimento anomalo dovuto ad una gelata, si avrà uno spessore minore, in relazione al periodo vegetativo più corto e al danneggiamento degli organi fogliari al momento della gelata. A livello fogliare, il danno è causato dalla formazione di ghiaccio nel mesofillo, tra le cellule e i vari tessuti fogliari dei germogli (Nolè et al., 2018). I maggiori danni ai tessuti si verificano per temperature inferiori a -2 o -3°C (Till, 1956; Rychnovská et al. 1989; Mayer et al., 1988; Tranquillini e Plank, 1989), danni che possono ridurre la crescita radiale del 90% (Dittemar et al., 2006; Ningre e Colin, 2007). Gli organi

del faggio, soprattutto foglie e legno, sono meno resistenti al freddo rispetto a quelli delle conifere. In particolare, il legno omoxilo delle conifere, grazie alla presenza delle punteggiature areolate lungo i vasi, è più adatto a contrastare il problema delle bolle d'aria che vengono a crearsi a seguito del ciclo di congelamento e scongelamento dell'acqua nei vasi, che causano embolia nelle latifoglie. Il fenomeno della siccità estiva, al contrario, si verifica per la combinazione di una serie di condizioni climatiche come l'aumento delle temperature (medie e massime), la diminuzione delle piogge, una maggior quantità di radiazione solare ed una elevata pressione di vapore (Camarero et al., 2015). La siccità estiva invece provoca processi di microfillia, ingiallimento e filloptosi anticipata, anche su individui adulti, già ad agosto. Il conseguente deficit idrico è il fattore che maggiormente limita la diffusione del faggio alle quote inferiori con clima di tipo submediterraneo (Ebene, A., et al 2012). Anche in questo caso il disturbo si manifesta attraverso lo spessore anomale dell'anello, più stretto del normale, a causa della chiusura anticipata della stagione vegetativa. Lo spessore dell'anello è inoltre direttamente proporzionale alla durata del disturbo. Lo scopo dell'analisi dendroanatomica è quello di indagare quali siano stati gli effetti della gelata sulla pianta e di come si sia modificata la dendroanatomia.

1.3 Dendroanatomia

La dendroanatomia è una tecnica recentemente sviluppata dall'analisi anatomica quantitativa del legno (*quantitative wood anatomy* - QWA) e dalla dendrocronologia che consente l'analisi delle serie temporali, non solo delle larghezze degli anelli (o densità degli anelli) ma a molti altri tratti anatomici microscopici (von Arx et al. 2018, Pandey 2021). L'obiettivo è quello di ottenere informazioni quantitative con risoluzione annuale, come le caratteristiche della tracheide nelle specie di conifere o le caratteristiche dei vasi nelle latifoglie (Figura 1.3.1). Nelle specie a foglia larga, anche le fibre del legno sono sensibili alle condizioni ambientali, come i vasi, e possono essere utili per studiare le risposte della vegetazione agli stress (De Micco et al. 2016, Prendin et al. 2020). La dendroanatomia è organizzata secondo anelli successivi, ognuno riferito ad uno specifico anno di accrescimento della pianta. La struttura degli anelli fornisce importanti informazioni sulle condizioni ambientali a cui la pianta è stata sottoposta in un determinato anno, come può essere ad esempio una gelata primaverile o un periodo di siccità. La dendroanatomia è strettamente legata a quelle che sono le caratteristiche anatomiche dello xilema, date dall'organizzazione cellulare in specie arboree e arbustive, ovvero ad accrescimento secondario.

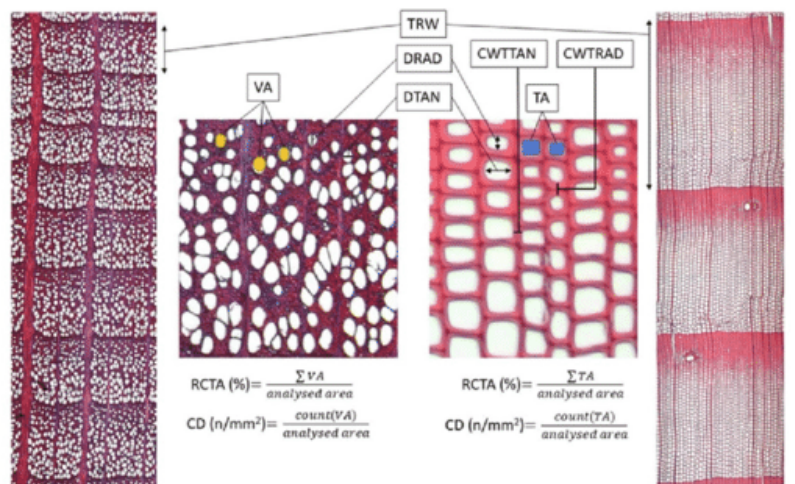


Fig. 1.3.1 – esempio di alcuni parametri estraibili con Roxas sia nelle conifere che nelle latifoglie (Arnič et. al 2022, Relationships Between Wood-Anatomical Features and Resistance Drilling Density in Norway Spruce and European Beech).

Tra questi caratteri quello più rilevante sono i vasi xilematici, ma tra gli altri si ricordano i raggi midollari e le fibre di sostegno. Nelle Angiosperme, divisione alla quale appartiene anche il faggio, i vasi xilematici prendono il nome di trachee, mentre nelle Gimnosperme, divisione a cui appartengono le conifere, prendono il nome di tracheidi. La sostanziale differenza sta nell'anatomia del vaso: nelle trachee le cellule sovrapposte vanno a formare un condotto unico e continuo, mentre nelle tracheidi le cellule componenti il vaso sono separate da una membrana sottile e punteggiata. Un'ulteriore differenza è data dalle dimensioni e dalla lunghezza; le trachee risultano essere più grandi (con un diametro di 200-700 μm) ma corte, rispetto alle tracheidi (20-30 μm), piccole e allungate. Indipendentemente dalle caratteristiche strutturali, la funzione dello xilema è la stessa, quella di trasporto della linfa grezza, composta da sali minerali e acqua, dall'apparato radicale alle foglie, sede in cui avverrà la fotosintesi.

1.4 Obbiettivi della tesi

Questa tesi si inserisce in un progetto di ricerca dell'Area Sistemi Forestali del D3A – UNIVPM sulla sensibilità del faggio ai disturbi abiotici. Questa tesi sperimentale ha lo scopo di indagare come il faggio (*Fagus sylvatica*) reagisce a livello anatomico ai fenomeni climatici, in particolare, alle gelate tardive primaverili. Applicando l'analisi anatomica del legno si è proceduto a verificare se i disturbi abiotici avvenuti in determinati anni abbiano determinato cambiamenti nella struttura cellulare del faggio, e come questi cambiamenti portino ad un'alterazione dell'accrescimento dei singoli anelli interessati dai disturbi. Gli obbiettivi principali della tesi sono quelli di individuare i cambiamenti anatomici negli anelli affetti da gelate, stabilire come gli effetti del disturbo cambino a seconda dell'altitudine e se sono simili su piante campionate alla stessa quota. Questo studio è stato svolto seguendo un protocollo predefinito sui campioni prelevati nell'Appennino centrale, sul versante nord-ovest del Monte Acuto.

2 MATERIALI E METODI

2.1 Area di studio

2.1.1 Topografia, geomorfologia e litologia

L'area di studio (Figura 2.1.1.1) è situata sul Monte Acuto, appartenente al gruppo del Catria-Acuto, delimitato a nord dalla Valle del Burano (Bacino del Metauro) e a sud dalla valle del Sentino (Bacino dell'Esino). L'area del Monte Catria-Acuto appartiene quasi integralmente alla Provincia di Pesaro e Urbino, Unione Montana del Catria e del Nerone interessando i territori comunali di Cantiano, Cagli, Frontone e Serra Sant'Abbondio. Piccole porzioni appartengono al comune di Scheggia e Pascelupo in Provincia di Perugia

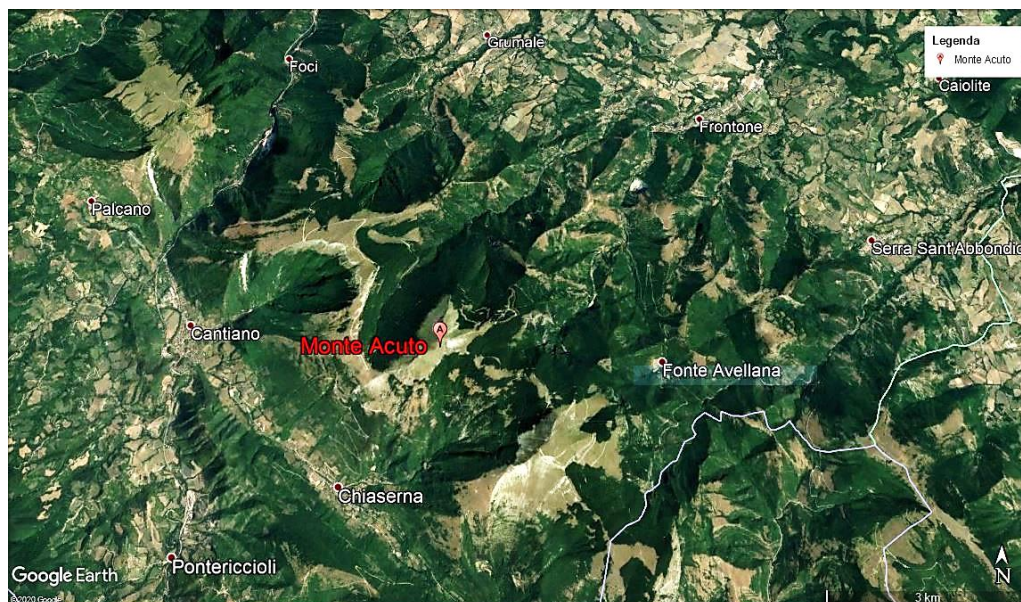


Fig.2.1.1.1- Localizzazione dell'area di studio del Monte Acuto (PU)

Geologicamente il gruppo montuoso del Catria-Acuto è costituito da litotipi calcarei appartenenti alla serie umbro-marchigiana; i settori sommitali più elevati dei rilievi sono costituiti da Formazione del calcare Massiccio, risultando solitamente separato dai sottostanti litotipi appartenenti alla Formazione della Maiolica da profonde scarpate di faglia. In condizioni di elevata acclività dei versanti, sono particolarmente attivi fenomeni periodici di geliflusso che, assieme all'erosione delle rocce, determinano la formazione di coltri di detrito grossolano incoerente di spessore variabile (Forestpas 2000). Nell'area in oggetto coesistono suoli riferibili a stadi evolutivi assai lontani tra loro i quali hanno caratteristiche chimico-fisiche differenti; tuttavia, rimangono suoli costantemente orientati verso lo stadio evolutivo di "terra bruna" (Calandra,1992).

2.1.2 Caratteri pedologici e climatici

Il territorio in cui è ubicata l'area di studio è definito da suoli poco evoluti e quasi privi di orizzonti organici, caratteristica probabilmente dovuta dall'eccessiva inclinazione dei versanti che non consentono l'accumulo di lettiera; condizione che migliora scendendo a valle dove si trovano foreste più fertili. Per la caratterizzazione climatica e bioclimatica dell'area di studio sono stati utilizzati i dati della stazione termo-pluviometrica di Fonte Avellana, ubicata a 689 m s.l.m. Le precipitazioni medie annue superano i 1600 mm con un regime sub-equinoziale autunnale, con picchi massimi nei mesi di ottobre-novembre e minimi nel mese di luglio, ma che in genere non determinano condizioni significative di aridità e periodi di deficit idrico. Secondo la classificazione di Rivas-Martinez (2008), il macrobioclima è di tipo temperato oceanico con piano bioclimatico mesotemperato superiore, termotipo mesotemperato superiore e ombrotipo subumido (Figura 2.1.2.1.).

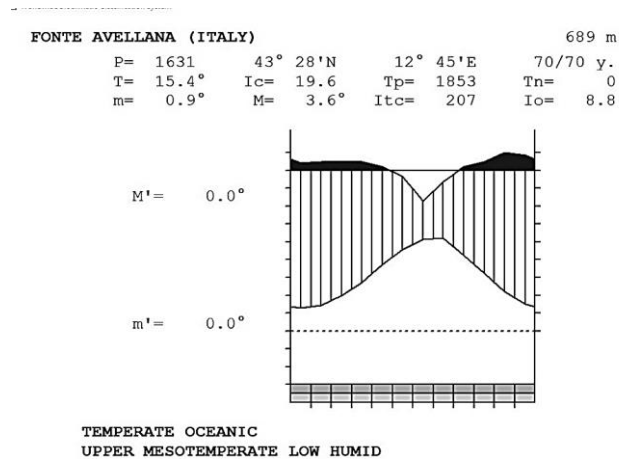


Fig. 2.1.2.1 Climodiagramma ricavato dai dati meteorologici mensili (temperature massime, medie, minime e precipitazioni) della stazione termopluviometrica di Fonte Avellana (PU) [i dati mancanti sono stati stimati attraverso la griglia climatica E-OBS con risoluzione 0,1° scaricati dal portale Climate Explore: (<https://climexp.knmi.nl/start.cgi>)].

2.2 Protocollo di campionamento

2.2.1 Aree di saggio e rilevamento denrometrico-strutturale

L'area di studio è stata individuata grazie ad immagini satellitari che hanno permesso di identificare la parte di faggeta colpita dalla gelata tardiva del 2017 e del 2016. Secondo il protocollo previsto le tre aree di saggio sono state realizzate in una faggeta pura, aree che devono essere allineate lungo un gradiente altitudinale di almeno 250 metri con almeno 80 metri di dislivello l'una dall'altra. Queste predisposizioni permettono di analizzare le

risposte del faggio in condizioni microclimatiche diverse. Le aree di studio sono situate sul versante nord-ovest del Monte Acuto, una delle aree è posizionata in bassa quota, non colpita dalla gelata del 2016 (ACL), la seconda è posizionata ad una quota intermedia che presenta danni evidenti (ACM) ed infine la terza, situata alla quota più elevata (ACH) che presenta lievi danni.

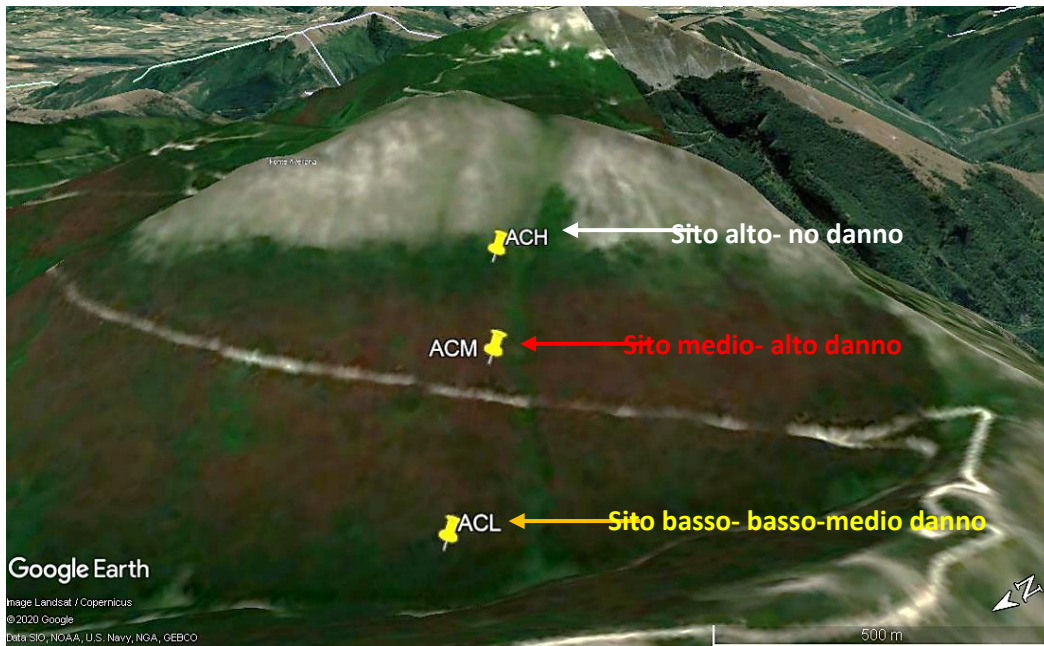


Fig. 2.2.1.1- Immagine satellitare del 31-05-2017 ricavata da “Sentinel: (<https://www.sentinel-hub.com/explore/eobrowser/>) relativa alle tre aree di studio.

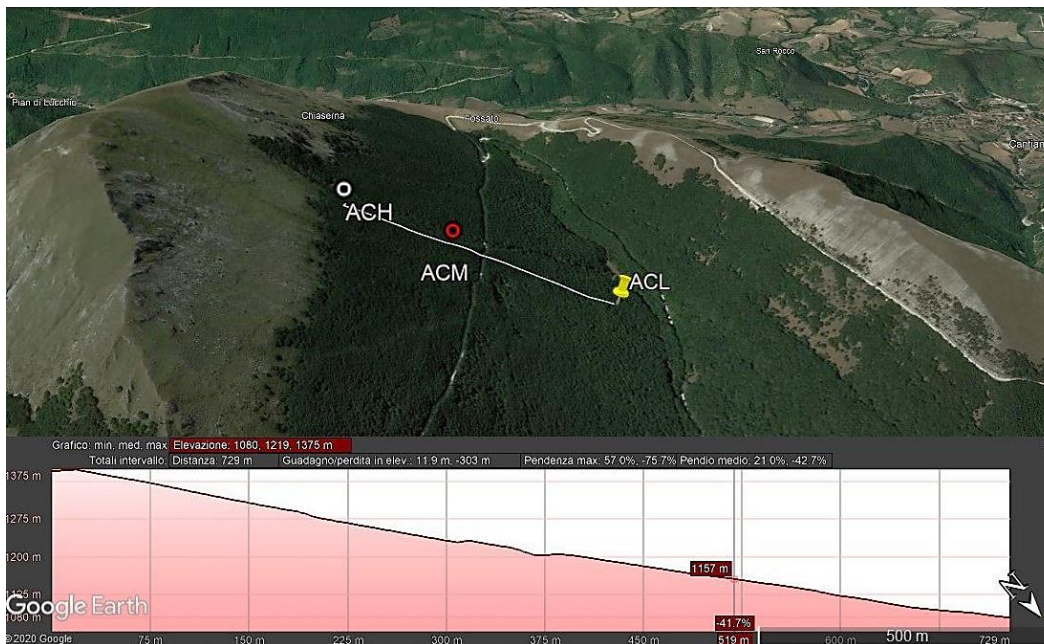


Fig. 1.2.1.2- Immagine satellitare elaborata con “Google Earth Pro”; nella parte inferiore è riportato un grafico che mostra il dislivello tra il sito più alto (ACH) e quello più basso (ACL).

Tab.2.2.1.1- Coordinate di localizzazione dei tre plot sul Monte Acuto (PU) e le loro altitudine. ACH= Acuto high, indica il sito a quota più elevata; ACM= Acuto medium, indica quello a quota media; ACL= Acuto low, a quota bassa

Plot	Latitudine (N)	Longitudine (E)	Altitudine (m s.l.m.)
ACH	43°28'36.32"	12°40'32.85"	1375
ACM	43°28'40.10"	12°40'24.07"	1245
ACL	43°28'47.88"	12°40'11.39"	1080

Per ognuno dei tre plot sono state effettuate le seguenti misurazioni: coordinate GNSS del centro del plot, l'altezza di almeno 10 individui rappresentativi, il DBH (*diameter at breast height*- diametro a 1.30 m) di tutte le piante vive o di tutti i polloni delle ceppaie rientranti all'interno di un raggio di 10 metri dal centro. Sono state escluse dalla misurazione i fusti aventi diametro inferiore ai 3 cm.

2.2.2 Prelievo dei campioni legnosi per analisi dendroclimatica, anatomica e isotopica

I campionamenti sono stati svolti dai ricercatori dell'Area Sistemi Forestali dell'Università Politecnica delle Marche nel 2019 (Tonelli, 2022). Per ogni plot, sono state prelevate, mediante trivelle di Pressler, carote legnose di diverso diametro da individui dominanti di faggio. L'area è stata suddivisa in due aree concentriche (sempre con medesimo centroide), una di raggio 20 metri e l'altra di raggio 10 metri. Nell'area di raggio 10 metri sono stati misurati i diametri a 1,30 m di tutte le piante vive. Nell'area avente raggio 20 metri, sono stati individuate almeno 5 piante, distribuite uniformemente nell'intera area di studio, e con le migliori caratteristiche fisiche-strutturali (altezza e diametro), da ognuna delle quali è stata prelevata una carota da 10 mm destinata all'analisi dendroanatomica. Da ulteriori 15 piante dominanti sono state prelevate carote legnose di diametro 5 mm destinate all'analisi dendrocronologica e dendroclimatica. Su ogni pianta carotata, oltre al diametro, è stata stimata anche l'altezza totale mediante l'impiego di un ipsometro ad ultrasuoni (Vertex III), dati utilizzati per costruire poi la curva ipsometrica (Figura 2.2.2.1). Le carote sono state prelevate ad 1.30 m perpendicolarmente alle linee di massima pendenza per poi essere momentaneamente posizionate, e fissate con nastro carta, su appositi supporti in legno. In totale sono state campionate 63 piante e ottenuti complessivamente 80 campioni per le successive analisi. I campioni successivamente sono stati incollati e levigati utilizzando carte con granulometria progressivamente più fine.

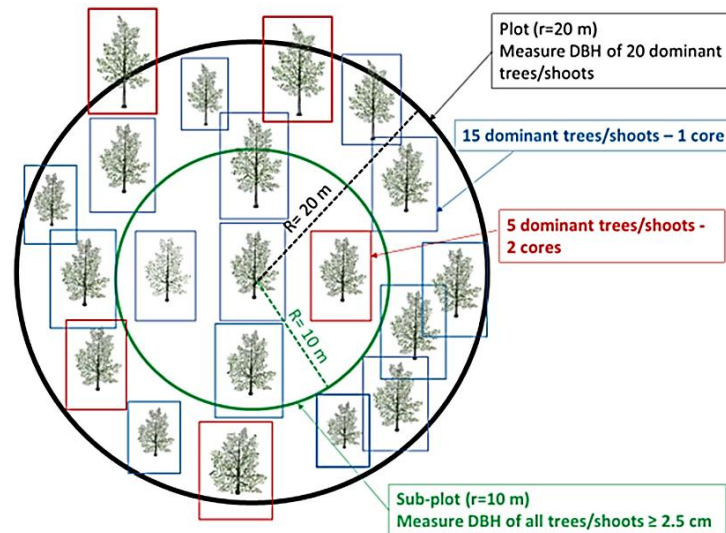


Fig. 2.2.2.1- Diagramma riepilogativo del protocollo di campionamento (Tonelli, 2020)

Tab 2.2.2.1 – Tabella riassuntiva delle caratteristiche proprie di ognuno dei 3 plo. G/ha (m²): area basimetrica totale a ettaro; Hdom: altezza dominante

Plot	Quota	Tipo di gestione	G/ha (m ²)	H dom (m)	Età media	Età massima
ACH	1375	Ceduo	56.5	13.2	75.3	98
ACM	1245	Fustaia transitoria	44.7	16.5	84.6	106
ACL	1080	Fustaia	77.4	22	104.1	121

Le ampiezze degli anelli dei campioni (10 e 5 mm) sono stati quindi misurate con uno stereoscopio collegato alla stazione LINTAB e al software TSAP (RinnTech). Le serie di ampiezza anulare sono state successivamente sincronizzate e datate in maniera visiva e tramite l'ausilio del software di interdatazione COFECHA (Holmes, 1986). Questo passaggio è fondamentale per poter poi essere in grado di datare a loro volta i parametri anatomici.

2.3 Preparazione dei campioni anatomici

1) 2.3.1 Operazioni preliminari

In questa tesi i campioni da 10 mm di 8 piante sono stati selezionati per le analisi anatomiche (Tab. 2.3.1.1).

Tab 2.3.1.1 – Dati riassuntivi delle piante soggette all'analisi dendroanatomica

	Codice pianta	Diametro (cm)	Altezza (m)	g (Area basimetrica m²)
Sito alto (ACH)	ACHFS01	19,5	14,7	0,029865
	ACHFS05	22	16,5	0,038013
	ACHFS08	14	10,4	0,015394
Sito Medio (ACM)	ACMFS02	37	14,4	0,107521
	ACMFS03	33	16,4	0,085530
	ACMFS05	31	14,5	0,075478
Sito Basso (ACL)	ACLFS012	60	22,5	0,282743
	ACLFS016	44	19,0	0,152053

Come primo passaggio i campioni selezionati (Tab. 2.2.2.1) sono stati troncati con un taglio obliquo in segmenti di circa 4 cm mediante l'uso di un seghetto manuale, . Il taglio obliquo permette di mantenere la continuità degli anelli tra sezioni contigue (Tonelli 2022). I segmenti ottenuti sono in numero variabile a seconda della lunghezza della carota. Una volta tagliati i vari segmenti sono stati numerati in ordine sequenziale in modo da rispettare la linearità temporale degli anelli. Successivamente questi segmenti sono stati inseriti in un baker contenente acqua a 100°C per circa 30 minuti, con lo scopo di ammorbidire il legno ed espellere i tannini, ed in modo da non alterare la struttura cellulare al momento del taglio. Questo passaggio è essenziale per ottenere dei buoni campioni, perché solo se il legno è sufficientemente ammorbidito si potrà passare alla fase successiva, cioè il taglio del campione attraverso l'uso del microtomo rotativo (Leica HistoCore AUTOCUT) (Figura 2.3.2.1), strumento in grado di tagliare sezioni istologiche di tessuto sia animale che vegetale di spessore regolabile (in micron μm).

2.3.2 Taglio di sezioni anatomiche

Per eseguire il taglio si comincia posizionando il campione sul supporto fisso dello strumento, in modo da mantenere il campione stabile ed evitare oscillazioni che possano compromettere la precisione del taglio o l'affilatura della lama. Successivamente si va a posizionare la lama nell'apposito binario guida, che verrà poi fissata e protetta del

rispettivo coprilama rosso, al fine di evitare infortuni (Figura 2.3.2.2). Lo strumento verrà poi impostato per lo spessore di taglio desiderato tramite il pannello di controllo (a sinistra nella Figura 2.3.2.1) ed il carrello su cui è montato il supporto della lama verrà fatto scorrere in avanti, avvicinandolo al campione. Si comincia impostando il taglio a 18 μm in modo da eliminare in maniera veloce e grossolana i primi strati del campione. Data la forma cilindrica dei campioni è infatti necessario spingere il taglio in profondità eliminando gli strati più superficiali, in modo da ottenere via via una sezione sempre più larga e contenete più vasi. Una volta raggiunta la larghezza della sezione di taglio desiderata si va ad impostare uno spessore di taglio di 12 μm . Anche in questo caso andranno effettuati dei tagli di “pulizia” del campione in modo da avere una sezione definitiva il più precisa possibile.



Fig. 2.3.2.1 – Microtomo Leica utilizzato per la preparazione dei campioni



Fig. 2.3.2.2 – Posizionamento lama nel microtomo

Si passa poi ad effettuare il taglio vero e proprio, girando delicatamente la manovella con la mano destra e tenendo nella mano sinistra un pennellino, si fa scivolare lentamente la sezione sul supporto della lama, ed una volta appoggiato verrà poi trasferito su un vetrino (Figura 2.3.2.3). Per ottenere una sezione precisa è essenziale che il legno sia sufficientemente morbido e che la lama non sia usurata. È infatti necessario utilizzare porzioni di lama inutilizzate o addirittura sostituire la lama, soprattutto dopo gli tagli iniziali di preparazione del campione e prima della sezione definitiva. Una lama usurata può infatti portare dei difetti alla sezione come, ad esempio, rompere i bordi o creare delle striature lungo tutta la lunghezza del campione, che lo renderebbero inutilizzabile.



Fig. 2.3.2.3 – taglio e stesura del campione sul supporto della lama (HistoCore BIOCUT - Microtomo rotativo manuale (leicabiosystems.com))

Una volta posizionata la sezione tagliata sul vetrino si passa ad una fase di controllo. La sezione viene infatti prima controllata al microscopio ottico per verificare se sono presenti difetti o qualcosa che vada a rovinare la qualità della sezione. Se il campione è accettabile si denomina tramite una sigla, come ad esempio ACH FS 1 I, che sta ad indicare che nel vetrino è presente il campione numero 1 di faggio (FS = *Fagus sylvatica*), la sezione numero uno (I) della carota, del sito alto (ACH).

2.3.3 Colorazione e fissazione del campione

Una volta preparati e denominati i campioni si passa alla fase di decolorazione e colorazione dei vetrini. Nella fase di decolorazione vengono depositate sul campione 2 o 3 gocce di candeggina, in modo tale da decolorare il campione e prepararlo alla successiva colorazione (in alto al centro della Figura 2.3.2.1 sono visibili 2 campioni decolorati). La candeggina va fatta agire qualche minuto, per poi essere accuratamente risciacquata con abbondante acqua, per evitare la formazione di grumi al momento dell'aggiunta dei coloranti. I passaggi seguenti sono stati svolti in laboratorio, vista la necessità di svolgere le operazioni sotto cappa chimica. Per la colorazione sono stati utilizzati Safranina e Astrablu. La safranina, che colora le pareti cellulari in rosso, indica la presenza di lignina, mentre l'Astrablu segnala la presenza di cellulosa e il legno di reazione, colorando le pareti cellulari in blu. Vengono aggiunte circa 2 o 3 gocce di ogni colorante, tante quanto bastano a ricoprire il campione, in modo che i coloranti vadano a legarsi in maniera uniforme con tutte le cellule (Figura 2.3.3.1).



Fig. 2.3.3.1 – risciacquo con alcool del colorante in eccesso al centro, in alto campioni decolorati con candeggina

Il colorante verrà lasciato agire per 15 minuti per poi eliminare l'eccesso con alcool (Figura 2.3.3.1):

- Primo risciacquo con alcool a 50°
- Secondo risciacquo con alcool a 100°

Il campione definitivo una volta colorato viene fissato tramite l'utilizzo di una resina (EUKITT®) e di un vetrino copri-oggetto. I vetrini sono stati poi inseriti su una piastra metallica, con un magnete (applicante una pressione di 1Kg) posizionato sulla parte superiore del vetrino in modo da mantenere la microsezione piatta ed evitare la formazione di bolle d'aria durante il processo l'essiccazione di circa 3 giorni. Quindi, una volta essiccati, i vetrini sono stati puliti con alcool per rimuovere la resina in eccesso essiccata ed ottimizzare così la qualità delle immagini digitali (Tonelli 2022). Le immagini digitali ad alta risoluzione delle sezioni anatomiche sono state acquisite dal Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali TESAF – UNIPD, utilizzando uno scanner di diapositive (D-Sight, A. Menarini Diagnostics srl) con ingrandimento 200x (Figura 2.3.3.2).

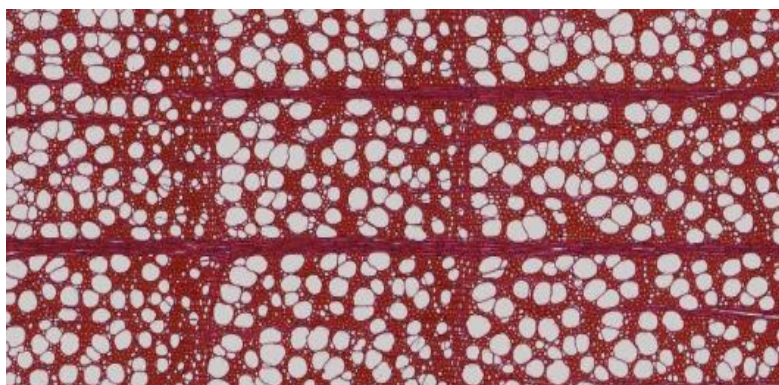


Fig. 2.3.3.2 – esempio di scansione di un campione anatomico

2.4 Analisi dendroanatomica (ROXAS)

Prima di essere analizzate con ROXAS le scansioni sono state ritagliate in immagini di massimo 30.000 pixel, dimensione massima supportabile del programma. Le immagini scansionate e ritagliate sono state quindi analizzate con lo strumento ROXAS v3.0.1 e il software di elaborazione delle immagini Image-Pro Plus v6.1 per estrarre le caratteristiche dei vasi (von Arx e Carrer, 2014). ROXAS è uno strumento specializzato per l'analisi delle immagini progettato per riconoscere e misurare automaticamente l'area del lume del vaso e calcolare specifici parametri anatomici (Figura 2.4.1).

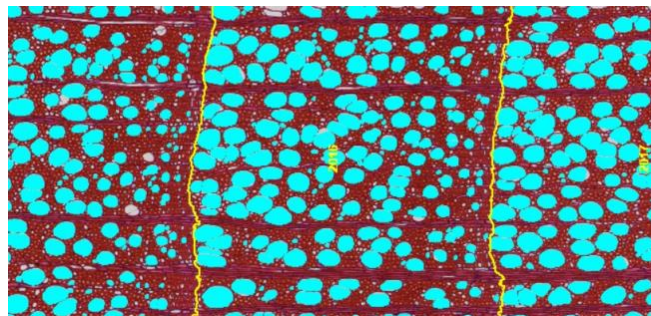


Fig. 2.4.1 – esempio di immagine analizzata con ROXAS

Una volta prodotta l'immagine, vengono utilizzati strumenti di analisi per quantificare le caratteristiche anatomiche. Mentre le strutture target, cioè gli anelli, possono essere delineate e misurate manualmente, l'analisi automatizzata delle immagini consente di quantificare un numero maggiore di caratteristiche anatomiche in tempi molto più brevi e in modo oggettivo e riproducibile (von Arx and Carrer, 2014). Le immagini catturate sono state prima datate, assegnando a ciascun anello l'anno corrispondente e prendendo come punto di riferimento l'ultimo anello, rappresentante l'anno di campionamento, cioè il 2019. Per la rilevazione dei vasi è stata impostata un'area minima di $40 \mu\text{m}^2$.

Infine, i seguenti parametri sono stati estratti da ciascun anello:

- MRW – ampiezza media anello
- CD – numero di vasi per unità di superficie
- RCTA – percentuale di area conducente dei vasi sull'intero anello
- MCA – superficie media del vaso
- Dh – diametro medio del vaso
- Max3CA – media della conducibilità idraulica dei tre vasi più grandi
- PMax3CA – posizione relativa dei tre vasi più grandi

- K_s – conducibilità idraulica specifica. K_s è stato calcolato come il rapporto tra la conduttività idraulica totale potenziale (K_h), (approssimata dalla legge di Poiseuille) e l'area totale dell'anello (Scholzet al. 2013)

Per ottenere risultati di qualità e gestire le imperfezioni dell'immagine, è spesso necessario un editing manuale finale dopo il rilevamento automatico di ROXAS. Il software offre opzioni di modifica efficienti per eliminare, regolare e aggiungere caratteristiche anatomiche (von Arx and Carrer, 2014). Tuttavia, è generalmente molto spesso più conveniente investire tempo nella preparazione dei vetrini ed ottenere scansioni di alta qualità, piuttosto che modificare manualmente gli errori delle analisi automatiche.

2.5 Analisi statistiche

Le analisi statistiche sono state svolte con il programma di Microsoft Excel. I dati sono stati analizzati con due metodologie differenti:

- T-test per la comparazione dei dati dal punto di vista temporale, confrontando gli anni della gelata primaverile con le annate normali.
- Test ANOVA per confrontare i dati dei vari livelli altitudinali per ciascuno dei parametri estratti da ROXAS. È stato considerato il periodo 1997-2019, comune a tutti i campioni analizzati.

Il t-test si utilizza quando vogliamo determinare se i dati del campione ci consentono di concludere che il valore medio di una variabile numerica in due sottogruppi indipendenti (cioè, contenente soggetti diversi) è significativamente diverso. Nel caso di questo studio i sottogruppi indipendenti sono rappresentati dagli anni della gelata, ovvero 2016 e 2017, e dagli anni non interessati dal disturbo, in un periodo compreso tra il 2010 e il 2015. In questa analisi sono stati considerati solo il sito medio (ACM) e il sito alto (ACH), poiché il sito basso (ACL) non presenta gli effetti della gelata. Il test è stato svolto per ciascuno dei parametri estratti da ROXAS, per individuare se ci siano delle differenze significative tra le annate normali e quelle in cui è presente il disturbo, con un intervallo di confidenza del 95%. L'ANOVA è una generalizzazione del t-test. Entrambe le tecniche si utilizzano infatti per il confronto di valori medi. La differenza sostanziale è che il t test permette di confrontare solo due gruppi mentre il test ANOVA permette di confrontare un numero

qualsiasi di gruppi. L'obbiettivo di questo test è di valutare gli effetti sulla variabile di interesse comune a tutti i gruppi. Nel caso di questo studio le variabili sono rappresentate dai parametri estratti da ROXAS e il fine del test è quello di vedere se ciascuno dei parametri anatomici indagato variasse nei tre siti, basso (ACL), medio (ACM) e alto (ACH) a seconda dell'altitudine. È stato impostato un intervallo di confidenza del 95%.

3 RISULTATI

3.1 Parametri dendroanatomici del faggio

La Tabella 3.1.1 riporta tutti i valori riguardo l'analisi dendroanatomica svolta. Tutti i campioni analizzati sono stati sottoposti al processo di preparazione e di analisi con ROXAS.

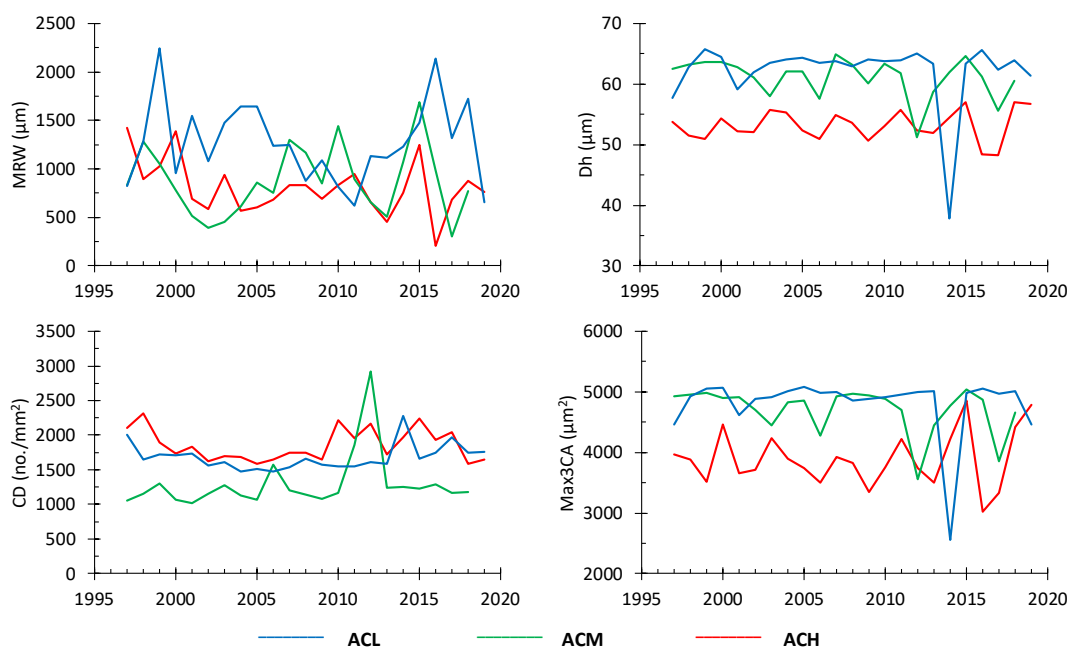
Tab. 3.1.1 - Numero di campioni, vetrini e anelli analizzati. Tra parentesi è riportato il numero totale di campioni. Il numero di anelli analizzati si riferisce al periodo 1997-2019. *Per il sito ACL, sono stati tagliati al microtomo solamente 2 campioni su 5.

	N. CAMPIONI	N. VETRINI	N. ANELLI
ACH	3 (5)	11 (25)	66
ACM	3 (5)	16 (29)	52
ACL	2 (5*)	17 (17*)	43
TOTALE	8 (15)	44 (71*)	161

Nella tabella 3.1.2 sono riportati i valori medi per ogni parametro analizzato con ROXAS in ciascuno dei tre plot (ACH, ACM, ACL). Per ognuno di questi parametri è stato costruito un grafico a linee (Figura 3.1.1)

Tab. 3.1.2 - Valori medi nel periodo 1997-2019 dei parametri anatomici analizzati.

	MRW (μm)	CD (no./ mm^2)	RCTA (%)	MCA (μm^2)	Dh (μm)	Max3CA (μm^2)	PMax3CA (%)	Ks ($\text{Kg}\cdot\text{Mpa}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$)
ACH	807.9	1858.6	31.0	191.1	53.2	3892.8	29.1	9.98E-07
ACM	871.7	1296.2	31.4	267.4	61.1	4701.2	25.3	1.26E-06
ACL	1278.5	1681.9	32.9	203.3	62.1	4813.2	20.3	1.30E-06



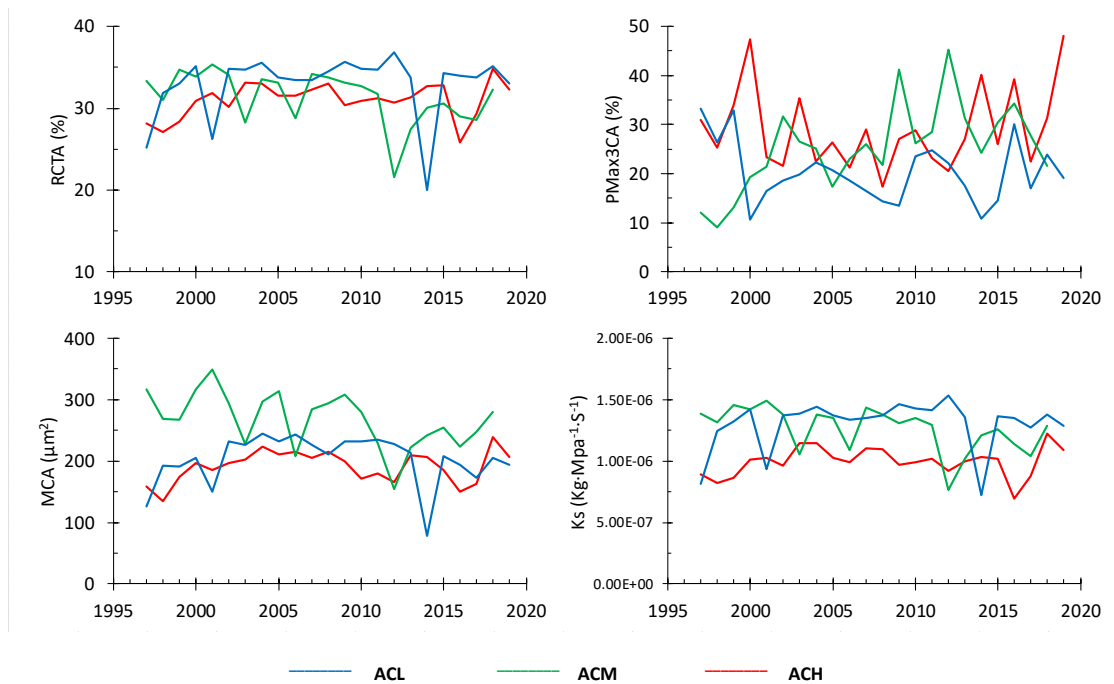


Fig. 3.1.1 - Serie medie per plot (ACL, ACM e ACH) relative ai parametri anatomici estratti (periodo 1997-2019).

I grafici ottenuti permettono di visualizzare l'andamento medio di ogni parametro nei rispettivi 3 plot nel periodo 1997-2019. Il sito alto (ACH) e medio (ACM) presentano un andamento simile in quasi tutti i parametri. In particolare, nell'anno 2016 coincidente con la gelata, il sito alto (ACH) presenta un picco negativo nei parametri MRW, Max3CA, RCTA e Ks. Nel sito medio (ACM) invece si registra un andamento simile, con la presenza di picchi negativi nell'anno 2017, anche se con effetti meno marcati rispetto al sito alto. Il sito basso (ACL) non mostra gli effetti della gelata né nel 2016 né nel 2017. Al contrario degli altri due siti però un picco negativo è registrato nell'anno 2014, rispettivamente nei parametri Dh, Max3CA, RCTA, PMax3CA, MCA e Ks. È da sottolineare però che il parametro MRW, che descrive l'ampiezza dell'anello, presenta un valore mediato. Questo risultato suggerisce che il plot in basso (ACL) non sia stato sottoposto ad un disturbo da gelata, ma piuttosto a condizioni edafo-climatiche sfavorevoli, come ad esempio precipitazioni insufficienti e basse temperature. Nell'anno 2014 le piante del sito basso presentano quindi anelli di spessore nella media, mentre le dimensioni e la capacità idraulica dei vasi sono inferiori rispetto agli altri anni. Nei capitoli successivi verranno analizzati i singoli parametri nel dettaglio.

3.2 Variabilità dendroanatomica secondo il gradiente altitudinale

Il test ANOVA è stato applicato sul periodo 1997-2019, comune a tutti i campioni analizzati. Nelle seguenti figure sono riportati i grafici box plot e le rispettive tabelle statistiche, per ogni parametro analizzato.

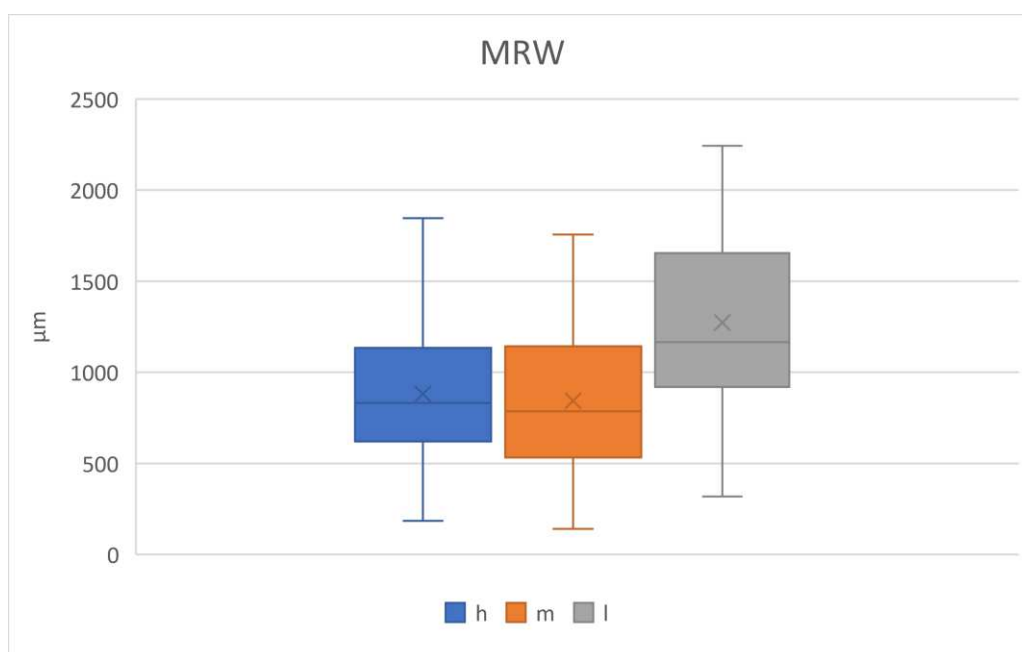


Fig. 3.2.1 – Box Plot sull'ampiezza media anelli (MRW) nei tre siti; h) alto, m) intermedio, l (basso)

Tab. 3.2.1 – test ANOVA svolto sul parametro MRW. Sq: deviazione standard; Gdl: gradi di libertà; Mq: somma dei quadrati,

Origine della variazione	Sq	Gdl	Mq	F	Valore di significatività	F crit
TRA GRUPPI	$6,1 \cdot 10^6$	2	$3 \cdot 10^6$	13,4	<0.001	3,05
NEI GRUPPI	$3,6 \cdot 10^7$	158	$2,3 \cdot 10^6$			
TOTALE	$4,2 \cdot 10^7$	160				

Il test ANOVA indica una differenza significativa tra le medie dei tre plot. Il valore di significatività inferiore a 0,05 è infatti il discriminante che permette di individuare la presenza o meno di una differenza tra i due gruppi. Dal grafico si può dedurre che nel sito basso (ACL, l nel grafico) gli anelli hanno in media un'ampiezza maggiore rispetto gli altri due siti. Questa differenza è dovuta alle condizioni più favorevoli edafo-climatiche presenti nel sito basso rispetto agli altri due siti ad un'altitudine maggiore.

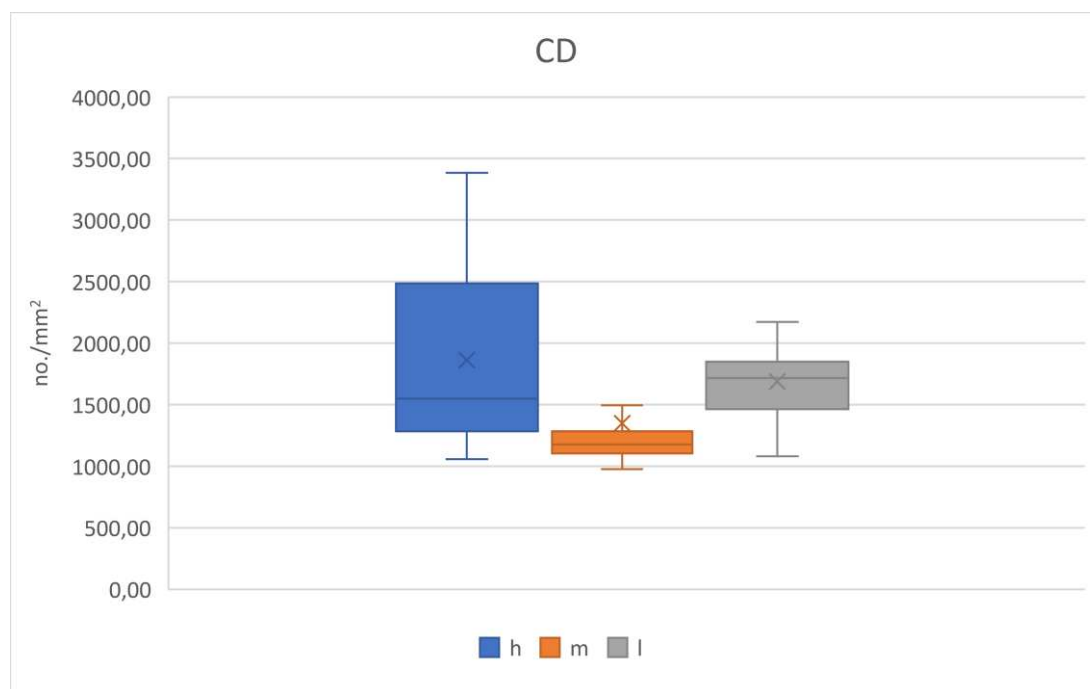


Fig. 3.2.2 – Box Plot sul numero di vasi per unità di superficie (CD) nei tre siti; h) alto, m) intermedio, l (basso)

Tab. 3.2.2 – test ANOVA svolto sul parametro CD

Origine della variazione	Sq	Gdl	Mq	F	Valore di significatività	F crit
TRA GRUPPI	$7 \cdot 10^6$	2	$3,8 \cdot 10^6$	8,2	<0.001	3,05
NEI GRUPPI	$7,4 \cdot 10^7$	158	$4,7 \cdot 10^6$			
TOTALE	$8,2 \cdot 10^6$	160				

Il test ANOVA è significativo. Il risultato del parametro CD è correlato al parametro MRW. La correlazione tra i due parametri mostra il numero di vasi, e quindi la porzione conducente, rispetto alla superficie dell'intero anello. Le piante del sito alto (ACH – h) sono quelle che presentano gli anelli più stretti ma con una più alta percentuale di vasi, situazione opposta nelle piante del sito basso (ACL – l). Il sito medio presenta una situazione intermedia, con anelli di spessore non troppo elevato e pochi vasi conduttivi. Questo suggerisce che le piante del sito medio siano state sottoposte a condizioni non ottimali durante la stagione vegetativa.

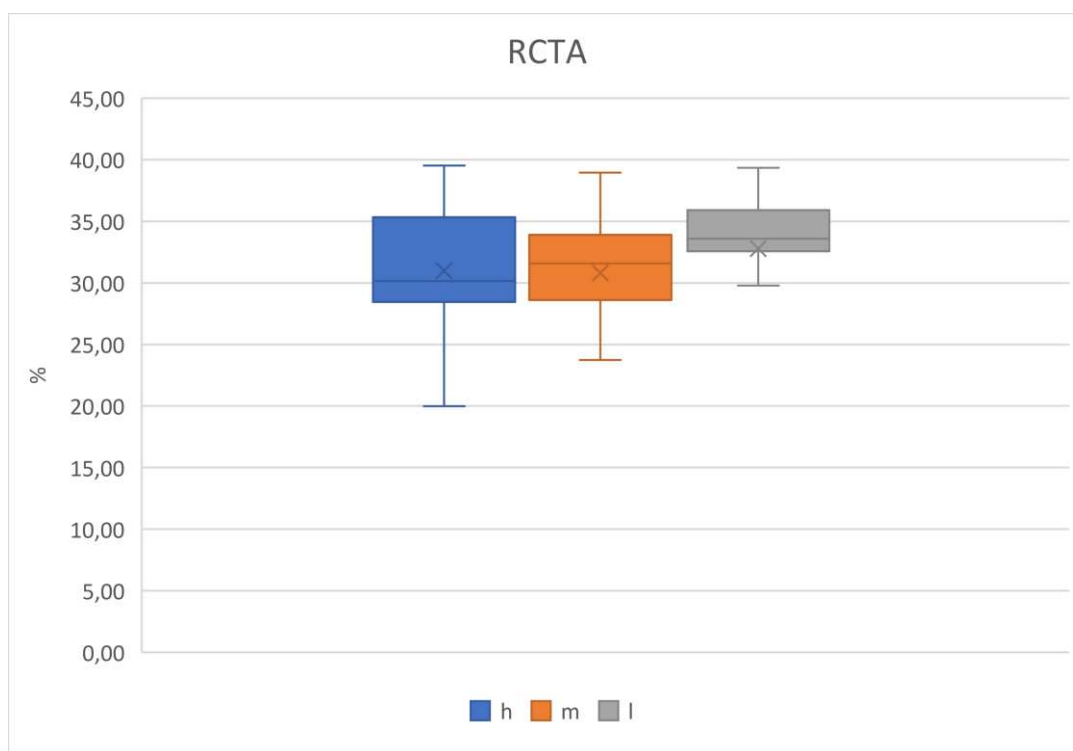


Fig. 3.2.3 – Box Plot della percentuale di area conducente dei vasi sull'intero anello (RCTA) nei tre siti; h) alto, m) intermedio, l (basso)

Tab. 3.2.3 – test ANOVA sul parametro RCTA

Origine della variazione	Sq	Gdl	Mq	F	Valore di significatività	F crit
TRA GRUPPI	112,7	2	56,3	2,14	0,120	3,05
NEI GRUPPI	4149,5	158	26,3			
TOTALE	4262,2	160				

Il test ANOVA applicato al parametro RCTA non risulta significativo, ad indicare che non ci sono grandi differenze di questo parametro al variare della quota.

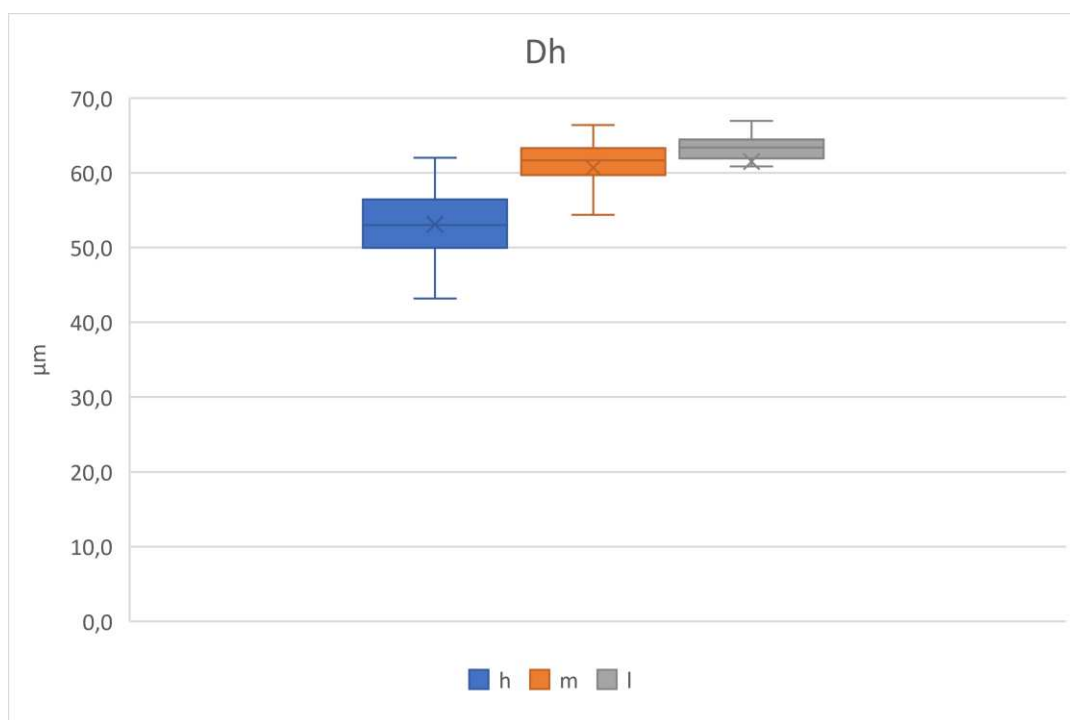


Fig. 3.2.4 – Box Plot del diametro medio dei vasi (Dh) nei tre siti; h) alto, m) intermedio, l (basso)

Tab. 3.2.4 – test ANOVA svolto sul parametro Dh

Origine della variazione	Sq	Gdl	Mq	F	Valore di significatività	F crit
TRA GRUPPI	2490,6	2	1245,3	27,7	<0.001	3,05
NEI GRUPPI	7094,8	158	44,9			
TOTALE	9585,4	160				

Il test ANOVA è significativo. Il sito basso (l) presenta i diametri più grandi, il sito alto (h) i più piccoli, mentre il sito medio (m) presenta delle condizioni intermedie. Il diametro è però uno dei parametri meno plastici ed è significativamente legato all'altezza degli alberi (Olson et al., 2014; Carrer et al., 2015). All'aumentare dell'altezza, infatti, un diametro costante dei vasi xilematici porterebbe ad un collasso dell'intero sistema fisiologico della pianta, secondo la legge di Hagen-Poiseuille (Ryan and Yoder 1997). Per contrastare il problema la pianta mette in atto una strategia, allargando il diametro dei condotti xilematici dall'apice verso il basso (Olson et al., 2014; Carrer et al., 2015). La differenza di altezza tra le piante campionate nel sito medio e alto non sono rilevanti, al contrario di quelle campionate nel sito basso (rivedi Tab 2.2.2.1). Nonostante, quindi, il diametro diminuisca all'aumentare dell'altezza, con il carotaggio ad 1.30 m tale caratteristica non è stata evidenziata.

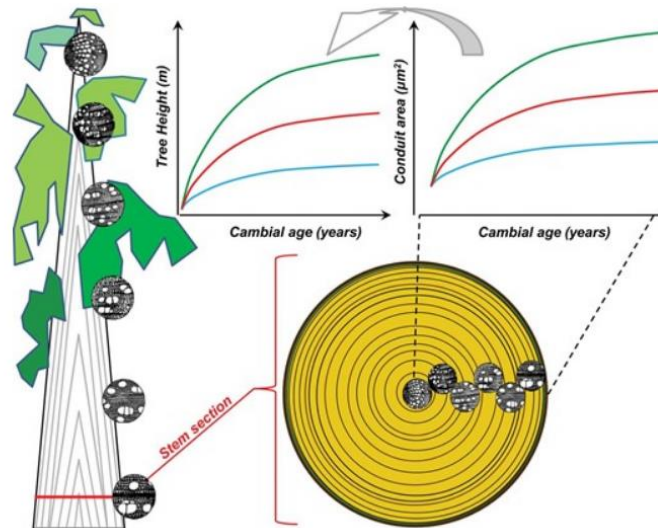


Fig. 3.2.5 – diametro dei vasi in relazione all’altezza e all’età cambiale (Olson et al., 2014; Carrer et al., 2015)

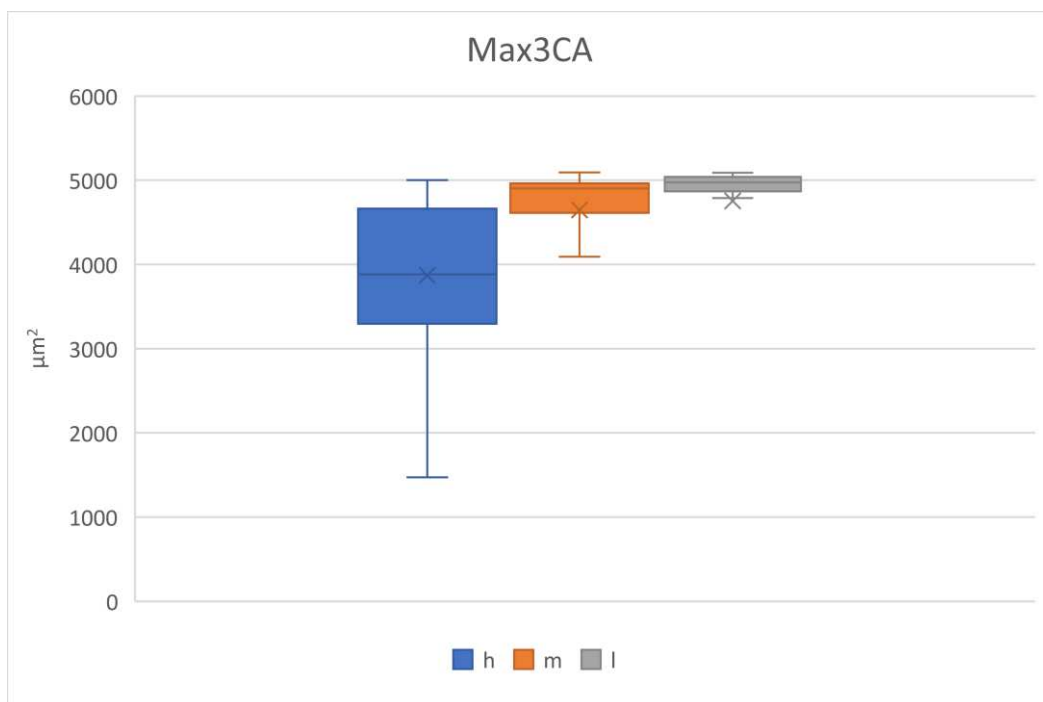


Fig. 3.2.6 – Box Plot della media della conducibilità idraulica dei tre vasi più grandi (Max3CA) nei tre siti; h) alto, m) intermedio, l) basso

Tab. 3.2.5 – test ANOVA svolto sul parametro Max3CA

Origine della variazione	Sq	Gdl	Mq	F	Valore di significatività	F crit
TRA GRUPPI	$2,6 \cdot 10^7$	2	$1,3 \cdot 10^7$	24,6	<0.001	3,05
NEI GRUPPI	$8,6 \cdot 10^7$	158	$5,4 \cdot 10^5$			
TOTALE	$1,1 \cdot 10^8$	160				

Il test ANOVA è significativo. Il Max3CA rappresenta la media della conducibilità idraulica dei tre vasi più grandi ed è strettamente legato all'ampiezza dei vasi, e quindi al diametro. I risultati ottenuti infatti sono simili a livello grafico, con i vasi più grandi nel plot basso ed i più piccoli nel plot alto.

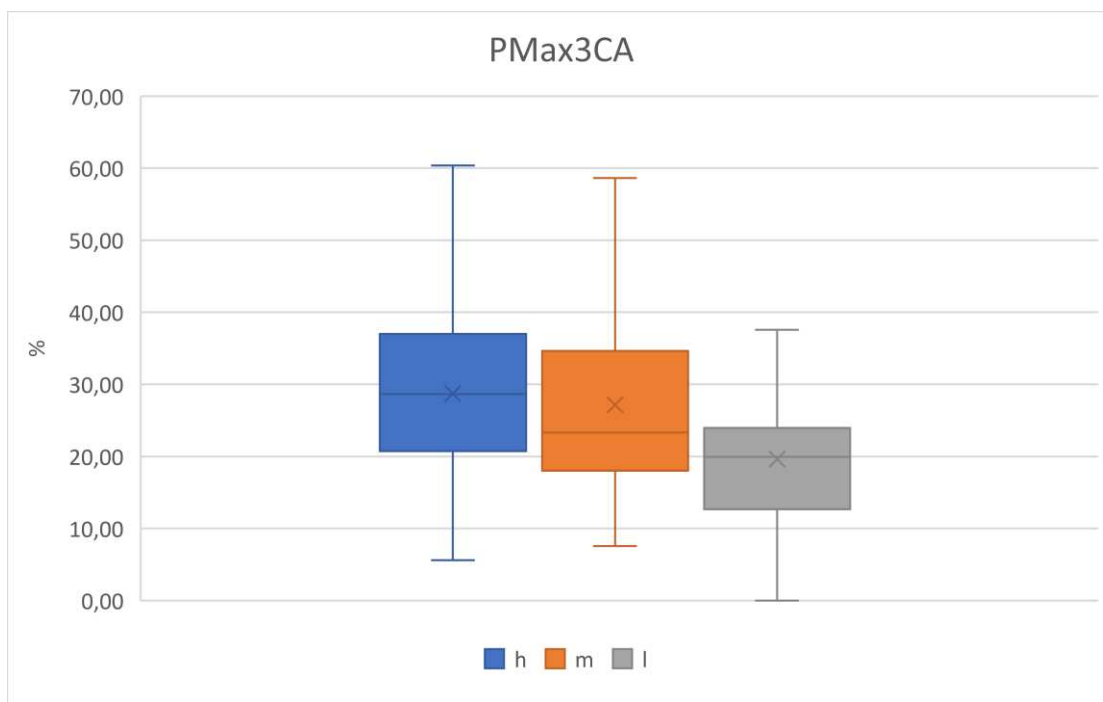


Fig. 3.2.7 – Box Plot della posizione relativa dei tre vasi più grandi (PMax3CA) nei tre siti; h) alto, m) intermedio, l) basso

Tab. 3.2.6 – test ANOVA svolto sul parametro PMax3CA

Origine della variazione	Sq	Gdl	Mq	F	Valore di significatività	F crit
TRA GRUPPI	2299,3	2	1149,7	8,89	<0.001	3,05
NEI GRUPPI	20430	158	129,3			
TOTALE	22729,4	160				

Il test ANOVA per il parametro PMax3CA è significativo. I tre vasi più grandi sono più lontani nel sito alto (ACH – h), mentre sono più vicini in quello basso (ACL – l). Il sito medio (ACM – m) mostra dei risultati intermedi.

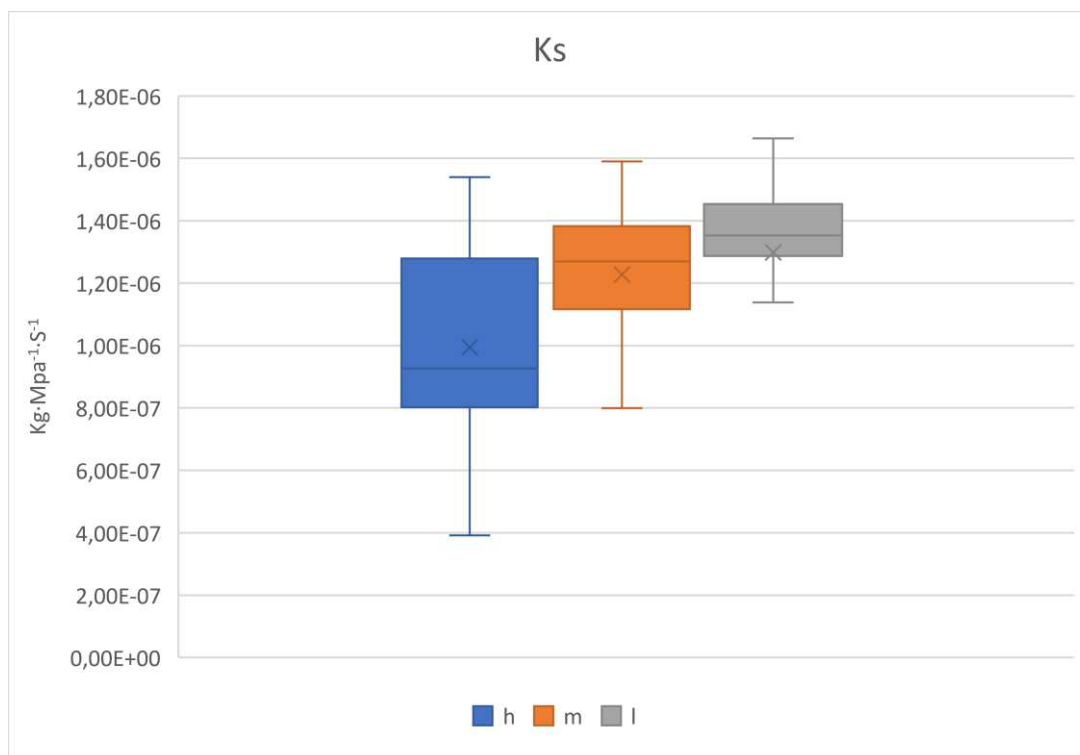


Fig. 3.2.8 – Box Plot della conducibilità idraulica specifica (Ks) nei tre siti; h) alto, m) intermedio, l) basso

Tab. 3.2.7 – test ANOVA svolto sul parametro Ks

Origine della variazione	Sq	Gdl	Mq	F	Valore di significatività	F crit
TRA GRUPPI	$2,86 \cdot 10^{-12}$	2	$1,43 \cdot 10^{-12}$	19,09	<0.001	3,05
NEI GRUPPI	$1,18 \cdot 10^{-11}$	158	$7,5 \cdot 10^{-14}$			
TOTALE	$1,47 \cdot 10^{-11}$	160				

Il test ANOVA è significativo. Anche in questo caso i risultati sul parametro Ks sono concordi a quanto riscontrato nei parametri precedenti. La conducibilità idraulica specifica è quindi direttamente proporzionale alle caratteristiche dei vasi, quali diametro (Dh) e area media dei vasi (MCA).

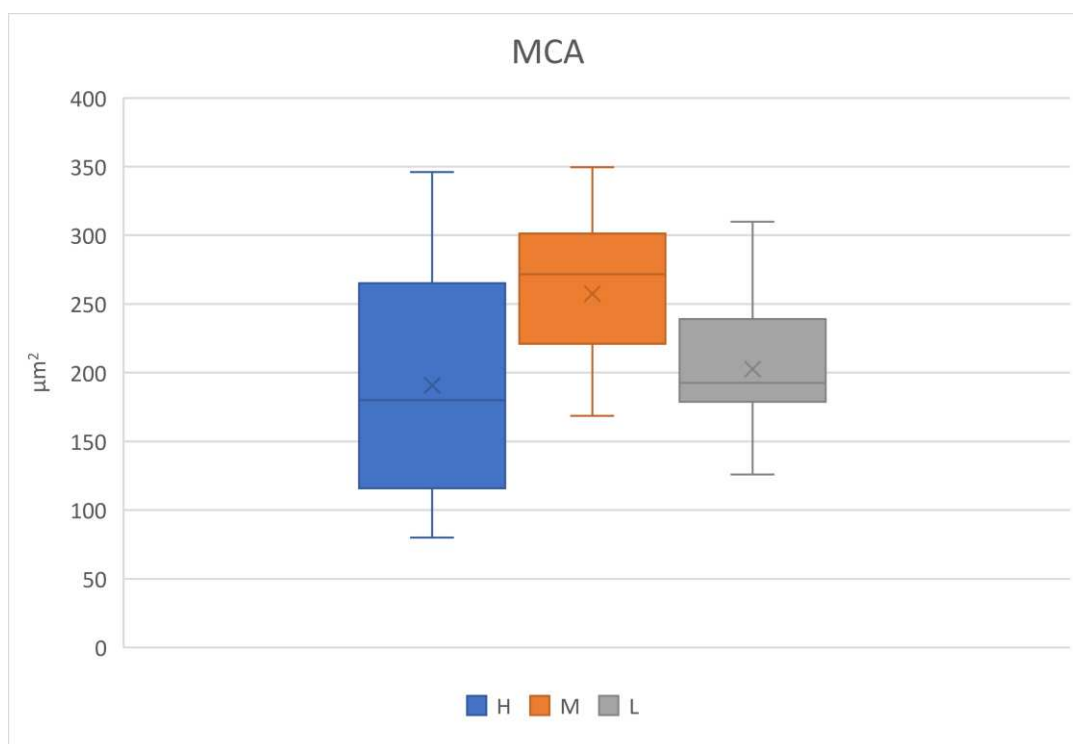


Fig. 3.2.9 – Box Plot dell'area media del vaso (MCA) nei tre siti; h) alto, m) intermedio, l) basso

Tab. 3.2.8 – test ANOVA svolto sul parametro MCA

Origine della variazione	Sq	Gdl	Mq	F	Valore di significatività	F crit
TRA GRUPPI	$1,3 \cdot 10^5$	2	69718,7	14,06	<0.001	3,05
NEI GRUPPI	$7,8 \cdot 10^5$	158	4958,6			
TOTALE	$9,2 \cdot 10^5$	160				

Il test ANOVA è significativo. i risultati del parametro MCA sono discordi con quelli ottenuti per il diametro Dh e la Ks (conducibilità idraulica specifica). La discrepanza tra i valori attesi e quelli ottenuti è probabilmente dovuta al fatto che sono state selezionate poche piante campione nel sito basso (ACL). Questo spiega perché l'MCA del sito a bassa quota, che dovrebbe essere il plot con i valori maggiori, presenti dei valori limitati. Sono stati svolti i t test di controllo (HM, HL ed ML) che hanno evidenziato delle differenze significative in tutti e tre casi, avvalorando l'ipotesi di una selezione non rappresentativa degli alberi da analizzare.

3.3 Variabilità dendroanatomica a seguito delle gelate tardive

L'analisi con il t-test è stata svolta comparando i dati del sito medio (ACM) e alto (ACH), confrontando le annate con gelata primaverile (2016 in ACH e 2017 in ACM) con i sei anni precedenti (periodo 2010-2015). Di seguito verranno riportati i grafici descrittivi ogni parametro

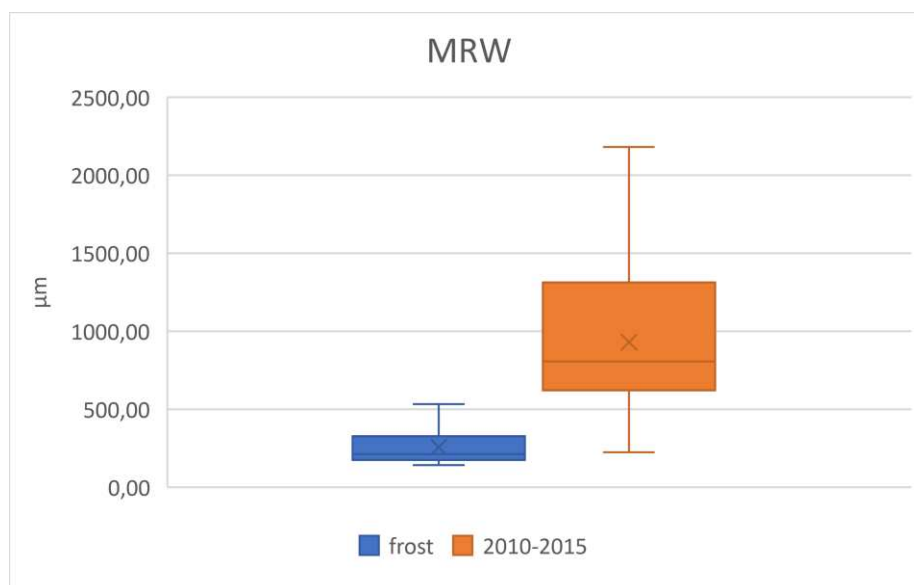


Fig. 3.3.1 – Box Plot sull'ampiezza media degli anelli (MRW) tra gli anni della gelata (frost) e il periodo 2010-2015

Tab. 3.3.1 – t-test svolto sul parametro MRW

Origine della variazione	Sq	Gdl	Mq	F	Valore di significatività	F crit
TRA GRUPPI	$2,3 \cdot 10^6$	1	$2,3 \cdot 10^6$	12,3	0,001	4,08
NEI GRUPPI	$7,5 \cdot 10^6$	40	$1,8 \cdot 10^5$			
TOTALE	$9,9 \cdot 10^6$	41				

Il parametro MRW presenta delle significative differenze tra le annate della gelata (frost) e il periodo 2010-2015. Il valore di significatività è molto basso ed inferiore a 0,05. Il valore di F è inoltre quasi il triplo di F critico, altro segnale che va a sottolineare la marcata diversità rilevata dal test. Si può quindi dedurre che l'ampiezza media degli anelli degli anni colpiti dalla gelata è nettamente inferiore a quella degli anelli in cui non si è presentato il disturbo. Il motivo per cui la differenza risulta essere significativa è

imputabile al fatto che nelle annate colpite da gelate primaverili che causano defoliazioni riducono l'attività fotosintetica della pianta e di conseguenza l'incremento anulare.

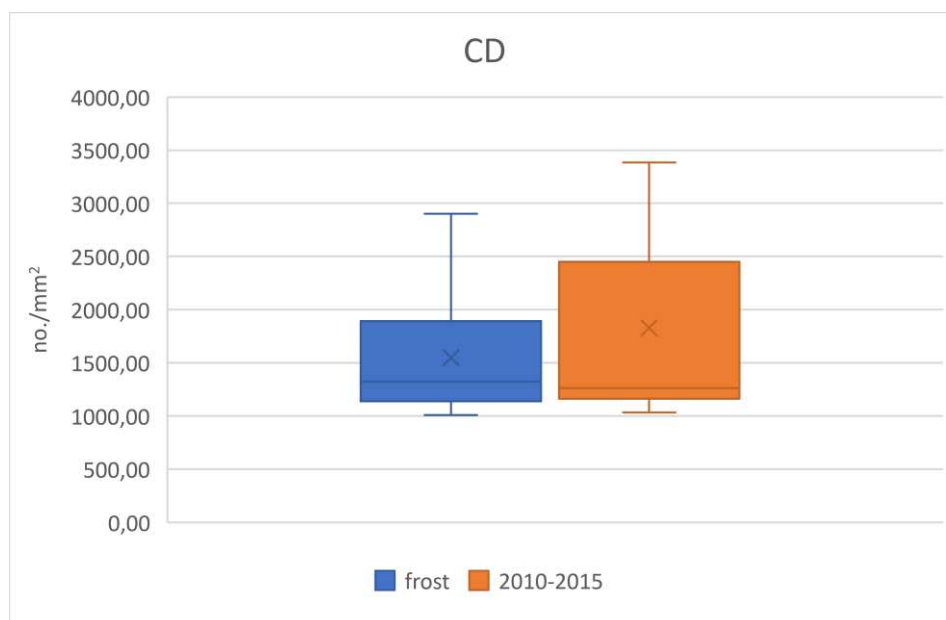


Fig. 3.3.2 – Box Plot sul numero di vasi per unità di superficie (CD) tra gli anni della gelata (frost) e il periodo 2010-2015

Tab. 3.3.2 – t-test svolto sul parametro CD

<i>Origine della variazione</i>	<i>Sq</i>	<i>Gdl</i>	<i>Mq</i>	<i>F</i>	<i>Valore di significatività</i>	<i>F crit</i>
TRA GRUPPI	$4 \cdot 10^5$	1	$4 \cdot 10^5$	0,373	0,544	4,08
NEI GRUPPI	$4,3 \cdot 10^7$	40	$1 \cdot 10^6$			
TOTALE	$4,3 \cdot 10^7$	41				

Il parametro CD, rappresentate il numero di vasi all'interno dell'anello, non presenta delle differenze significative all'interno dei due gruppi. Il valore di significatività è infatti maggiore di 0,05 ed il valore di F non supera l'F critico. Questo risultato è spiegato dal fatto che, al momento della gelata le piante campionate avevano già prodotto il legno primaticcio, che comprende la gran parte dei vasi, mentre il legno tardivo è maggiormente ricco di fibre. Questa caratteristica distribuzione dei vasi è spiegata dalla maggiore disponibilità di acqua e della minore traspirazione da parte della chioma all'inizio della

stagione vegetativa, dovuta a temperature minori e precipitazioni maggiori, rispetto all'estate (Sass and Eckstein, 1995; Prislán et al., 2018).

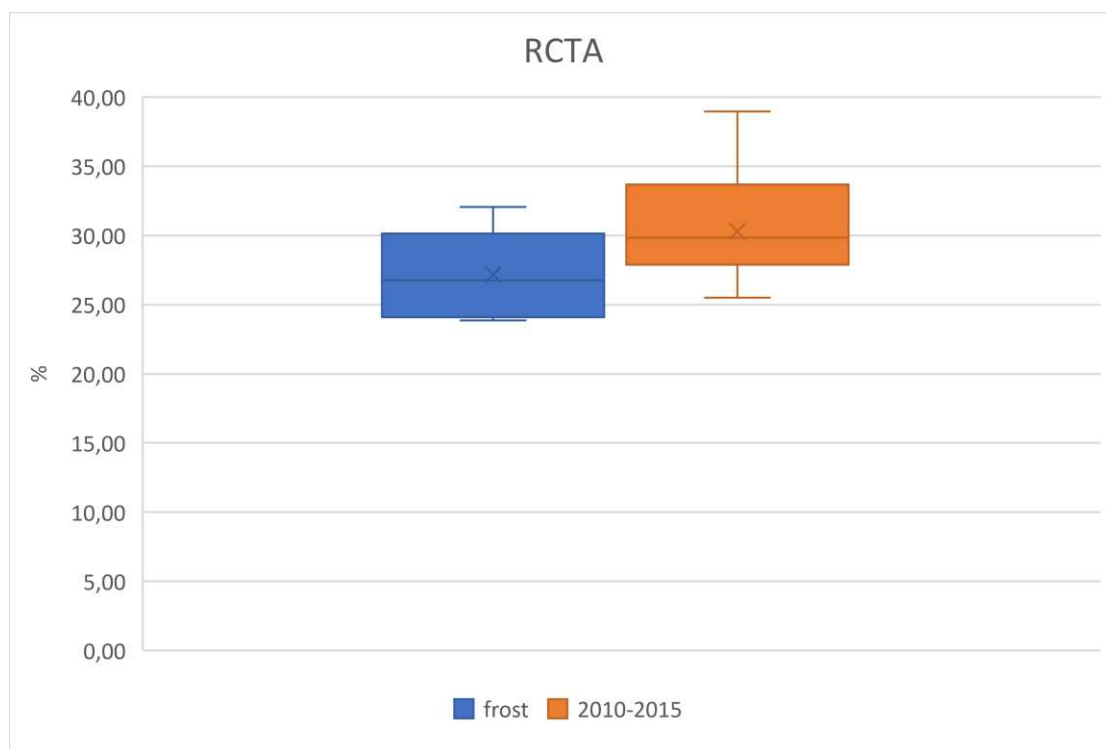


Fig. 3.3.3 – Box Plot della percentuale di area conducente dei vasi sull'intero anello (RCTA) tra gli anni della gelata (frost) e il periodo 2010-2015

Tab. 3.3.3 – t-test svolto sul parametro RCTA

<i>Origine della variazione</i>	<i>Sq</i>	<i>Gdl</i>	<i>Mq</i>	<i>F</i>	<i>Valore di significatività</i>	<i>F crit</i>
TRA GRUPPI	50,4	1	50,4	2,1	0,154	4,08
NEI GRUPPI	954	40	23,9			
TOTALE	1004	41				

I valori del parametro RCTA (percentuale di area conduttiva dei vasi sull'intero anello) seppur maggiore nel periodo 2010-2015 rispetto alle annate con gelata primaverile, non risulta significativo, poiché il suo valore di significatività è maggiore a 0,05 ed il valore di F non supera l'F critico.

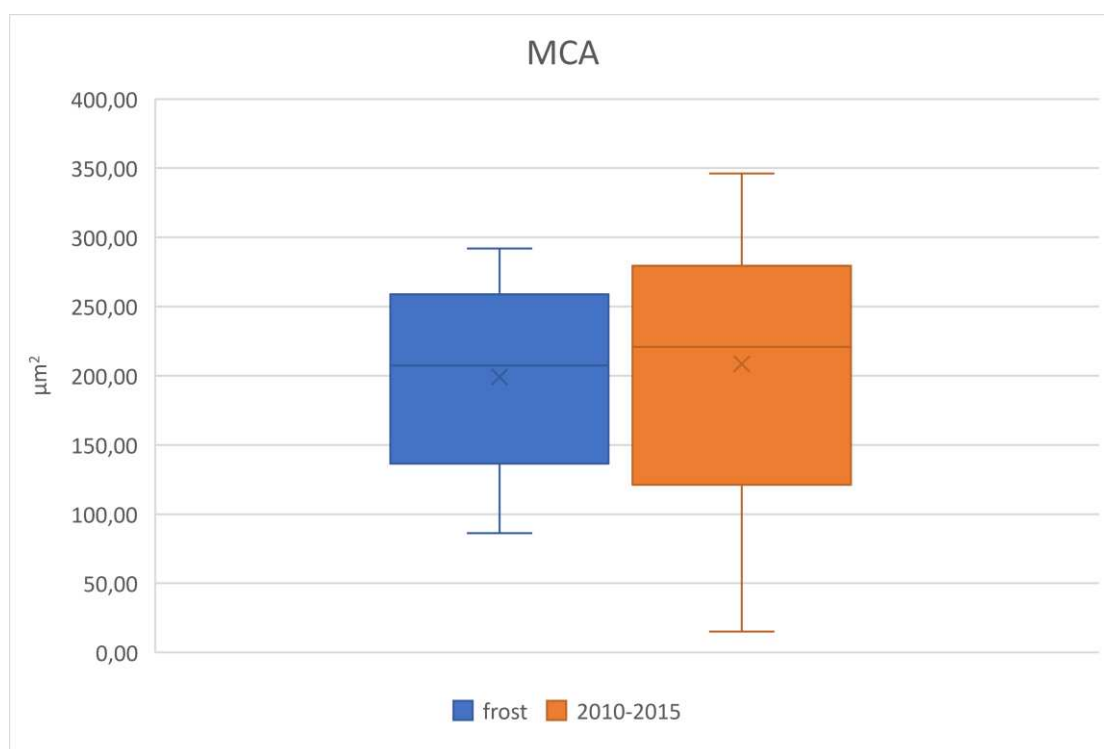


Fig. 3.3.4 – Box Plot dell'area media del vaso (MCA) tra gli anni della gelata (frost) e il periodo 2010-2015

Tab. 3.3.4 – t-test svolto sul parametro MCA

<i>Origine della variazione</i>	<i>Sq</i>	<i>Gdl</i>	<i>Mq</i>	<i>F</i>	<i>Valore di significatività</i>	<i>F crit</i>
TRA GRUPPI	477,7	1	477,7	0,064	0,801	4,08
NEI GRUPPI	$2,9 \cdot 10^5$	40	7445,7			
TOTALE	$2,9 \cdot 10^5$	41				

Il parametro MCA non presenta differenze significative tra i due gruppi. Il valore di significatività, infatti, è maggiore di 0,05 e l'F non supera l'F critico. L'MCA rappresenta l'area media del vaso, e dipende dall'altezza della pianta e dal diametro. I fattori climatici estremi non sono infatti determinanti per l'ampiezza dei vasi.

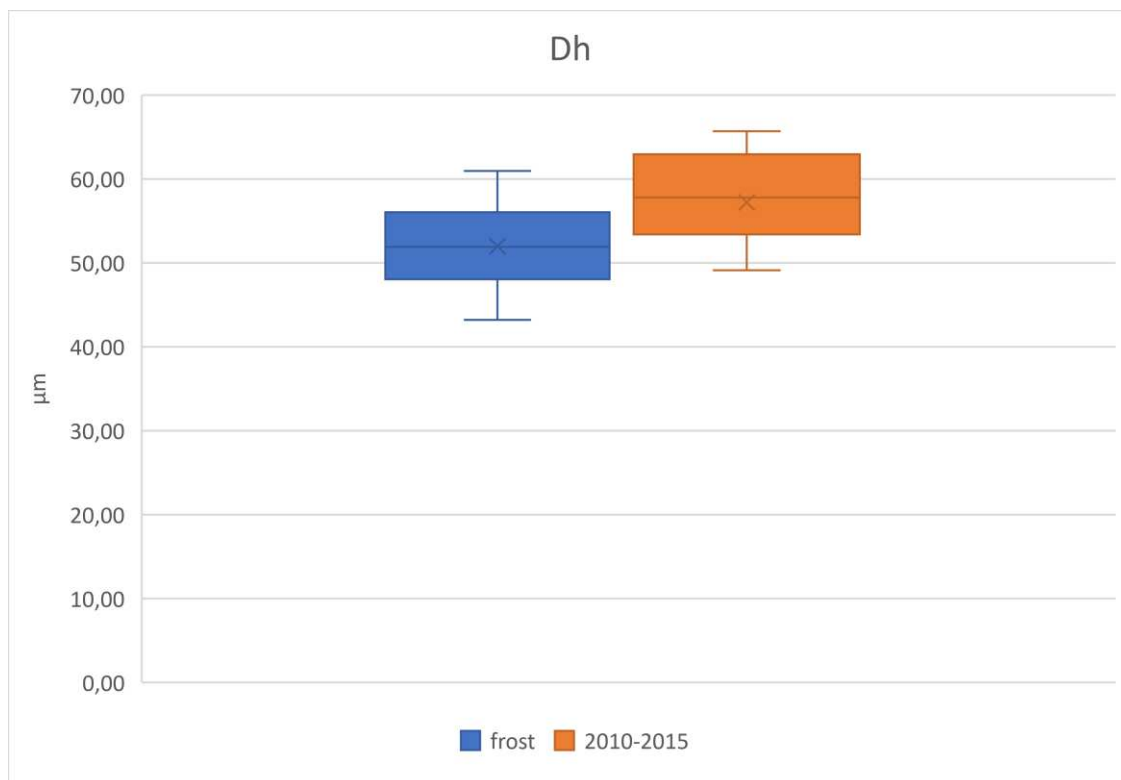


Fig. 3.3.5 – Box Plot del diametro medio dei vasi (Dh) tra gli anni della gelata (frost) e il periodo 2010-2015

Tab. 3.3.5 – *t*-test svolto sul parametro Dh

Origine della variazione	Sq	Gdl	Mq	F	Valore di significatività	F crit
TRA GRUPPI	139,9	1	139,9	3,43	0,071	4,08
NEI GRUPPI	1628,6	40	40,7			
TOTALE	1768,5	41				

Il parametro Dh non presenta un valore di significatività minore di 0,05 ed anche se il valore di F è molto simile al valore di F critico. Questa differenza indica che nei due gruppi il parametro Dh, che rappresenta il diametro medio dei vasi, presenta differenze non significative, in particolare, i vasi degli anelli 2016 e 2017 disturbati dalla gelata hanno un diametro minore rispetto gli anelli del periodo 2010-2015. Questo parametro sembra non essere strettamente legato al fenomeno della gelata, ma piuttosto alle condizioni edafo-climatiche presenti all’inizio della stagione vegetativa, come ad esempio precipitazioni poco abbondanti (Arnic et al., 2021).

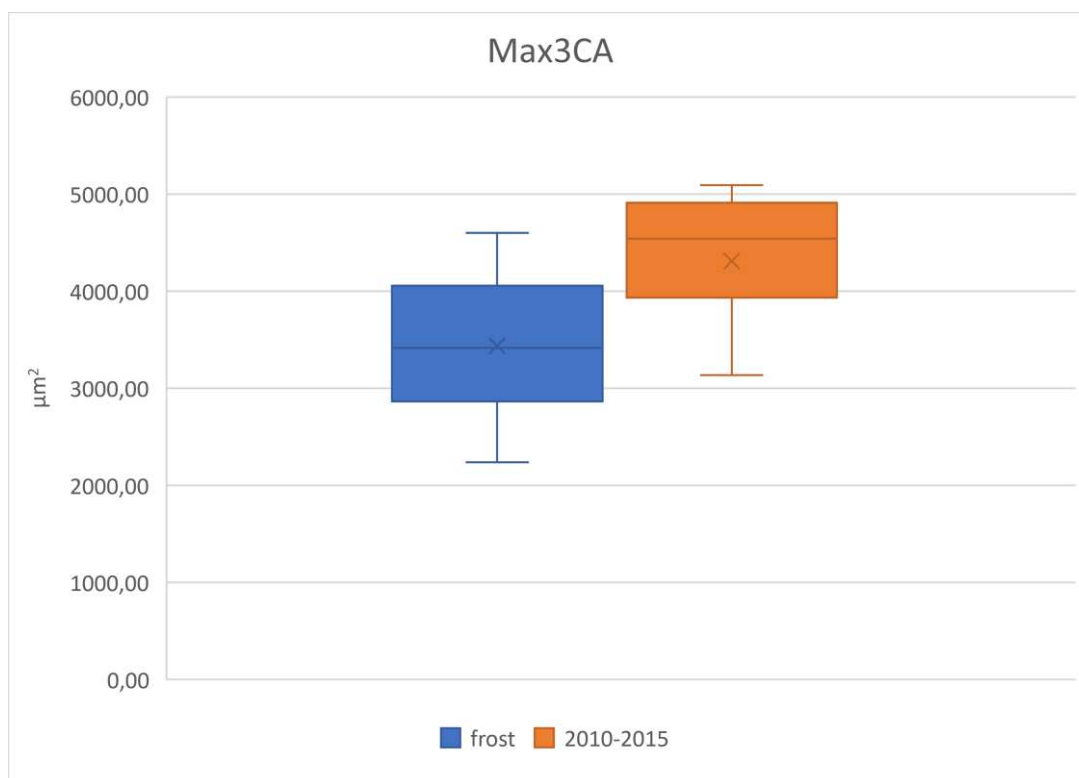


Fig. 3.3.6 – Box Plot della media della conducibilità idraulica dei tre vasi più grandi (Max3CA) tra gli anni della gelata (frost) e il periodo 2010-2015

Tab. 3.3.6 – *t*-test svolto sul parametro Max3CA

Origine della variazione	Sq	Gdl	Mq	F	Valore di significatività	F crit
TRA GRUPPI	$3,7 \cdot 10^6$	1	$3,7 \cdot 10^6$	6,18	0,017	4,09
NEI GRUPPI	$2,2 \cdot 10^7$	38	$6 \cdot 10^5$			
TOTALE	$2,6 \cdot 10^7$	39				

Il parametro Max3CA, rappresentante la media della conducibilità idraulica dei tre vasi più grandi è diverso tra i due plot. Il valore di significatività è estremamente basso e pari a 0,017. Questo significa che nel circa nel 98.3% dei casi il valore di Max3CA sarà minore in seguito a defogliazioni da gelata primaverile. Di conseguenza nei faggi colpiti da gelata primaverile i tre vasi più grandi hanno in media una minore conducibilità idraulica. Questo risultato è strettamente legato al diametro medio (Dh), risultante anche in questo caso minore negli anni 2016-2017.



Fig. 3.3.7 – Box Plot della posizione relativa dei tre vasi più grandi (PMax3CA) tra gli anni della gelata (frost) e il periodo 2010-2015

Tab. 3.3.7 – t-test svolto sul parametro PMax3CA

<i>Origine della variazione</i>	<i>Sq</i>	<i>Gdl</i>	<i>Mq</i>	<i>F</i>	<i>Valore di significatività</i>	<i>F crit</i>
TRA GRUPPI	89	1	89,04	0,65	0,424	4,08
NEI GRUPPI	5465,1	40	136,6			
TOTALE	5554,2	41				

Il parametro PMax3CA, sebbene di poco presenta un valore non significativo. Questo risultato indica che la posizione relativa dei tre vasi più grandi è molto simile tra i due plot. Il PMax3CA non è comunque influenzato dalla presenza della gelata. Inoltre, le differenze possono anche essere correlate all'elevata plasticità del faggio, che è in grado di regolare le dimensioni e la distribuzione dei vasi (e.g., Hajek et al., 2016; Arnič et al., 2021).

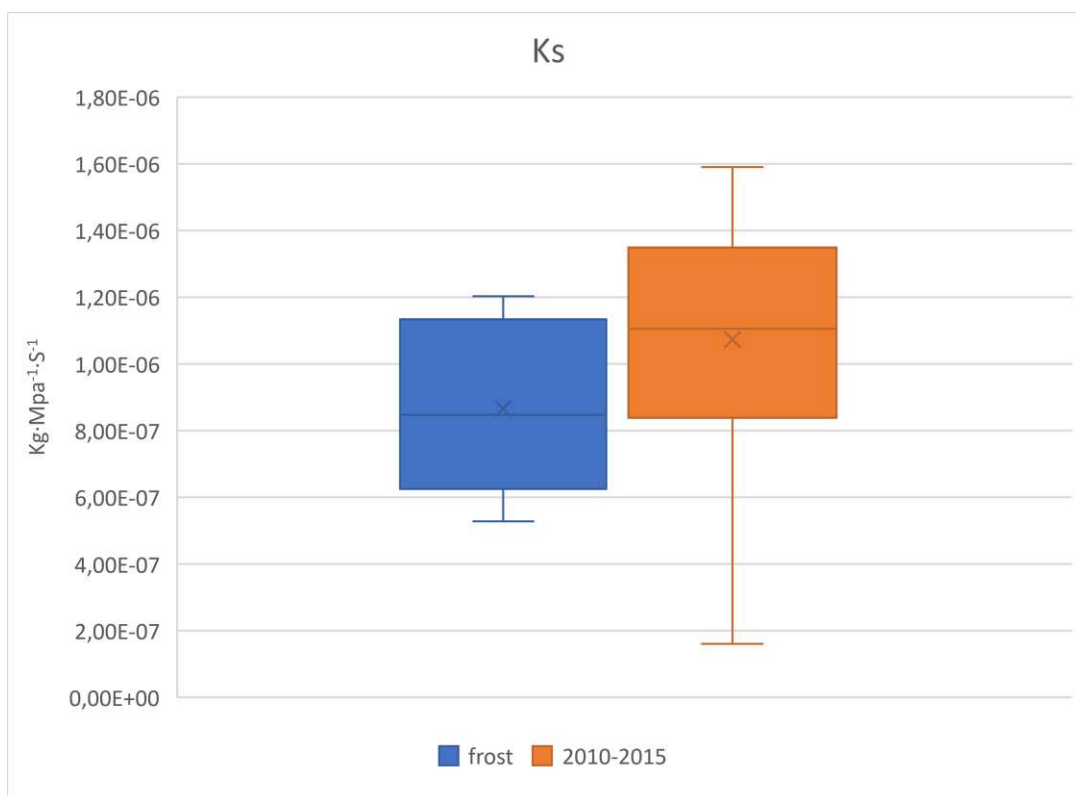


Fig. 3.3.8 – Box Plot della conducibilità idraulica specifica (Ks) tra gli anni della gelata (frost) e il periodo 2010-2015

Tab. 3.3.8 – t-test svolto sul parametro Ks

Origine della variazione	Sq	Gdl	Mq	F	Valore di significatività	F crit
TRA GRUPPI	$2,2 \cdot 10^{-13}$	1	$2,2 \cdot 10^{-13}$	2,58	0,115	4,08
NEI GRUPPI	$3,4 \cdot 10^{-12}$	40	$8,6 \cdot 10^{-14}$			
TOTALE	$3,6 \cdot 10^{-12}$	41				

Ks rappresenta la capacità idraulica specifica potenziale e non risulta una differenza significativa nelle annate con gelata. Questo spiega il perché i risultati dei due parametri differiscano tra di loro, infatti, nel caso della Kh è determinante l'ampiezza dell'anello, mentre nel caso della Ks è il diametro (Dh), e quindi l'ampiezza del lume dei vasi, a essere determinante. Dalla gelata non dipendono quindi le differenze sul parametro Ks, poiché è strettamente legato all'anatomia dei vasi.

3.4 Principali fattori di sensitività climatica del faggio

Diversi tratti anatomici hanno mostrato diversi livelli di plasticità in risposta alle diverse condizioni ambientali. I parametri maggiormente influenzati dalla gelata sono il MRW, RCTA e Max3CA, poiché evidenziano le caratteristiche conduttive dell'anello. Le differenze evidenziate rispetto alle annate normali sono dovute all'assenza del legno tardivo. I vasi più grandi osservati nel legno primaverile, infatti, sono coerenti con la massimizzazione dell'efficienza idraulica in questa prima parte dell'anello, al pari delle annate non disturbate dalla gelata. La plasticità di alcuni tratti xilematici era prevedibile, considerando l'ampio areale di distribuzione della specie, sia a livello globale (gradiente latitudinale) che locale (gradiente altitudinale, es. in Appennino), nonché l'elevata diversità genetica all'interno delle popolazioni (Bresson et al., 2011; Wortemann et al., 2011; Coccozza et al., 2016). Altri tratti anatomici non sono altrettanto plastici, ma dipendono dalle caratteristiche morfologiche della pianta. I parametri MCA, CD, Dh, RCTA, PMax3CA e Ks descrivono le dimensioni e la capacità idraulica dei vasi, le cui caratteristiche sono influenzate particolarmente dall'altezza della pianta e dal corredo genetico. La formazione dello xilema varia, infatti in base all'anno, al luogo, ed è strettamente correlato ai cambiamenti delle condizioni meteorologiche, in particolare la disponibilità di acqua e la temperatura dell'aria (Arnic et al., 2021). Il diametro dei vasi (Dh) è tra i parametri più importanti e che determina numerosi tratti fisiologici dello xilema, come la conduttività idraulica, la vulnerabilità all'embolia indotta dal congelamento dell'acqua, la vulnerabilità alla cavitazione (formazione di bolle d'aria) indotta dalla siccità e probabilmente anche alla diffusione di agenti patogeni (Arnic et al., 2021). Le caratteristiche dei vasi sono comunque specie-specifiche, sebbene i fattori esterni influenzino in una certa misura la loro area finale. Il faggio è quindi una specie sensibile alla variabilità climatica e le caratteristiche anatomiche dello xilema lo rendono particolarmente vulnerabile a danni da gelo o siccità. Con i cambiamenti climatici in corso, l'innalzamento delle temperature, i prolungati periodi di siccità e gli eventi estremi sono diversi gli effetti sul faggio. Diversi studi dendroclimatologici hanno ad esempio suggerito che l'aumento della temperatura influenzerà positivamente la crescita radiale nelle faggete nei prossimi decenni (Dulamsuren et al., 2016; Martinez del Castillo et al., 2018; Vospernik e Nothdurft, 2018; Prislán et al., 2019). Al contrario eventi gravi associati al clima, come siccità, gelate e ondate di calore, amplificano la suscettibilità del faggio a danni secondari da vari agenti patogeni e parassiti (La Porta et al., 2008).

4 CONCLUSIONI

Questo studio ha dimostrato come il campo emergente della dendroanatomia integri sia gli studi dendroecologici, dendrocronologici che la ricerca sui cambiamenti climatici (Buttò et al., 2020; Piermattei et al., 2020), con lo scopo principale di studiare come l'anatomia dello xilema si modifichi a seguito di un disturbo climatico. La nostra analisi svolta su un totale di otto campioni prelevati lungo un gradiente altitudinale, al fine di verificare se e come l'eventuale suscettibilità ai disturbi climatici variasse lungo un versante montano analogamente a quanto osservato con le analisi dendroclimatologiche già eseguite (Tonelli et al., 2022). Le caratteristiche anatomiche dei vasi e degli anelli hanno permesso di individuare gli effetti delle gelate tardive primaverili. Ad esempio, l'area e la distribuzione dei vasi, oltre alla larghezza annuale degli anelli, forniscono una migliore comprensione di come i cambiamenti nelle condizioni ambientali influenzano non solo la crescita radiale, ma anche l'anatomia del legno e le sue proprietà (Arnic et al., 2021). Lo studio dei vasi in particolare permette di analizzare come il faggio si sia adattato ai disturbi climatici, rappresentando una preziosa fonte di informazioni sulle condizioni ambientali a cui è stata sottoposta la pianta in passato. I risultati sono conformi a quelli ottenuti in altri studi e dimostrano che il principale danno provocato dalla gelata è la mancanza del legno tardivo, con un conseguente mancato accrescimento radiale, mentre le caratteristiche anatomiche dei vasi non sono direttamente legate ai danni da gelata. Questo studio ha infatti evidenziato come le caratteristiche dei vasi siano maggiormente influenzate dal gradiente altitudinale e dalla morfologia della pianta, piuttosto che dalla presenza o meno di un disturbo climatico. Chiaramente questi studi, che richiedono analisi molto *time consuming*, per assumere una valenza ecologica maggiore necessitano di un numero maggiore di campioni prelevati in diverse zone geografiche.

5 BIBLIOGRAFIA

- J.Hacket-Pain A., D. Friend A., 2017. Increased growth and reduced summer drought limitation at the southern limit of *Fagus sylvatica* L., despite regionally warmer and drier conditions,
- Arnic, D., Gricar, J., Jevsenak, J., Bozic, G., von Arx, G., and Prislán, P. (2021). Different wood anatomical and growth responses in European beech (*Fagus sylvatica* L.) at three forest sites in Slovenia. *Front. Plant Sci.* 12:669229. doi: 10.3389/fpls.2021.669229
- Björklund, J., Seftigen, K., Schweingruber, F., Fonti, P., von Arx, G., Bryukhanova, M. V., et al. (2017). Cell size and wall dimensions drive distinct variability of earlywood and latewood density in northern hemisphere conifers. *New Phytol.* 216, 728–740. doi: 10.1111/nph.14639
- Bresson, C. C., Vitasse, Y., Kremer, A., and Delzon, S. (2011). To what extent is altitudinal variation of functional traits driven by genetic adaptation in European oak and beech? *Tree Physiol.* 31, 1164–1174. doi: 10.1093/treephys/tpr084
- Buttò V., Shishov V., Tychkov I., Popkova M., He M. Rossi S, Deslauries A., Morin H., Comparing the Cell Dynamics of Tree-Ring Formation Observed in Microcores and as Predicted by the Vaganov–Shashkin Model
- Calandra R., 1992. "indagini pedologiche nel comprensorio del Monte Catria (Appennino Umbro-Marchigiano)". Consorzio Nazionale per la Valorizzazione delle Risorse Forestali e delle Aree Protette Frontone (PU)
- Camarero, J.J., Gazol, A., Sangüesa-Barreda, G., Oliva, J., Vicente-Serrano, S.M., 2015. To die or not to die: early warnings of tree dieback in response to a severe drought. *J. Ecol.* 103, 44–57
- Carrer, M., von Arx, G., Castagneri, D., and Petit, G. (2015). Distilling allometric and environmental information from time series of conduit size: the standardization issue and its relationship to tree hydraulic architecture. *Tree Physiol.* 35, 27–33. doi: 10.1093/treephys/tpu108
- Cocozza, C., de Miguel, M., Psidova, E., Ditmarova, L., Marino, S., Maiuro, L., et al. (2016). Variation in ecophysiological traits and drought tolerance of beech (*Fagus sylvatica* L.) seedlings from different populations. *Front. Plant Sci.* 7:886. doi: 10.3389/fpls.2016.00886
- De Micco V., Campelo F., De Luis M., Bräuning A., Grabner M., Battipaglia G. and Cherubini P. (2016). Intra-annual density fluctuations in tree rings: how, when, where, and why?
- Dittmar C, Elling W (2006) Phenological phases of common beech (*Fagus sylvatica* L.) and its dependence on region and altitude in Southern Germany. *Eur J Forest Res.*
- Ebone, A., et al (2012). "Il Faggio. Conoscenze e indirizzi per la gestione sostenibile in Piemonte.": 101-111.
- Geßler A., Keitel C., Kreuzwieser J., Matyssek R., Seiler W. & Rennenberg H. Potential risks for European beech (*Fagus sylvatica* L.) in a changing climate, , *Trees - Structure and Function* 21, 1 (2007)
- Hacke, U. G., Spicer, R., Schreiber, S. G., and Plavcova, L. (2017). An ecophysiological and developmental perspective on variation in vessel diameter. *Plant Cell Environ.* 40, 831–845. doi: 10.1111/pce.12777
- Houston Durrant T., de Rigo D., Caudullo G. (2016). *Fagus sylvatica* in Europe: distribution, habitat, usage, and threats
- IFNC- Inventario nazionale delle foreste e dei serbatoi di carbonio, 2007

- Kramer K., et al. 2010, *Forest Ecology and Management* 259, 2213. The ecology and silviculture of beech: from gene to landscape
- Klopčič M., Rozman A., Bončina A (2022). Evidence of a Climate-Change-Induced Shift in European Beech Distribution: An Unequal Response in the Elevation, Temperature and Precipitation Gradients
- La Porta N., Capretti P., Thomsen I. M., Kasanen R., Hietala A. M., Von Weissenberg K. (2008). Forest pathogens with higher damage potential due to climate change in Europe
- Ladislav P. *Forest genetics 2*: 161-170, 1995 gene conservation in european beech (*Fagus sylvatica* L.), Faculty of Forestry, Technical University, SK-96053 Zvolen, Slovakia, 1995
- Mayer H, König C, Rall A (1988) Identifikation von Witterungsereignissen mit pflanzenphysiologischer Streßwirkung für Waldbäume. *Forstwissenschaftliches Centralblatt* 107:131–140
- Martinez del Castillo E., Prislán P., Gričar J., Gryc V., Merela M., Giagli K., de Luis M., Vavrčík H., Čufar K. (2018). Challenges for growth of beech and co-occurring conifers in a changing climate context.
- Ningre F, Colin F (2007) Frost damage on the terminal shoot as a risk factor of fork incidence on common beech (*Fagus sylvatica* L.). *Ann For Sci* 64:79–86
- Olson, M. E., Anfodillo, T., Rosell, J. A., Petit, G., Crivellaro, A., Isnard, S., et al. (2014). Universal hydraulics of the flowering plants: vessel diameter scales with stem length across angiosperm lineages, habits and climates. *Ecol. Lett.* 17, 988–997. doi: 10.1111/ele.12302
- Pandey, S. (2021). Climatic influence on tree wood anatomy: a review. *Journal of Wood Science*, 67(1), 1-7.
- Paule L., Gömöry D., Vysny J. (1955). Genetic diversity and differentiation of beech populations in Eastern Europe
- Piermattei, A., von Arx, G., Avanzi, C., Fonti, P., Gärtner, H., Piotti, A., et al. (2020). Functional relationships of wood anatomical traits in Norway spruce. *Front. Plant Sci.* 11:683. doi: 10.3389/fpls.2020.00683
- Pignatti S. (1982), *Flora d'Italia*, Edagricole
- Prendin, A.L., Carrer, M., Fonti, P. et al. Root xylem in three woody angiosperm species is not more vulnerable to embolism than stem xylem. *Plant Soil* 452, 1–14 (2020)
- Prislán, P., Čufar, K., De Luis, M., and Gričar, J. (2018). Precipitation is not limiting for xylem formation dynamics and vessel development in European beech from two temperate forest sites. *Tree Physiol.* 38, 186–197. doi: 10.1093/treephys/tpx167
- Regione Marche – Faggio (*Fagus sylvatica* L.), 2002
- Rete Natura 2000 Regione Marche, 2016
- Ryan M. G. and Yoder B. J., (1997). Hydraulic Limits to Tree Height and Tree Growth,
- Sass, U., and Eckstein, D. (1995). The variability of vessel size in beech (*Fagus Sylvatica* L) and its ecophysiological interpretation. *Trees Struct. Funct.* 9, 247–252. doi: 10.1007/BF00202014
- Sakai A, Larcher W (1987) Frost survival of plants. *Ecological Studies* 62. Springer-Verlag, Berlin, 321 pp
- Scholz, A., Klepsch, M., Karimi, Z., & Jansen, S. (2013). How to quantify conduits in wood? *Frontiers in plant science*, 4, 56

- Schweingruber, F.H. (1996). *Tree Rings and Environment-Dendrochronology*. Haupt, Bern
- Pacheco-Solana A, Oelkers R, D'Arrigo R, Santos GM, Rodriguez-Caton M, Tejedor E, Ferrero E, Fuentes AF, Maldonado C and Andreu-Hayles L (2023) Radiocarbon and wood anatomy as complementary tools for generating tree-Ring records in Bolivia. *Front. Plant Sci.* 14:1135480. doi: 10.3389/fpls.2023.1135480
- Till O (1956) Über die Frosthärte von Pflanzen sommergrüner Laubwälder. *Flora, Abt. B* 143:499–542
- Tonelli, E., Vitali, A., Camarero, J. J., Colangelo, M., Frigo, D., Ripullone, F., Carrer, M., and Urbinati, C.: How late spring frosts affect tree-ring growth and wood anatomical traits of European beech in Mediterranean mountain forests? EGU General Assembly 2023, Vienna, Austria, 24–28 Apr 2023, EGU23-9237, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-9237>, 2023.
- Tonelli E., Vitali A., Malandra F., Camarero J., Colangelo M., Nolè A., Ripullone F., Carrer M., Urbinati C. (2022) Tree-ring and remote sensing analyses uncover the role played by elevation on European beech sensitivity to late spring frost. Volume 857, Part 1, 2023, 159239
- Tranquillini W, Plank A (1989) Ökophysiologische Untersuchungen an Rotbuchen (*Fagus sylvatica* L.) in verschiedenen Höhenlagen Nord- und Südtirols. *Centralblatt für das gesamte Forstwesen* 106: 225–246
- Vitali A., et al. "Effects of natural and anthropogenic drivers on land-cover change and treeline dynamics in the Apennines (Italy)." *Journal of Vegetation Science* 29.2 (2018): 189-199
- von Arx, G., & Carrer, M. (2014). ROXAS—A new tool to build centuries-long tracheid-lumen chronologies in conifers. *Dendrochronologia*, 32(3), 290-293.
- von Arx, G., Carrer, M., Björklund, J., & Fonti, P. (2018). Quantitative wood anatomy opens a weekly to millennial time window in tree-ring research. In EGU General Assembly Conference Abstracts (p. 18929)
- von Wühlisch G. Technical guidelines for genetic conservation and use – European beech
- Vospertnik S. and Nothdurft A., (2018). Can trees at high elevations compensate for growth reductions at low elevations due to climate warming?
- Wortemann, R., Herbette, S., Barigah, T. S., Fumanal, B., Alia, R., Ducousso, A., et al. (2011). Genotypic variability and phenotypic plasticity of cavitation resistance in *Fagus sylvatica* L. across Europe. *Tree Physiol.* 31, 1175–1182. doi: 10.1093/treephys/tpr10