

# UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO TERRITORIO E SISTEMI AGRO-FORESTALI

Corso di laurea magistrale in Scienze Forestali e Ambientali LM - 73

## Effetto della diversa permanenza della copertura nevosa sui tratti xilematici in *Juniperus communis*

Relatore:

Dott.ssa Angela Luisa Prendin

Correlatore:

Prof. Marco Carrer

Laureando:

Luca Bolge

Matricola n. 2063119



# INDICE

RIASSUNTO.....	4
ABSTRACT.....	6
1. INTRODUZIONE.....	8
1.1. I cambiamenti climatici e la vegetazione d’alta quota .....	8
1.2. La xilogenesi.....	13
1.3. Il legno omoxilo .....	14
1.4. <i>Juniperus communis</i> .....	19
1.5. Obiettivi dello studio.....	23
2. MATERIALI E METODI .....	26
2.1. Area di studio.....	26
2.2. Disegno sperimentale e precedenti analisi .....	27
2.3. Dati climatici .....	29
2.4. Attività di campionamento e preparazione campioni .....	31
2.5. Acquisizione ed elaborazione delle immagini .....	33
2.6. Dati qualitativi .....	35
2.7. Analisi statistiche.....	36
3. RISULTATI .....	38
3.1. Danni da gelo .....	38
3.2. Effetto del trattamento sulla struttura anatomica dello xilema .....	40
3.3. Effetto del trattamento sulla struttura anatomica dello xilema escludendo il legno di compressione.....	49
3.4. Variazioni anatomiche legate alle condizioni climatiche .....	51
4. DISCUSSIONE.....	52
4.1. Lesioni da gelate tardive .....	52
4.2. Variazioni tratti anatomici .....	53
4.2.1. Larghezza media dell’anello .....	53
4.2.2. Conduttività idraulica .....	55
4.2.3. Pareti cellulari .....	56
4.3. Confronti con precedenti analisi.....	58
5. CONCLUSIONI .....	60
6. BIBLIOGRAFIA.....	62
7. SITOGRAFIA.....	70
8. MATERIALI SUPPLEMENTARI.....	72



## RIASSUNTO

Gli effetti dei cambiamenti climatici a livello globale sono molteplici. Il riscaldamento delle terre emerse e degli oceani, le modifiche nel regime delle precipitazioni e l'incremento di frequenza ed intensità di fenomeni climatici estremi sono alcune tra le cause che hanno portato a variazioni nella distribuzione, struttura e dinamiche degli ecosistemi, con implicazioni per la biodiversità e ciclo del carbonio. Nelle Alpi, si è osservato come, negli ultimi decenni, l'aumento delle temperature, e la riduzione delle precipitazioni invernali, abbia determinato una progressiva riduzione della durata della copertura nevosa e un conseguente allungamento della stagione vegetativa con contestuali variazioni nella distribuzione, composizione e sviluppo fenologico della vegetazione. Risulta quindi di fondamentale importanza investigare come le variazioni nelle dinamiche di copertura nevosa possano indurre adattamenti nelle specie d'alta quota per meglio comprendere come queste risponderanno in futuro qualora le attuali tendenze dovessero continuare.

Questo studio è stato effettuato su ginepro comune (*Juniperus communis* L.), la conifera con il più ampio areale di distribuzione nell'emisfero settentrionale, per valutare gli effetti della durata della copertura nevosa sull'accrescimento secondario e la struttura xilematica di questa specie. In prossimità del passo Giau (BL), è stato quindi condotto un esperimento di manipolazione della copertura nevosa, il quale ha simulato: l'allungamento (C) e l'accorciamento (S) del periodo di copertura nevosa, un terzo gruppo di individui è stato utilizzato come controllo (N). Utilizzando metodi di dendroanatomia sono stati quantificati accrescimento radiale e caratteristiche anatomiche di 30 individui; inoltre, per ogni sezione analizzata è stato quantificato il numero di anelli da gelo. È stato quindi valutato come le risposte individuali in termini di larghezza media dell'anello, ampiezza del lume e spessore delle pareti cellulari differissero tra i tre trattamenti.

I risultati mostrano che la frequenza di anelli da gelo è maggiore negli individui (N) ed (S) rispetto ai (C). Inoltre, non sono emerse differenze significative nell'accrescimento e nelle caratteristiche anatomiche tra le piante sottoposte ai diversi trattamenti.

La copertura nevosa sembra quindi garantire protezione contro le gelate tardive. Le mancate differenze tra risposte strutturali e di accrescimento nel ginepro comune potrebbero essere dovute all'alta variabilità tra individui piuttosto che ai trattamenti e indicare comunque una generale ridotta risposta nei tratti anatomici alla quale potrebbe essere associato un eventuale meccanismo di acclimatazione.



## ABSTRACT

The effects of global climate change are manifold. The warming of land and oceans, changes in the precipitation patterns and the increased frequency and intensity of extreme weather events are among the causes that have led to variation in the distribution, structure and dynamics of ecosystems, with implications for biodiversity and the carbon cycle. In the Alps, it has been observed that, in the recent decades, the rise in temperatures and the reduction in winter precipitation have led to a progressive reduction in duration of snow cover and a consequent lengthening of the growing seasons with concurrent variations in the distribution, composition and phenological development of vegetation. It is therefore crucial to investigate how changes in snow cover dynamics may induce adaptations in high-altitude species to better understand how they will respond in the future if current trends continue.

This study was carried out on common juniper (*Juniperus communis* L.), the conifer with the widest distribution range in the Northern Hemisphere, to assess the effects of snow cover duration on secondary growth and xylem structure of this species. Near the Giau Pass (BL), a snow cover manipulation experiment was conducted, simulating: lengthening (C) and shortening (S) of snow cover period, with a third group of individuals used as a control (N).

Using dendroanatomical methods, radial growth and anatomical features of 30 individuals were quantified; in addition, the number of frost rings was evaluated for each analyzed section. It was then evaluated how individual responses in terms of mean ring width, cell lumen size and cell wall thickness differed among the three treatments.

The results show that the frequency of frost rings is higher in individuals (N) and (S) compared to (C). Furthermore, no significant differences emerged in growth and anatomical characteristics among plants subjected to different treatments.

Snow cover therefore seems to provide protection against late frost. The lack of differences in structural and growth responses in common juniper could be due to high variability among individuals rather than treatments and may indicate a general reduced response in anatomical traits, which could be associated with a potential acclimation mechanism.



# 1. INTRODUZIONE

## 1.1. I cambiamenti climatici e la vegetazione d'alta quota

Le attività umane, principalmente attraverso le emissioni di gas serra (GHG) come anidride carbonica (CO<sub>2</sub>) e metano (CH<sub>4</sub>), sono la causa dell'attuale riscaldamento globale, il quale in parte è stato limitato dal raffreddamento causato dagli aerosol (IPCC, 2023). Nel periodo 2011-2020 la temperatura globale è stata di circa 1,1°C superiore rispetto al periodo 1850-1900 (figura 1) mentre, nel 2019 la concentrazione di CO<sub>2</sub> in atmosfera ha raggiunto 410 ppm (figura 2) (IPCC, 2023). Oltre alle alterazioni nella composizione dell'atmosfera, le attività umane hanno causato dei cambiamenti anche negli oceani, nella criosfera e nella biosfera e sono probabilmente la principale causa del ritiro dei ghiacciai e della diminuzione nella durata della copertura nevosa primaverile nell'emisfero settentrionale (IPCC, 2023).

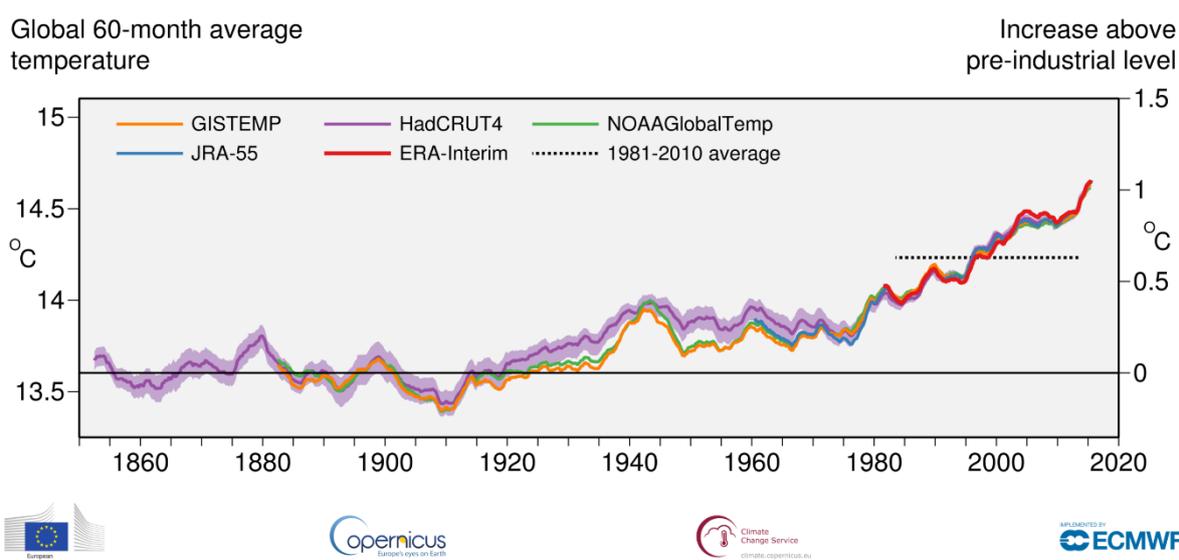
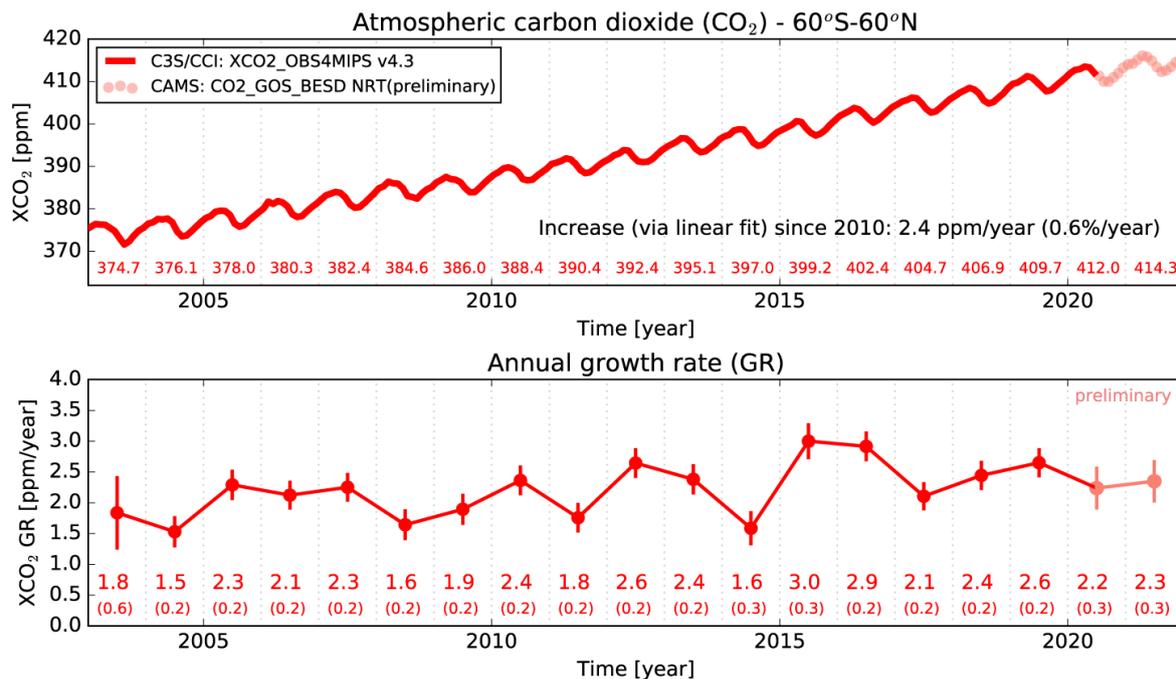


Figura 1. Media mobile di 60 mesi della temperatura dell'aria globale a due metri di altezza (asse sinistro) e del cambiamento stimato rispetto al periodo preindustriale (asse destro) secondo diversi dataset: ERA-Interim (Servizio per il Cambiamento Climatico Copernicus, ECMWF), GISTEMP (NASA), HadCRUT4 (Centro Hadley Met Office), NOAAGlobalTemp (NOAA) e JRA-55 (JMA). (<https://climate.copernicus.eu/last-four-years-have-been-warmest-record-and-co2-continues-rise>)



Data: 01.2003-06.2020: XCO2\_OBS4MIPS (v4.3); after 06.2020: CAMS (NRT) - Satellites: SCIAMACHY/ENVISAT + GOSAT + OCO-2 - Credit: C3S/CCI/CAMS/Univ. Bremen/SRON v: 09.02.2022



PROGRAMME OF THE EUROPEAN UNION



Figura 2. In alto è rappresentata la concentrazione globale mensile di CO<sub>2</sub> [ppm] in atmosfera relativa al periodo 2003-2021. La concentrazione di CO<sub>2</sub> è stata ricavata dai dati satellitari. In basso è mostrato il tasso di crescita medio annuale della concentrazione di CO<sub>2</sub>. (<https://climate.copernicus.eu/esotc/2021/globe-in-2021>)

In ambienti d'alta quota i cambiamenti climatici, oltre ad un aumento delle temperature, determinano anche alterazioni dei modelli meteorologici stagionali, riduzioni della durata della copertura nevosa a bassa quota, ritiro dei ghiacciai, incrementi nello scioglimento del permafrost e del numero di laghi glaciali (Adler et al., 2022). Queste variazioni nella criosfera e nel ciclo dell'acqua alterano la disponibilità idrica sia per le persone che per i processi produttivi, inoltre, i cambiamenti nelle precipitazioni e nei regimi dei corsi d'acqua influenzano anche la produzione di energia idroelettrica con un incremento del rischio economico finanziario per gli investimenti nel settore (Adler et al., 2022). In aggiunta, a causa del riscaldamento globale, il limite del bosco si è spostato verso l'alto e, alcune specie di bassa quota migrano ad altitudini maggiori mentre, quelle che non riescono a migrare rischiano l'estinzione; il cambiamento climatico ha quindi effetti negativi su biodiversità e servizi ecosistemici. Si deve infine considerare che i cambiamenti nella stagionalità hanno un effetto negativo sulle attività ricreative e sul turismo (Adler et al., 2022).

Nelle Alpi, negli ultimi decenni, è stata registrata una elevata variabilità climatica in linea con i cambiamenti climatici globali di lungo termine dovuti all'aumento delle concentrazioni di gas serra; in ogni caso, nel XX secolo le temperature nell'arco alpino sono aumentate ad un tasso doppio

rispetto alla media dell'emisfero boreale (Auer et al., 2007). A partire dagli anni '80 il riscaldamento delle Alpi è stato particolarmente elevato con un tasso di 0,5°C per decennio (Gobiet et al., 2014). Per quanto riguarda i cambiamenti nelle precipitazioni, questi variano considerevolmente in base alla regione, al periodo e alla stagione considerata. I modelli spaziali delle precipitazioni medie annue mostrano che durante il XX secolo, nella parte nord-occidentale della catena, vi è stato un lieve aumento delle precipitazioni (principalmente a causa di tendenze positive in inverno e primavera), mentre nelle Alpi sud-orientali si è verificato un significativo inaridimento (Brunetti et al., 2006). Relativamente alle variazioni climatiche in alta quota, si deve considerare che la temperatura è fortemente influenzata dall'altitudine, infatti, a quote elevate sono stati registrati dei tassi di riscaldamento maggiori (Gobiet et al., 2014); la relazione quota-temperatura è comunque influenzata da vari fattori come cambiamenti su vasta scala nella circolazione atmosferica (Ceppi et al., 2012) e alterazioni nel bilancio energetico; queste ultime sono indotte sia da variazioni nella copertura nevosa (Scherrer et al., 2012) sia dai cambiamenti nella radiazione solare che dipendono dalle alterazioni nella trasmissività dell'atmosfera (Marty et al., 2002). Nell'arco alpino, i cambiamenti climatici determinano anche una variazione nella copertura nevosa, con effetti sia sugli ecosistemi che sulle attività socioeconomiche (Beniston, 2012). Il comportamento della copertura nevosa dipende da altitudine, orientamento, esposizione, circolazione atmosferica e dalla localizzazione (Gobiet et al., 2014). Nel corso del XX secolo si sono registrate delle variazioni nella quantità e nella durata della copertura nevosa con inverni nevosi seguiti da altri con poche precipitazioni solide (Gobiet et al., 2014). In alcuni casi gli inverni scarsamente nevosi sembrano essere legati alla fase positiva (o calda) della North Atlantic Oscillation (NAO) (Beniston, 1997). In ogni caso vi sono vari studi relativi alle Alpi che concordano sulla probabilità di assistere a forti riduzioni della quantità e della durata della neve al di sotto dei 1500 m, inoltre i vari modelli prevedono che anche al di sopra dei 2000 m si verifichi una diminuzione della quantità di neve. Si deve poi considerare che la riduzione della copertura nevosa è maggiore in primavera (Gobiet et al., 2014).

Nella catena alpina, un altro effetto del cambiamento climatico riguarda il ritiro dei ghiacciai (figura 3), condizione che comporta un aumento dei pericoli legati alla formazione di valanghe di ghiaccio, di colate detritiche (Pauli et al., 2003; Gobiet et al., 2014) e di laghi glaciali (Gobiet et al., 2014). Si deve inoltre considerare che la disgregazione dei ghiacciai determina anche un processo di feedback positivo connesso all'energia termica dell'acqua liquida, la quale accelera lo scioglimento dei ghiacci (Gobiet et al., 2014). Attualmente, nell'arco alpino vi sono anche delle problematiche di instabilità

dei pendii e di caduta massi dovute allo scioglimento del permafrost, il quale è causato dal riscaldamento globale (Pauli et al., 2003; Gobiet et al., 2014).

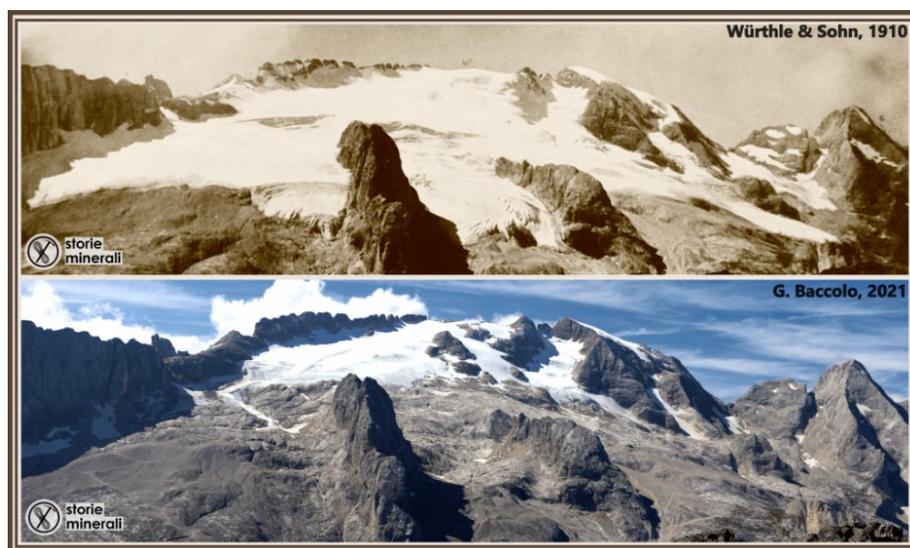


Figura 3. Ghiacciaio della Marmolada, confronto tra il 1910 e il 2021 (<https://storieminerali.it/ghiacciai-cultura/>)

Si deve inoltre considerare che in alta montagna la vegetazione si è adattata alle condizioni di bassa temperatura e, ad eccezione delle basse latitudini, anche ad una breve stagione di crescita; questa condizione rende la vegetazione sensibile al riscaldamento climatico. Gli ecosistemi di alta montagna rispondono principalmente ai fattori climatici, infatti, con l'altitudine diminuisce l'importanza dei fattori biotici quali la competizione tra le specie per le risorse e gli impatti umani diretti legati ad agricoltura e pascolamento (Lamprecht et al., 2018). Il riscaldamento globale tende ad amplificarsi in alta quota rispetto alle aree di pianura (Cannone et al., 2007; Lamprecht et al., 2018), inoltre, sulle Alpi la minore durata della copertura nevosa comporta un allungamento della stagione vegetativa (Lamprecht et al., 2018); questa condizione favorisce la migrazione verso l'alto delle specie provenienti dalle altitudini inferiori, le quali entrano in competizione con le specie di alta quota minacciandone la permanenza (Pauli et al., 2003; Lamprecht et al., 2018). Di fatto, questa migrazione verso altitudini maggiori può determinare la riduzione dell'areale e la scomparsa di specie criofile e subnivali; nelle Alpi vi sono delle specie endemiche che a causa di queste variazioni potrebbero estinguersi (Pauli et al., 2003). Il cambiamento climatico determina quindi un'espansione dell'areale delle specie vegetali verso l'alto (Cannone et al., 2007; Lamprecht et al., 2018) e, tra le nuove specie colonizzatrici, si riscontra un'elevata quantità di specie che necessitano di temperature più elevate (Lamprecht et al., 2018). I cambiamenti nella composizione specifica delle specie alpine e subnivali sono quindi un importante indicatore ecologico degli impatti del cambiamento climatico (Cannone et al., 2007; Lamprecht et al., 2018).

Si deve inoltre considerare che il riscaldamento climatico, anticipando l'inizio della stagione vegetativa, può incrementare il rischio di danni da gelo, in quanto le piante iniziano a vegetare in un periodo nel quale possono verificarsi sbalzi di temperatura con eventi di gelo improvviso (Jönsson e Barring, 2011). Per quanto riguarda la resistenza al gelo, in inverno, in alta quota, la vegetazione non ha difficoltà a sopravvivere, in quanto la copertura nevosa la protegge dalle basse temperature estreme (Taschler e Neuner 2004; Larcher et al., 2010). Durante la stagione vegetativa invece, la resistenza alle gelate è minore e le piante possono subire danni da gelo e perdere una frazione sostanziale dei loro tessuti (Taschler e Neuner 2004). Tali eventi sono facilmente distinguibili anche negli anelli di accrescimento (anello con trauma da gelo), la pianta infatti produce del tessuto xilematico anomalo (tessuto calloso), indotto da congelamento durante il periodo vegetativo nel corso del quale andavano formandosi le cellule di quel tessuto (Kaennel et al., 1995).

Nell'arco alpino, le specie legnose arbustive possono svilupparsi fino ad una quota di circa 3000 m mentre il limite altitudinale delle piante erbacee è più elevato; in queste aree le basse temperature sono quindi un importante fattore di stress ambientale e, le piante legnose spesso sono esposte a condizioni che possono causare danni da gelo (Neuner, 2014). Le temperature gelide, infatti, possono verificarsi durante tutto l'anno e la loro gravità in termini di intensità e durata aumenta con l'altitudine; inoltre, all'aumentare della quota cresce anche la frequenza degli eventi con basse temperature (Neuner, 2014). In ogni caso, la sopravvivenza al gelo di un individuo dipende dalla sopravvivenza dei tessuti delle gemme e del fusto oltre che delle foglie. Nelle piante legnose alpine si sono evoluti vari meccanismi di resistenza al gelo. Alcune specie sono in grado di tollerare la presenza di ghiaccio nei tessuti e la connessa disidratazione da gelo, in altre vi sono meccanismi di prevenzione del congelamento, inoltre vi sono casi in cui il ciclo vitale della specie consente di sfuggire alle gelate (Neuner, 2014).

Negli habitat alpini, durante la stagione vegetativa, gli eventi di gelo non sono rari e influenzano la composizione delle comunità vegetali di alta quota in quanto, la resistenza al gelo è un fattore determinante per definire il funzionamento e la struttura delle comunità (Pescador et al., 2016). In generale, al crescere dell'altitudine le specie in grado di tollerare le gelate dovrebbero diventare dominanti, infatti i tratti di resistenza al gelo sembrano essere correlati con l'altitudine, mentre, per quanto riguarda le specie che evitano gli eventi di gelo, queste restano ad altitudini minori (Pescador et al., 2016).

Il cambiamento climatico sta modificando il regime delle nevicate per cui, vi è stato un incremento nel numero di studi relativi alle risposte della vegetazione ai cambiamenti nella copertura nevosa (Wipf e Rixen, 2010). In generale, tutti gli studi che simulano un aumento delle precipitazioni solide prevedono di accumulare la neve trasportata dal vento mentre, le simulazioni di scioglimento anticipato della copertura nevosa vengono effettuate rimuovendo manualmente la neve oppure aumentando i tassi di scioglimento primaverile attraverso teli scuri; queste operazioni possono causare il compattamento e l'alterazione del quantitativo di luce che penetra nella copertura nevosa (Wipf e Rixen, 2010). Una modalità differente prevede di sciogliere la neve utilizzando dei riscaldatori ad infrarossi (Wipf e Rixen, 2010).

## 1.2. La xilogenesi

La formazione del legno o xilogenesi avviene attraverso varie divisioni delle cellule del cambio; le nuove cellule così prodotte si differenziano fino a raggiungere la maturità (Giovannelli et al., 2011; Rossi et al., 2016). La durata della xilogenesi varia in base alla specie, al tasso di crescita individuale e alle condizioni climatiche (Rossi et al., 2016) e, attraverso questo processo di crescita, la vegetazione assorbe l'anidride carbonica dall'atmosfera e la converte in carboidrati strutturali, i quali vengono utilizzati nelle nuove cellule. La xilogenesi permette quindi di sequestrare e accumulare il carbonio per lunghi periodi di tempo negli ecosistemi terrestri (Rossi et al., 2016; Ren et al., 2018; Vieira et al., 2020). In ogni caso, negli ecosistemi temperati e freddi dell'emisfero boreale l'attività fisiologica del cambio è ciclica ed è regolata dalle fasi fenologiche, le quali a loro volta dipendono dalle condizioni climatiche locali (Rossi et al., 2016).

In ambienti freddi la xilogenesi avviene nel periodo compreso tra maggio e agosto con una variabilità in funzione delle condizioni locali. La dinamica dell'accrescimento consiste in una fase di crescita esponenziale seguita da un rallentamento; si può quindi individuare il momento fenologico di inizio e fine della crescita e quello di culminazione del ritmo di accrescimento (Rossi et al., 2007a).

Le specie vegetali adattano la loro fenologia ai cambiamenti climatici per cui, la durata della stagione vegetativa può variare (Vieira et al., 2020). Alle alte latitudini o altitudini, la xilogenesi è controllata dalla temperatura (Rossi et al., 2014, Ren et al., 2018) e se quest'ultima è troppo bassa l'attività cambiale risulta limitata (Li et al., 2016; Ren et al., 2018); con il riscaldamento globale, in primavera, la temperatura necessaria alla ripresa vegetativa potrebbe essere raggiunta più precocemente e, questo potrebbe determinare un allungamento della stagione vegetativa ed un conseguente

incremento degli accrescimenti (Rossi et al., 2014). Per quanto riguarda le conifere al limite del bosco, la temperatura di soglia per la xilogenesi è di circa 6-8°C (Rossi et al., 2007b) mentre, per gli arbusti, la crescita dello xilema inizia a circa 2°C (Li et al., 2016). Un ulteriore fattore ecologico importante per l'insorgenza della xilogenesi negli ambienti aridi e semi aridi è la disponibilità idrica. L'acqua controlla vari processi di crescita della vegetazione, ad esempio la distensione delle cellule xilematiche è legata al turgore il quale dipende sia dall'assorbimento di acqua che dall'accumulo di soluti (Ren et al., 2018). Per quanto riguarda il fotoperiodo, questo influenza la fenologia xilematica sincronizzando il momento di culminazione del ritmo di accrescimento con il periodo con maggiori ore di luce (Rossi et al., 2007a).

Il limite del bosco in quota è probabilmente definito dalla temperatura, infatti, l'isoterma di 6,4 °C di temperatura media dell'aria nel corso della stagione vegetativa corrisponde al limite altitudinale del bosco; se non viene superata questa soglia minima di temperatura la crescita degli alberi e l'attività meristemica non può verificarsi (Li et al., 2016).

### 1.3. Il legno omoxilo

Le conifere rientrano nel gruppo tassonomico delle gimnosperme le quali, ad eccezione delle gnetophyte, non hanno vasi ed il loro legno è costituito principalmente da tracheidi (Myburg et al., 2013); di conseguenza, il legno di conifera è molto omogeneo e, per questo motivo è detto omoxilo. Le tracheidi svolgono sia la funzione di trasporto che quella di sostegno meccanico (Sperry et al., 2006) mentre, il tessuto di riserva è costituito dalle cellule del parenchima, le quali possono essere orientate sia assialmente che radialmente formando i raggi parenchimatici (Stupianek et al., 2021). Il tessuto secretore è invece rappresentato dalle cellule dell'epitelio dei canali resiniferi, i quali non sono presenti in tutte le specie; ad esempio, *Juniperus communis* ne è privo. In ogni caso, i canali resiniferi possono formarsi durante il normale sviluppo oppure, possono svilupparsi a causa di lesioni (Myburg et al., 2013) anche nelle specie che normalmente ne sono prive. La struttura delle tracheidi ha un ruolo centrale nelle proprietà fisiche, chimiche e meccaniche del legno e determina le caratteristiche dei prodotti finali che vengono realizzati; di conseguenza è importante avere una grande comprensione delle caratteristiche strutturali delle cellule del legno e della loro variazione (Brändström, 2001).

Le tracheidi sono cellule morte, cave, lunghe da 0,5 a 11 mm e presentano una parete cellulare lignificata ed ispessita (Myburg et al., 2013) inoltre, le loro estremità sono cieche ed appuntite; la

maggior parte di queste cellule è disposta in direzione assiale ma una ridotta % può avere disposizione radiale.

Ogni tracheide entra in contatto con molti raggi parenchimatici, inoltre, la comunicazione tra tracheidi adiacenti avviene attraverso le punteggiature areolate, delle interruzioni laterali della parete cellulare localizzate solitamente sulla parete radiale delle tracheidi. Le punteggiature areolate variano notevolmente in dimensioni, forma e numero per cui facilitano l'identificazione della specie legnosa. In ogni caso, le punteggiature possono essere semplici o areolate; nelle punteggiature semplici non è presente la parete cellulare secondaria e le fibrille di cellulosa della parete cellulare primaria non sono molto dense (Myburg et al., 2013). Nelle punteggiature areolate la parete secondaria si innalza a formare la camera della punteggiatura, mentre la parete primaria e la lamella mediana vengono modificate per formare il toro e il margo (figura 4) (Myburg et al., 2013).

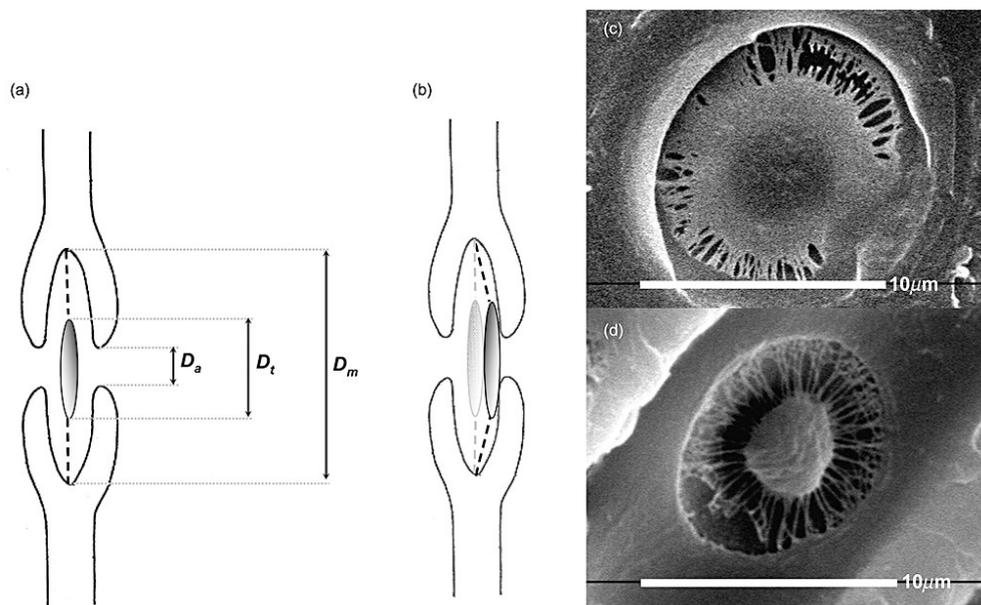
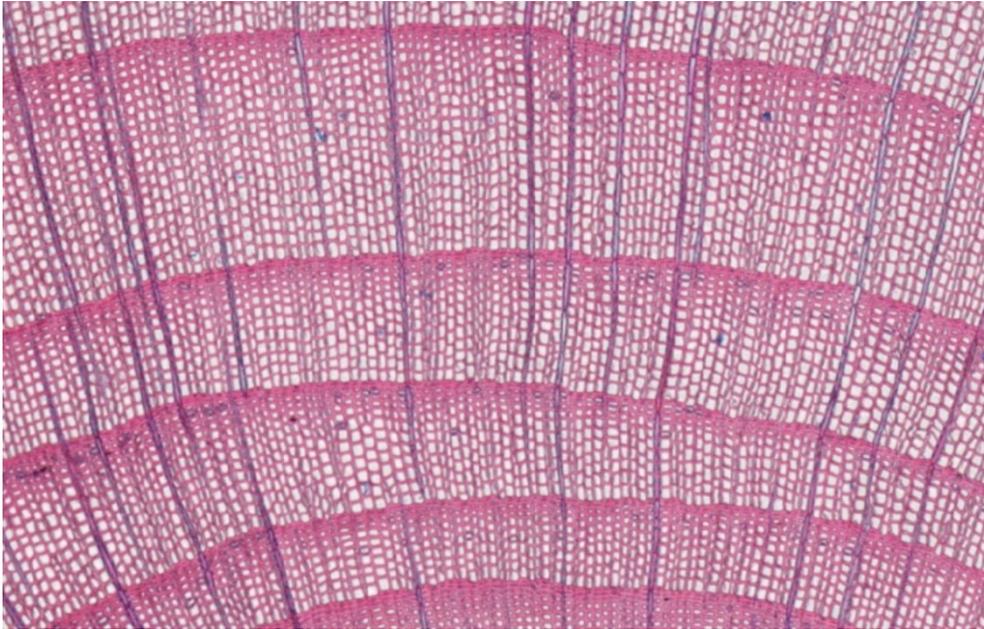


Figura 4. Punteggiature areolate delle conifere (Delzon et al., 2010)

Nel legno primaverile le tracheidi hanno una lunghezza minore ed una parete cellulare più sottile rispetto a quelle del legno tardivo (Myburg et al., 2013); l'insieme di queste caratteristiche fa sì che nel legno primaverile la funzione di trasporto sia più efficiente rispetto al legno tardivo. Le tracheidi del legno tardivo invece hanno pareti cellulari molto più spesse, lumi più piccoli (Myburg et al., 2013) e sono più lunghe per cui sono meno efficienti nella conduzione, ma presentano migliori caratteristiche meccaniche rispetto a quelle del legno primaverile (figura 5). Le pareti cellulari più spesse del legno tardivo appaiono più scure e danno origine ad anelli di crescita facilmente distinguibili. Se alla fine della stagione vegetativa o dopo periodi di siccità si verificano piogge

abbondanti, queste possono indurre un nuovo ciclo di crescita con la conseguente formazione di falsi anelli (Myburg et al., 2013).



*Figura 5. Differenza tra le tracheidi primaverili e tardive del ginepro. Le tracheidi tardive presentano un lume minore ed una parete cellulare più spessa rispetto alle cellule del legno primaverile*

Si deve inoltre considerare che, se una pianta cresce con il fusto inclinato rispetto all'asse verticale, la sua crescita secondaria viene alterata e viene prodotto un legno anormale noto come legno di reazione. La modalità anomala di crescita e la produzione di legno di reazione termina quando il fusto torna a essere orientato verticalmente. Il legno di reazione viene prodotto sia lungo il fusto che nelle branche e, nelle gimnosperme, il legno di reazione si forma nella parte inferiore del fusto, ha un colore rossastro e viene chiamato legno di compressione (figura 6). Le cellule del legno di compressione rispetto a quelle del legno normale contengono una minore quantità di cellulosa ma maggiore di lignina e sono più corte (Westing, 1965) inoltre, hanno un contorno circolare.

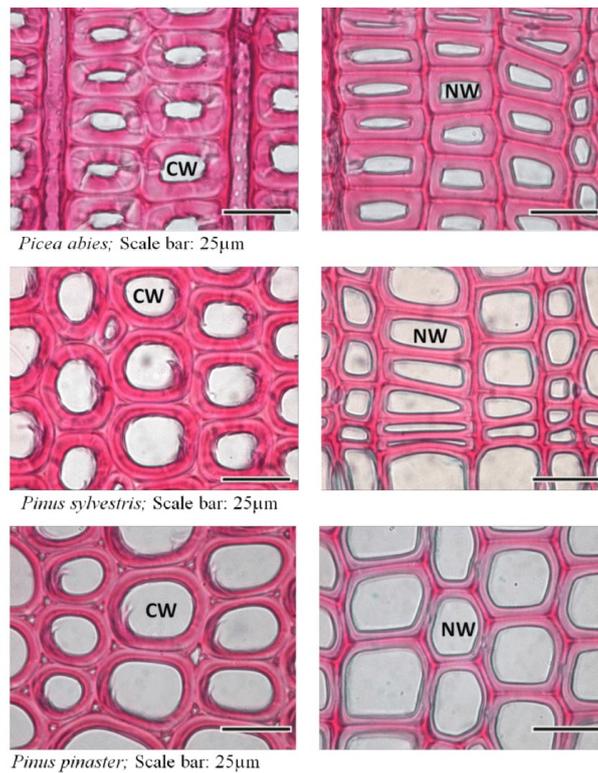


Figura 6. Differenza tra il legno di compressione (a sinistra) e quello normale (a destra) per 3 diverse specie (Thibaut e Gril, 2021)

Il tessuto parenchimatico delle gimnosperme è composto da cellule vive di forma rettangolare o quadrata (Morris et al., 2016) e con parete cellulare lignificata (Myburg et al., 2013). Il parenchima è organizzato in parenchima radiale e parenchima assiale ma spesso, nelle gimnosperme quest'ultimo è assente. Le cellule parenchimatiche comunicano tra loro e con le tracheidi attraverso delle punteggiature semplici; i raggi parenchimatici costituiscono inoltre un ponte di connessione che dallo xilema si estende al floema (Słupianek et al., 2021). All'interno dei raggi parenchimatici possono anche essere presenti delle tracheidi radiali. All'interno del parenchima dell'alburno vengono immagazzinate differenti sostanze come acqua, lipidi e carboidrati non strutturali (NSC) le quali svolgono un ruolo vitale nel funzionamento dell'intera pianta e sono particolarmente importanti per la sopravvivenza dell'albero durante i periodi di stress (Słupianek et al., 2021). Nel durame, invece, il parenchima è costituito da cellule morte che contengono composti duramificanti ed inclusioni inorganiche.

Per quanto riguarda la lunghezza, il diametro del lume cellulare e lo spessore della parete, questi parametri sono strettamente legati alla conduttività idraulica, alla protezione contro la cavitazione e il collasso delle pareti cellulari (Sperry et al., 2006), infatti, le dimensioni delle cellule dipendono da un compromesso tra efficienza di conduzione e sicurezza. Nello specifico, il diametro del lume cellulare influenza l'efficienza di conduzione in quanto, un suo aumento determina un incremento

della conduttività; d'altra parte, l'acqua oltre al lume cellulare deve attraversare anche le pareti cellulari. Di fatto, la conduttività idraulica può aumentare al crescere del diametro delle cellule solo se al contempo aumenta anche il flusso di acqua che può attraversare le pareti cellulari. La lunghezza del condotto è importante in quanto se questa aumenta, l'acqua deve attraversare un minore numero di pareti cellulari (Sperry et al., 2006); questo indirettamente determina un aumento della conduttività attraverso le pareti.

In ogni caso, il rischio di cavitazione aumenta al crescere della larghezza e del diametro delle tracheidi (Pittermann et al., 2006a) per cui, vi sono delle limitazioni alle dimensioni delle cellule legate alle necessità di protezione contro la cavitazione. Nel momento in cui l'acqua all'interno dei condotti xilematici passa dalla fase liquida a quella gassosa, si verifica la cavitazione in quanto la colonna d'acqua si interrompe e, con il cessare della risalita dell'acqua, la pianta può disidratarsi eccessivamente e andare incontro a mortalità (Cochard et al., 2013).

Le cellule xilematiche, oltre a garantire il trasporto dell'acqua e la protezione dalla cavitazione devono evitare anche l'implosione, infatti, la pressione negativa presente nei condotti xilematici attira le pareti cellulari verso l'interno e, se queste ultime non sono spesse e lignificate non resistono allo sforzo (Sperry et al., 2006). Per garantire la resistenza contro l'implosione, lo spessore delle pareti cellulari deve aumentare proporzionalmente al diametro del condotto per cui, se vi sono dei limiti relativi allo spessore della parete, questi condizionano la dimensione dei condotti xilematici. Si deve inoltre considerare che le cellule xilematiche sono cellule morte per cui, lo spessore delle pareti dipende da quanto velocemente e a lungo le pareti stesse possono crescere prima che la cellula muoia per diventare funzionale (Sperry et al., 2006). Di fatto, quando la parete cellulare ha raggiunto il suo spessore massimo, il condotto xilematico può incrementare la sua resistenza contro l'implosione solo restringendo il suo diametro. I vincoli meccanici legati allo spessore della parete cellulare hanno quindi un importante ruolo nel definire il diametro delle tracheidi (Sperry et al., 2006).

L'accrescimento secondario di una pianta legnosa è influenzato dalle sue condizioni fisiologiche, le quali dipendono dalle condizioni ambientali; di conseguenza, l'effetto dei fattori che influenzano l'accrescimento condiziona le caratteristiche anatomiche e la struttura degli anelli legnosi (Fonti et al., 2010). Di fatto, il processo di differenziazione delle cellule xilematiche è controllato geneticamente ma dipende anche dallo stadio ontogenetico dell'albero e dalle condizioni ambientali (Fonti et al., 2010). Durante le diverse fasi ontogenetiche, infatti, le piante aumentano di dimensioni

e, per continuare a crescere e riprodursi, gli alberi devono aggiustare continuamente la propria struttura in modo da mantenere la capacità di procurarsi le risorse dall'ambiente (Carrer et al., 2015).

Come visto in precedenza, le dimensioni delle cellule xilematiche sono direttamente collegate all'architettura idraulica delle piante e, per rispettare dei vincoli idraulici, la dimensione delle cellule (in termini di diametro o area del lume) cambia durante l'ontogenesi (Carrer et al., 2015). Con la crescita in altezza, aumenta il percorso che l'acqua deve compiere per raggiungere la chioma. Se dall'apice alla base il diametro dei condotti venisse mantenuto costante, la resistenza idrodinamica aumenterebbe linearmente con la crescita in altezza e, di conseguenza, aumenterebbe anche il rischio di cavitazione, per cui, per limitare questo rischio, le piante allargano la dimensione delle cellule xilematiche dall'apice alla base del fusto. Di fatto il diametro delle cellule xilematiche negli alberi aumenta con l'età cambiale in funzione del tasso di allungamento del fusto (Carrer et al., 2015). Per quanto riguarda la larghezza dell'anello, questa invece è influenzata da vincoli geometrici e diminuisce al crescere dell'età cambiale poiché la pianta deve formare un nuovo strato legnoso su una superficie ogni anno maggiore (Carrer et al., 2015).

#### 1.4. *Juniperus communis*

*Juniperus communis* è una gimnosperma appartenente alla famiglia delle Cupressaceae. Si presenta sia in forma arbustiva che arborea, infatti, il ginepro comune può raggiungere i 10-12 m di altezza. La corteccia è marrone rossiccia e spesso si sfalda in lunghe strisce. I rami sono disposti in verticilli e crescono lungo tre diverse direzioni per cui, non sono posizionati su un unico piano, come accade per altri generi della famiglia delle Cupressaceae; le gemme sono coperte da squame acuminatae ed hanno una lunghezza di circa 3 mm (Thomas et al., 2007). Le foglie sono aghiformi, pungenti, disposte in verticilli di 3 e lunghe 5-12 mm, inoltre, spesso presentano una ghiandola resinosa abassiale. La faccia superiore degli aghi presenta una singola banda stomatica bianca, a volte divisa da una linea verde verso la base. Le foglie permangono sulla pianta per 3 anni (Thomas et al., 2007). Il ginepro comune è una specie dioica; i coni maschili (strobili) sono lunghi circa 8 mm, isolati, cilindrici e maturano e cadono annualmente, inoltre, presentano 3-6 verticilli di stami; il polline non ha ali. Lo strobilo femminile è ascellare e, inizialmente presenta una lunghezza di circa 2 mm e una colorazione verde mentre, a maturità è globoso, di 5-10 mm o comunque più lungo che largo. Il cono femminile è circondato alla base da 3-16 minuscole brattee squamose che persistono a maturità; tali brattee non diventano dure e legnose ma rimangono carnose, inoltre, si fondono

assieme per formare una bacca che a maturità si presenta di colore nero bluastro (figura 7) (Thomas et al., 2007). I semi sono ovoidali, allungati, con 3 spigoli e con solchi e tasche di resina lungo tutto il seme, inoltre, non sono alati. Ogni cono contiene 1-3 semi, ciascuno lungo 4-5 mm, inglobato nella polpa resinosa e farinosa e trattenuto all'interno del cono durante la dispersione. I coni femminili maturano in 2-3 anni (Thomas et al., 2007) ed hanno svariati utilizzi in ambito alimentare.



Figura 7. Coni di *Juniperus communis* L. ([https://it.wikipedia.org/wiki/Juniperus\\_communis](https://it.wikipedia.org/wiki/Juniperus_communis))

Il ginepro comune è una specie pioniera che può svilupparsi in svariati ambienti e con ampi range termici (Vilčinskas et al., 2016); per tale motivo lo si può trovare fino ad oltre i 2000 m di quota. Le varie sottospecie di ginepro sono inoltre in grado di vegetare su una grande varietà di suoli, sia acidi che calcarei, in differenti condizioni di umidità (Barkman, 1985; Thomas et al., 2007). L'unica condizione necessaria alla sua crescita è che vi sia una buona disponibilità di radiazione solare. L'insieme di questi fattori fa sì che l'areale di *Juniperus communis* sia piuttosto esteso (figura 8), infatti, il ginepro è la specie con l'areale più ampio di tutto l'emisfero boreale, lo si trova dalle medie latitudini fino alle zone più settentrionali dell'emisfero e rappresenta una delle specie legnose più tipiche della tundra ad elevate altitudini e latitudini (Unterholzner et al., 2022).

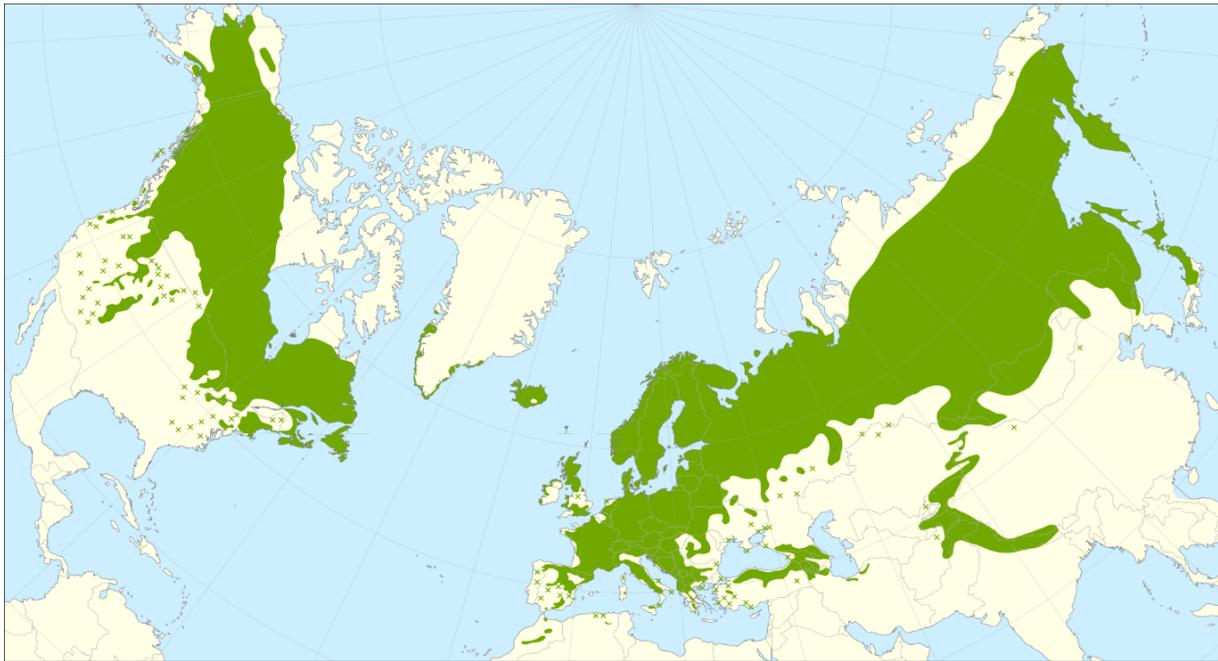


Figura 8. Areale di diffusione di *Juniperus communis* L. (Caudullo et al., 2017)

*Juniperus communis* presenta una areale di distribuzione piuttosto vasto, di conseguenza, i fattori che ne influenzano la crescita variano in funzione dell'area geografica considerata. In ambiente mediterraneo il ginepro presenta 2 picchi di crescita, uno tardo primaverile e l'altro autunnale mentre, in estate si verifica una sospensione della crescita dovuta alla siccità (Tumajer et al., 2021). Nell'Artico la crescita del ginepro è influenzata principalmente dalla temperatura mentre l'umidità del suolo e la siccità hanno un effetto marginale; inoltre, la stagione vegetativa è piuttosto breve ed il picco di crescita è sincronizzato con le temperature massime annuali della zona che si verificano attorno al solstizio d'estate (Tumajer et al., 2021). Per quanto riguarda la catena degli Urali, questi presentano un ampio gradiente climatico latitudinale per cui, in base alla regione considerata, la crescita è limitata da differenti fattori; nelle zone meridionali il fattore limitante risulta essere la siccità estiva mentre, al crescere della latitudine il fattore di controllo più importante diventa la temperatura (Tumajer et al., 2021).

Relativamente all'arco alpino la crescita del ginepro sembra essere maggiormente legata alle precipitazioni che alla temperatura; si tratta di una correlazione negativa soprattutto per quanto riguarda il periodo invernale (ottobre-maggio) durante il quale, in base all'altitudine e alle temperature, le precipitazioni sono in forma solida (Carrer et al., 2019). In generale le precipitazioni nevose hanno un effetto positivo per gli arbusti prostrati in quanto la neve garantisce isolamento termico, protezione dalle condizioni esterne, temperature del suolo più elevate e una maggiore decomposizione e rilascio di nutrienti. Nelle Alpi però le precipitazioni solide sembrano avere un

effetto negativo sulla crescita del ginepro in quanto la copertura nevosa impedisce l'attività fotosintetica e accorcia la durata della stagione vegetativa (Carrer et al., 2019). Si deve considerare che per gli arbusti prostrati è sufficiente una ridotta copertura nevosa per garantire l'isolamento termico e, di conseguenza, vi è una correlazione positiva tra la larghezza degli anelli del ginepro e la temperatura di maggio poiché, un maggio più mite favorisce una fusione precoce della neve e quindi una stagione vegetativa più lunga (Carrer et al., 2019).

Gli attuali cambiamenti climatici inducono delle modificazioni nella vegetazione della tundra che variano nello spazio e nel tempo (Elmendorf et al., 2012) determinando una migrazione verso l'alto ed un'espansione dell'areale degli arbusti (Malfasi e Cannone 2020); risulta quindi importante ricostruire il clima pregresso sia per comprendere come gli ecosistemi potrebbero rispondere agli attuali cambiamenti sia per migliorare i modelli climatici. Una delle varie modalità di ricostruzione del clima del passato si basa sulla dendrocronologia, la quale può essere definita come "lo studio della sequenza cronologica degli anelli di crescita annuale degli alberi" (Ferguson, 1970). La dendrocronologia si basa sul fatto che la crescita delle piante è influenzata dal variare delle condizioni climatiche e dalla possibilità di assegnare ad ogni anello uno specifico anno di calendario. A questo punto diventa possibile individuare una relazione tra i parametri climatici, relativi ad uno specifico anno, e la corrispondente ampiezza anulare; in questo modo può essere effettuata la ricostruzione climatica (Ferguson, 1970). Negli ultimi anni sono state eseguite delle analisi dendrocronologiche utilizzando anche gli arbusti ed in particolare il ginepro (Hantemirov et al., 2011; Shetti et al., 2018); questa specie viene utilizzata perché è longeva. In ogni caso, l'analisi dendrocronologica sul ginepro può risultare complessa in quanto questo presenta spesso anelli irregolari, falsi anelli e anelli mancanti. La dendrocronologia utilizza però le sole ampiezze anulari senza prendere in considerazione le caratteristiche anatomiche le quali consentirebbero di creare delle associazioni clima-crescita a livello sub-mensile, di avere informazioni relative agli eventi estremi (che si verificano su scale temporali brevi), al sequestro del carbonio, all'allometria degli alberi e alle loro prestazioni ecofisiologiche; queste informazioni non sono disponibili attraverso i proxy di larghezza dell'anello (Carrer et al., 2015).

## 1.5. Obiettivi dello studio

L'obiettivo generale del presente studio è quello di valutare le risposte degli arbusti che si sviluppano al di sopra del limite del bosco al variare delle condizioni ambientali. In particolare, si vuole vedere come i fattori climatici e la durata della stagione vegetativa influenzano la crescita e la struttura anatomica di *Juniperus communis*, il quale rappresenta la specie ideale per queste ricerche, in quanto ha un areale molto vasto ed è una specie molto diffusa in alta quota. Si deve inoltre considerare che i ginepri analizzati sono da vari anni oggetto di differenti ricerche; il presente studio consente quindi di incrementare le conoscenze sulle specifiche risposte di questi individui al variare delle condizioni ambientali.

Per raggiungere questi obiettivi è stato effettuato un esperimento di manipolazione della copertura nevosa. La rimozione e l'accumulo di neve sopra diversi individui, ha consentito di modificare (allungando o accorciando) la durata della stagione vegetativa. Per gli individui per i quali la stagione vegetativa è stata allungata, si ipotizza di trovare degli anelli più ampi rispetto alle condizioni normali in quanto, con una stagione vegetativa più lunga, le piante dispongono di più tempo per la fotosintesi e, questo, potrebbe determinare una maggiore crescita. Si deve inoltre considerare che per questi individui l'inizio precoce dell'attività vegetativa avviene in un periodo con temperature ancora basse per cui, le piante sono maggiormente esposte al rischio di gelate tardive; per questi soggetti si può quindi supporre di individuare un maggiore numero di anelli da gelo.

Per quanto riguarda le piante per le quali la stagione vegetativa è stata ridotta, viceversa, si ipotizza che gli anelli abbiano una dimensione minore in quanto il tempo a disposizione per la fotosintesi e l'allocazione del carbonio fissato nei tessuti è minore; in aggiunta, si suppone che per questi soggetti i danni da gelo siano limitati in quanto, il ritardo nell'avvio dell'attività vegetativa li espone ad un minore rischio di gelate tardive.

Relativamente all'ampiezza dei lumi cellulari e allo spessore della parete cellulare, rispetto alla condizione normale, si presuppone che non vi siano delle variazioni dovute alla manipolazione della copertura nevosa. Questi 2 parametri sono tra loro strettamente legati infatti, l'ampiezza del lume cellulare dipende dalla disponibilità idrica (Olano et al., 2012), mentre, lo spessore delle pareti cellulari delle tracheidi è condizionato dalle variazioni nella dimensione delle cellule, infatti, nel corso della stagione, la riduzione del lume cellulare determina l'aumento dello spessore della parete cellulare del legno tardivo (Cuny et al., 2014). Di fatto, un quantitativo costante di materiale delle

pareti cellulari viene collocato su cellule con un lume via via più piccolo e questo determina un aumento dello spessore della parete (Cuny et al., 2014).



## 2. MATERIALI E METODI

### 2.1. Area di studio

L'area di studio è localizzata nelle Dolomiti bellunesi (Alpi orientali italiane), nel Comune di San Vito di Cadore (BL) ad una quota di 2155 m s.l.m. in prossimità del passo Giau (2236 m s.l.m.) (figura 9). Il passo Giau si trova all'interno di una vasta area gestita a pascolo e posizionata tra i monti Nuvolau (2574 m s.l.m.) ed Averau (2647 m s.l.m.) ([https://it.wikipedia.org/wiki/Passo di Giau](https://it.wikipedia.org/wiki/Passo_di_Giau)).

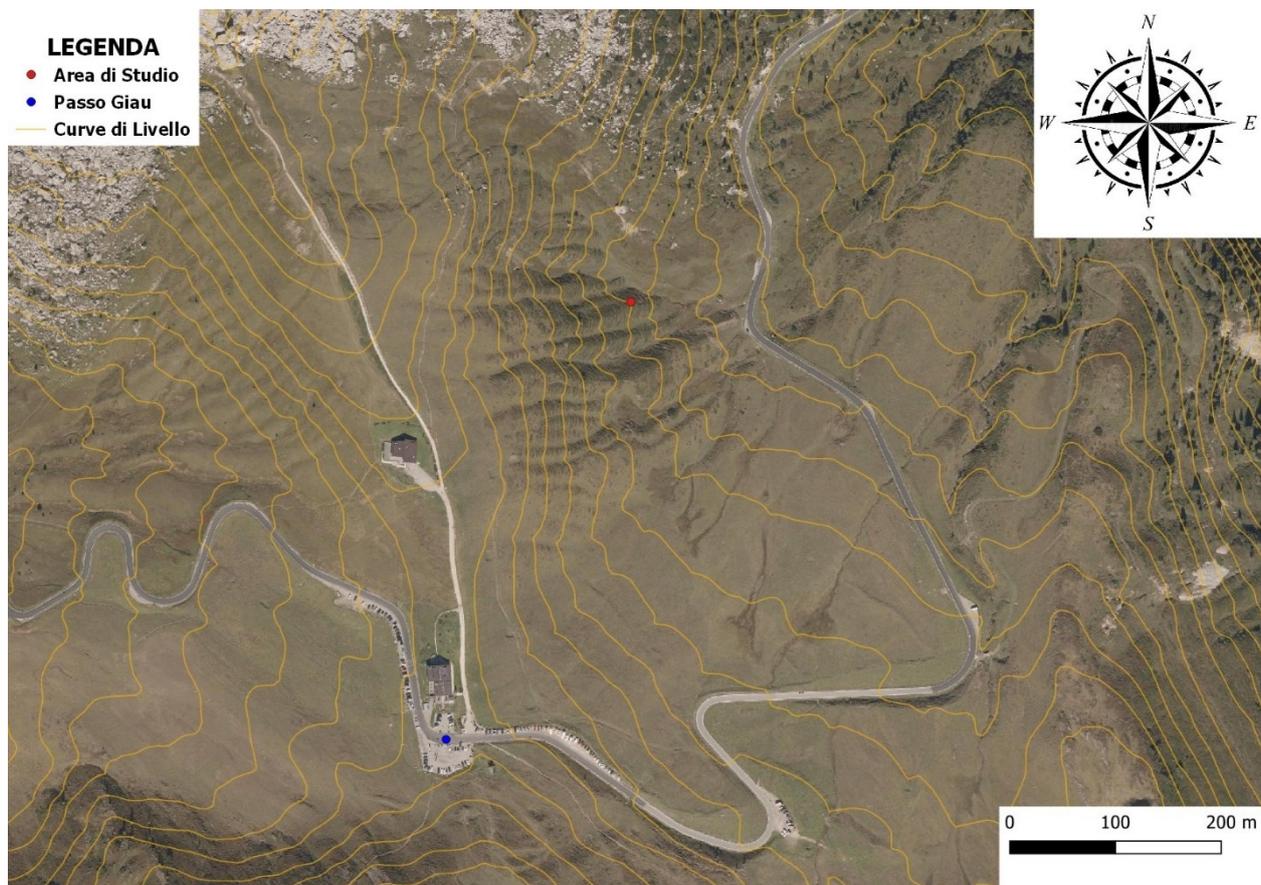


Figura 9. Localizzazione dell'area di studio rispetto al passo Giau (Ortofoto 2021. Geoportale regione Veneto)

Nello specifico, l'area, dove nel 2017 è iniziato l'esperimento di manipolazione della copertura nevosa, si trova alle coordinate  $46^{\circ}29'9''N$ ,  $12^{\circ}3'21''E$  ed è localizzata al di sopra del limite del bosco, su un versante con pendenza media di circa  $20^{\circ}$  ed esposizione Est; la zona presenta un substrato siliceo e suoli a leptosol profondo. Il sito di studio è largo circa 4 m e lungo 30 m ed è stato scelto per l'elevata presenza di individui di *Juniperus communis* che crescono su tumuli privi di neve e coprono quasi completamente l'appezzamento (Unterholzner et al., 2022). L'area sperimentale è inoltre facilmente accessibile poiché si trova lungo la strada S.P. 638 che da Cortina d'Ampezzo porta

al passo Giau; quest'ultimo aspetto è importante in quanto facilita gli interventi di manipolazione della copertura nevosa, le analisi e i campionamenti.

Si deve inoltre considerare che nel periodo tardo primaverile-estivo, attorno al sito sperimentale viene realizzata una recinzione. Questa operazione è necessaria in quanto il sito è localizzato all'interno di un'area a pascolo; in questo modo è possibile proteggere le piante di ginepro dai danni da brucamento e calpestamento causati sia dal bestiame allevato, presente in alpeggio, che dalla fauna selvatica. Il recinto viene rimosso in autunno e al suo posto vengono posizionati dei tondini metallici che in inverno consentono di individuare le piante al di sotto della coltre nevosa (figura 10). Con questa modalità, sul finire dei mesi invernali diventa più semplice effettuare le attività di spostamento neve. Nel sito sperimentale è inoltre presente una stazione meteorologica per il controllo dei parametri climatici.



Figura 10. SINISTRA: recinto temporaneo realizzato per proteggere il sito sperimentale dal pascolamento. DESTRA: tondini metallici utilizzati per individuare l'area di studio durante i mesi invernali

## 2.2. Disegno sperimentale e precedenti analisi

L'esperimento di manipolazione della copertura nevosa è stato allestito ad inizio dell'autunno del 2017; sono stati scelti 15 individui di ginepro, i quali sono stati suddivisi in 3 gruppi ognuno costituito da 5 piante. Ad ogni campione è stato assegnato un codice identificativo alfanumerico. Ciascun gruppo è stato trattato con modalità differenti dagli altri:

- **Trattamento di tipo C (coperto):** si prolunga artificialmente la durata della copertura nevosa in modo da mantenere le piante al di sotto della neve il più a lungo possibile. Per fare questo, si accumula al di sopra delle piante facenti parte del gruppo la neve raccolta dalle zone limitrofe e li si ricopre con teli termici isolanti e riflettenti in modo da ritardare lo scioglimento (figura 11).

- Trattamento di tipo N (neutro): si tratta del gruppo di piante utilizzate come controllo. La copertura nevosa non viene manipolata ed è lasciata alla libera evoluzione, di conseguenza, la neve si scioglie seguendo i regimi termici e di precipitazione.
- Trattamento di tipo S (scoperte): si riduce artificialmente la durata della copertura nevosa rimuovendo manualmente la neve al di sopra delle piante; questa operazione viene effettuata ad inizio primavera (figura 11) (Unterholzner et al., 2022; Zava, 2021).

Nella primavera del 2018 è stata eseguita la prima manipolazione della copertura nevosa e, negli anni, la modalità di esecuzione dei trattamenti è rimasta invariata; in totale la sperimentazione prosegue da 6 anni. In ogni caso, il giorno nel quale i campioni di tipo S vengono scoperti cambia annualmente in funzione delle condizioni meteorologiche e dell'altezza della copertura nevosa; quest'ultima informazione viene ricavata attraverso costanti sopralluoghi e utilizzando la webcam installata all'interno dell'area di studio (Unterholzner et al., 2022).



Figura 11. SINISTRA: rimozione della copertura nevosa presente al di sopra degli individui a trattamento di tipo S. DESTRA: copertura degli individui a trattamento di tipo C

Dal 2018 sono state effettuate misurazioni al fine di valutare le differenze nella fenologia e negli accrescimenti primari degli individui sottoposti ai 3 diversi trattamenti. Per raggiungere questi obiettivi, per prima cosa sono stati misurati gli allungamenti di alcuni dei nuovi germogli di *Juniperus communis* dall'inizio alla fine della stagione vegetativa; su ogni ramo e germoglio misurato è stata apposta una fascetta di plastica e gli è stato assegnato un codice identificativo, in questo modo è stato possibile seguirne la crescita nel corso degli anni. Al fine di incrementare la numerosità campionaria, nel corso dei primi 3 anni, il numero di getti misurati per ciascuna delle 15 piante è stato incrementato (Unterholzner et al., 2022; Zava, 2021); inoltre, ogni anno è stato registrato

anche lo sviluppo degli sporofilli maschili e femminili (Zava, 2021). Per quanto riguarda i tratti fogliari, sono stati analizzati i parametri di densità stomatica, area fogliare e peso secco (Unterholzner et al., 2022).

### 2.3. Dati climatici

Nell'area di studio è stata installata una stazione meteorologica che rileva le temperature dell'aria e l'umidità del suolo (figura 12); inoltre, per ciascuno dei 3 trattamenti è stato scelto un individuo per il quale viene misurata anche la temperatura del fusto e quella del suolo alla profondità di 10 cm. Le temperature vengono misurate ad intervalli di 15 minuti e, ad ogni misurazione, la stazione memorizza 2 valori (Zava, 2021). All'interno dell'area è inoltre presente una webcam che permette di monitorare a distanza la zona; questo consente di limitare i sopralluoghi in campo.



*Figura 12. Stazione meteorologica realizzata all'interno del sito sperimentale*

Nel sito sperimentale le misurazioni di temperatura e umidità del suolo proseguono continuamente dal settembre 2017 con alcune interruzioni nella serie di dati dovute a malfunzionamenti (Zava, 2021). In ogni caso, la temperatura media giornaliera dell'aria più elevata è stata registrata il 27 giugno 2019 ed è di 20.67 °C, mentre, quella più bassa è stata misurata il 27 febbraio 2018 ed è di -19.68 °C. La figura 13 permette di confrontare i trend annuali di temperatura media giornaliera dell'aria con il trend medio relativo al periodo compreso dal 2018 al 2023; in particolare i trend del 2018 e del 2020, durante l'estate sono leggermente minori rispetto

all'andamento medio e, la stessa cosa si verifica per il trend del 2019 nel periodo da maggio a giugno mentre, il trend del 2021 è simile a quello medio. Il trend del 2022 è invece superiore al trend medio per tutto il periodo primaverile ed estivo e, la stessa cosa si verifica per il trend del 2023 durante la fine dell'estate e l'autunno.

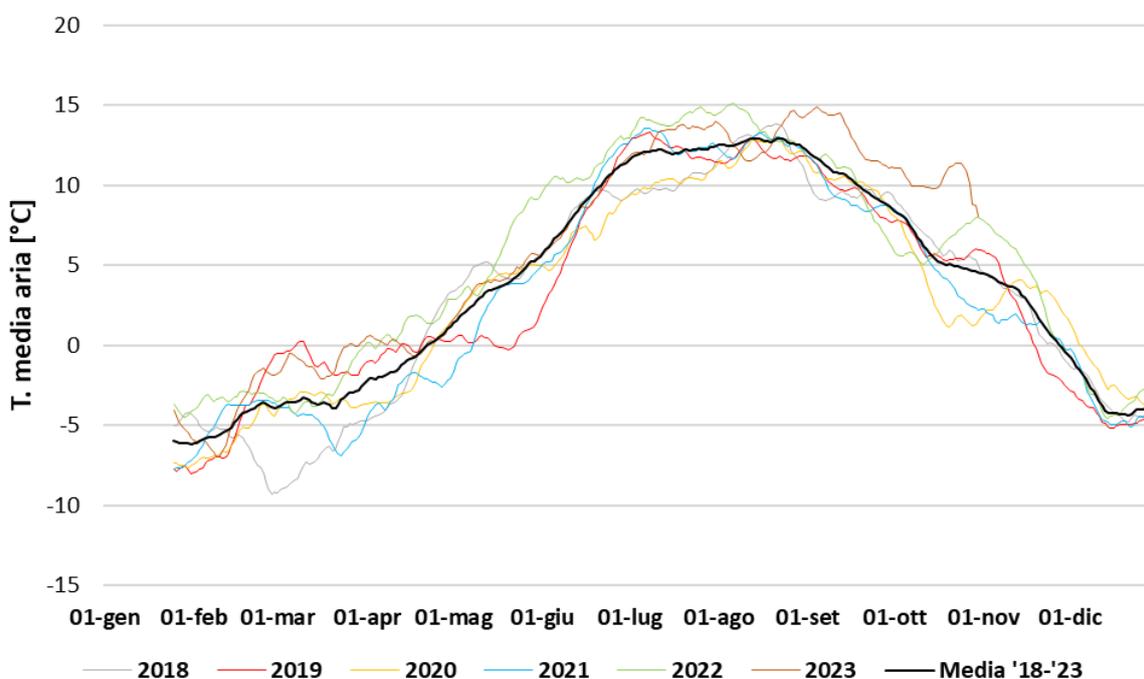


Figura 13. Trend delle temperature medie relative al periodo 2018-2023

Per quanto riguarda le precipitazioni, nel sito sperimentale non è presente alcun strumento per la misura di questo parametro per cui, si utilizzano i dati ricavati dalla stazione meteorologica ARPAV presente sul vicino passo Falzarego (2117 m slm) ([https://it.wikipedia.org/wiki/Passo di Falzarego](https://it.wikipedia.org/wiki/Passo_di_Falzarego)); i dati ARPAV hanno una risoluzione giornaliera. La figura 14 consente di confrontare le precipitazioni cumulate di ogni anno compreso tra il 2015 e il 2023 con la precipitazione cumulata media del periodo 1992-2022. Si può notare che per il 2015, il 2019 e il 2021 le precipitazioni sono in linea con la media, ad eccezione degli ultimi mesi dell'anno per i quali, il 2015 e il 2021 presentano una precipitazione cumulata al di sotto della media mentre, il 2019 al di sopra; anche il 2023 sembra essere in linea con la media. Per quanto riguarda il 2016 e il 2018 la precipitazione cumulata è al di sopra della media anche se, durante il periodo finale dell'anno la precipitazione del 2016 si avvicina alla media. Il 2017 e il 2022 presentano invece una precipitazione cumulata minore della media; infine, per il 2020 fino a fine estate, la precipitazione cumulata è minore della media, poi superiore. In ogni caso, l'anno più siccitoso è stato il 2022 (991 mm) mentre il più piovoso è stato il 2020 (1576.8 mm); la precipitazione cumulata media del periodo 1992-2022 è di 1262.05 mm.

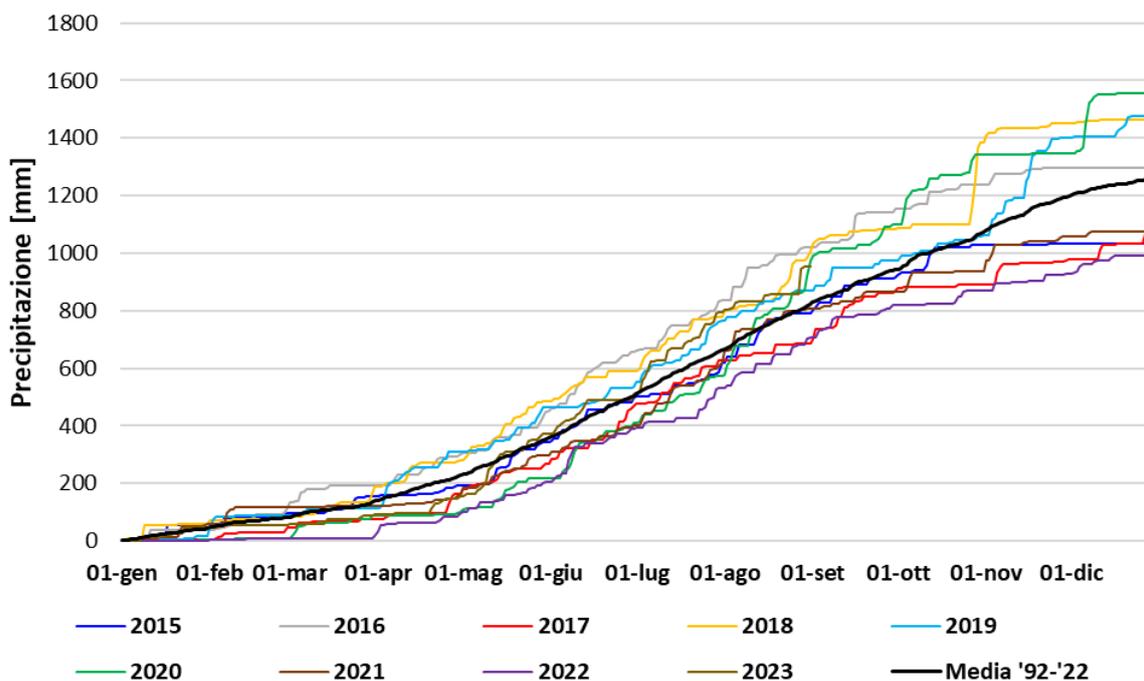


Figura 14. Precipitazione cumulata [mm] relativa ai singoli anni del periodo 2015-2023 e precipitazione media cumulata [mm] del periodo 1992-2022

## 2.4. Attività di campionamento e preparazione campioni

Il 23 ottobre 2023 sono stati raccolti 2 rami da ciascuna delle 15 piante di ginepro. I campioni prelevati sono stati selezionati casualmente; nella scelta sono stati evitati i fusti analizzati nelle precedenti sperimentazioni in quanto, per questi ultimi, annualmente viene ancora effettuata la registrazione degli accrescimenti. Nel complesso sono stati raccolti 30 campioni e, a ciascuno dei fusti tagliati è stato assegnato un codice identificativo che consente di risalire facilmente alla pianta di origine e al trattamento alla quale questa è soggetta. Al momento del prelievo, inoltre, su ciascun fusto è stata effettuata un'analisi visiva per verificare che il numero di anelli annuali fosse superiore ai 6 anni di trattamento. I campioni sono poi stati portati al Centro Studi per l'Ambiente Alpino di San Vito di Cadore per le successive manipolazioni.

Per analizzare le caratteristiche anatomiche dello xilema del ginepro sono stati preparati dei vetrini contenenti ciascuno le sezioni trasversali circolari di ciascuno dei 30 fusti raccolti nel sito sperimentale. Si è cercato di ricavare ogni sezione trasversale alla distanza di 30 cm dall'apice del fusto, questo, al fine di standardizzare i trend allometrici. Da ciascun fusto a 30 cm dall'apice è stato quindi tagliato un pezzo di circa 2 cm e, i campioni così ottenuti sono stati immersi in acqua per agevolare il successivo taglio. Le sezioni trasversali circolari sono state ottenute utilizzando un microtomo rotativo e, per ogni campione sono state ricavate varie sezioni di 12  $\mu$ m di spessore.

Alcuni campioni alla distanza di 30 cm dall'apice presentavano sezioni trasversali con un numero limitato di anelli per cui, per questi, le sezioni sono state tagliate a distanze superiori in maniera tale da includere almeno 8-9 anelli. Con questa modalità, ogni campione presenta 6 anelli relativi al periodo di manipolazione della copertura nevosa e, almeno 2-3 anelli relativi al periodo precedente; questo permette di ottenere sia dati relativi al periodo pretrattamento (anelli fino al 2017) che dati riguardanti il periodo di trattamento (anelli dal 2018 al 2023).

Le sezioni trasversali sono state tagliate perpendicolarmente alla direzione assiale delle cellule in modo da evitare sovrastime e sottostime dei parametri anatomici analizzati mentre, per evitare danni alle strutture anatomiche sono state utilizzate lame di alta qualità (Feather N35, Feather Safety Razor Co., Ltd., Osaka, Japan). Si deve infatti considerare che gli errori nella misurazione dovuti ad un taglio non perpendicolare aumentano al crescere dello spessore della sezione e che lo spessore ottimale è compreso tra 10 e 15  $\mu\text{m}$  (Von Arx et al., 2016).

A seguito del collocamento delle sezioni sui vetrini, per rimuovere i residui del taglio è stato eseguito un risciacquo con acqua distillata e, a questo punto, le sezioni sono state colorate utilizzando una soluzione di Safranina al 1% ed astrablù 0.6%, le quali colorano rispettivamente di rosso i tessuti lignificati e di blu quelli non lignificati. La soluzione colorante è stata lasciata agire su ciascun vetrino per 5 minuti e, dopo questo tempo è stato eseguito un lavaggio in 3 fasi: ogni vetrino è stato risciacquato prima con acqua distillata, poi con una soluzione di etanolo al 50% ed infine con etanolo al 100%. In questo modo è stato possibile eliminare il colorante in eccesso presente all'interno delle cellule. A seguito di questo procedimento, su ciascun vetrino sono state rilasciate poche gocce di Euparal, un reagente che consente di creare dei vetrini permanenti bloccando le sezioni tra il vetrino ed il copri vetrino.

A questo punto ciascun vetrino è stato siglato con il corrispondente codice alfanumerico del fusto di provenienza delle sezioni trasversali. I 30 vetrini sono stati collocati tra 2 fogli di PVC per poi essere posizionati su una piastra metallica al di sotto di un magnete; questa operazione consente di mantenere le sezioni su una superficie piana e, durante l'asciugatura, di far fuoriuscire le eventuali bolle d'aria presenti tra vetrino e copri vetrino. In questo modo si evita la deformazione delle sezioni e le conseguenti difficoltà di messa a fuoco uniforme durante le successive fasi di acquisizione delle immagini. I vetrini infine sono stati collocati in forno poiché l'Euparal richiede l'essiccazione a 60° C per 12 ore. Questa procedura consente quindi di realizzare dei vetrini permanenti che rispetto a quelli non permanenti possono essere conservati ed utilizzati più volte (Von Arx et al., 2016).

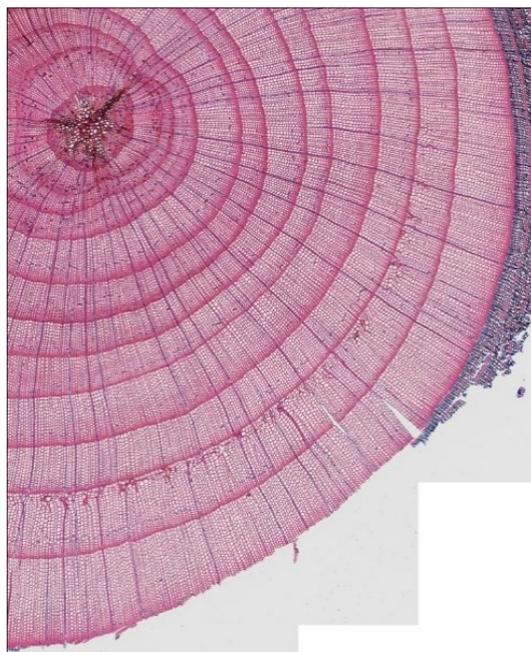
## 2.5. Acquisizione ed elaborazione delle immagini

La migliore tra le sezioni presenti è stata scansata con Axio Scan Z1 (Zeiss, Germany) (figura 15). Lo scanner restituisce le immagini nel formato .czi e, attraverso l'uso del software ZEISS ZEN versione 3.9, tali immagini sono state convertite in formato .jpg in modo da poterle elaborare con specifici software di analisi.



*Figura 15. Sezione trasversale del campione 5N1*

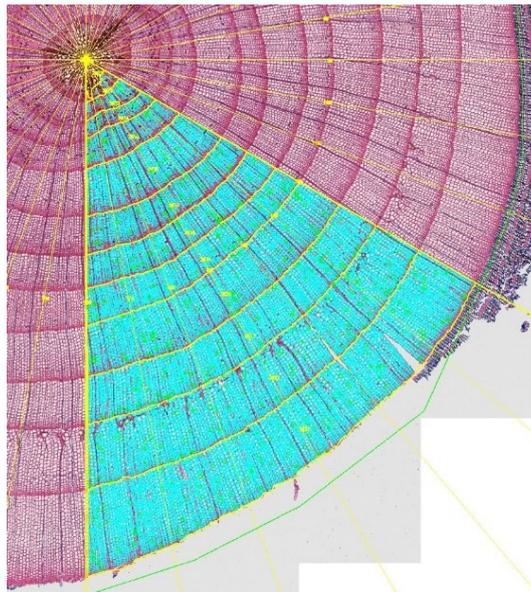
Le immagini dei 30 campioni sono state editate con Irfanview 64, software con il quale è stato possibile ritagliare le scansioni di ciascuna sezione circolare e ottenere nuove immagini relative ad una porzione di 90° di ampiezza rispetto a quelle circolari di partenza (figura 16).



*Figura 16. Porzione della sezione trasversale del campione 5N1 utilizzata per le analisi eseguite con ROXAS v3.58*

Le immagini così ottenute sono state analizzate con un software di analisi d'immagine; vi sono vari software che consentono di effettuare un'analisi automatizzata delle immagini allo scopo di ottenere in modo oggettivo e riproducibile i vari parametri anatomici (Von Arx et al., 2016). In questo studio è stato utilizzato ROXAS v3.58, un software in grado di fornire misure di caratteristiche anatomiche dello xilema sia a livello di singola cellula che mediate per singolo anello e intero campione.

Una volta caricata l'immagine da analizzare, si seleziona la configurazione e successivamente si effettua la calibrazione definendo la risoluzione in [pixel/ $\mu\text{m}$ ] e il centro di ciascuna delle immagini da analizzare. La risoluzione delle immagini analizzate è 2.890173 [pixel/ $\mu\text{m}$ ]. Nel presente studio, per ciascuna immagine, la configurazione ha previsto di analizzare una sezione di 60° di ampiezza (figura 17). È stata definita manualmente l'area di interesse (AOI), ossia la porzione di immagine da analizzare, e l'area da escludere (AOE) che nelle elaborazioni effettuate corrisponde al midollo centrale.



*Figura 17. Porzione dell'immagine della sezione trasversale del campione 5N1 effettivamente analizzata con ROXAS v3.58*

L'analisi automatica effettuata con ROXAS è stata implementata da modifiche manuali quali l'aggiunta del margine di delimitazione degli anelli e l'eliminazione di eventuali cellule erroneamente riconosciute. Sono stati quindi calcolati gli output che includono i valori dei vari parametri anatomici quantificati.

I parametri anatomici analizzati nel presente studio sono i seguenti:

- Larghezza media dell'anello (MRW) [ $\mu\text{m}$ ]
- Numero di cellule (CNo) [ $n^\circ$ ]
- Densità cellulare (CD) [ $n^\circ/\text{mm}^2$ ]
- Area cumulata di tutte le cellule conteggiate (CTA) [ $\text{mm}^2$ ]
- Area media del lume cellulare (MLA) [ $\mu\text{m}^2$ ]
- Diametro idraulico medio (Dh) [ $\mu\text{m}$ ];  $Dh = \Sigma(D. \text{idraulico cellula})^5 / \Sigma(D. \text{idraulico cellula})^4$
- Conduttività idraulica teorica (Kh) [ $\text{m}^4/(\text{s} \cdot \text{MPa})$ ]
- Conduttività idraulica teorica specifica dello xilema per anello annuale (Ks) [ $\text{m}^2/(\text{s} \cdot \text{MPa})$ ]
- Spessore medio delle pareti cellulari tangenziali (CWTtan) [ $\mu\text{m}$ ]
- Spessore medio delle pareti cellulari radiali (CWTrad) [ $\mu\text{m}$ ]
- Spessore medio di tutte le pareti cellulari (CWTall) [ $\mu\text{m}$ ]
- Area media delle pareti cellulari (CWA) [ $\mu\text{m}^2$ ]

## 2.6. Dati qualitativi

Dopo aver eseguito la scansione dei vari campioni è stata effettuata un'analisi qualitativa relativa agli anelli da gelo. Nello specifico, per ogni campione sono stati individuati gli anni nel quale l'anello presenta danni da gelo; si è inoltre considerato se il danno interessa il legno primaverile (Early wood) o quello tardivo (Late wood) in modo da comprendere se la lesione è dovuta rispettivamente ad una gelata tardiva o precoce. Per quanto riguarda l'intensità del danno, si è valutato se la lesione interessa l'intera circonferenza, la quasi totalità oppure solo una porzione limitata o parziale della circonferenza anulare (figura 18).



Figura 18. Porzione della sezione trasversale del campione 1C2 con danni da gelo

Per quanto riguarda le immagini analizzate con ROXAS, all'interno della sezione di  $60^\circ$  sono stati individuati gli anelli nei quali è presente del legno di compressione.

## 2.7. Analisi statistiche

Le caratteristiche dell'anello presentano delle variazioni nei parametri anatomici di larghezza, struttura, composizione chimica e dimensione dei condotti xilematici legate sia alle condizioni ambientali che alle fasi ontogenetiche (Carrer et al., 2015). Attraverso un'operazione di standardizzazione è possibile da un lato rimuovere i trend dovuti alle dimensioni, alla fisiologia, alla fase di crescita ed alle condizioni ambientali (Mantovani, 2023) e, dall'altro, omogeneizzare il tasso di crescita tra i campioni, infatti, in uno stesso sito alcuni individui crescono più velocemente di altri (Carrer et al., 2015). La standardizzazione rende quindi confrontabili i dati relativi ai vari campioni prelevati da piante sottoposte ad un diverso trattamento; in questo modo per ciascuno dei parametri anatomici considerati è possibile valutare se vi siano delle differenze dovute alla tipologia di trattamento.

L'operazione di standardizzazione è stata eseguita determinando per ogni dato grezzo relativo ai singoli anelli di ogni campione il corrispondente Z-score, il quale è stato calcolato applicando la seguente equazione:

$$\text{Z-score} = \frac{X - \mu}{\sigma}$$

Dove **X** rappresenta il singolo valore relativo ad uno specifico anello di ogni campione, mentre, **μ** e **σ** sono rispettivamente la media e la deviazione standard di tutti i valori relativi ad un determinato campione. Per ogni parametro anatomico, la standardizzazione è stata eseguita su tutti i campioni.

L'analisi quantitativa dei parametri anatomici ha permesso di ottenere per ogni parametro anatomico 30 serie temporali, ognuna relativa ad un singolo campione. A seguito della standardizzazione, per ogni parametro, le serie relative ai campioni prelevati dalle stesse piante sono state mediate in maniera tale da ottenere 15 serie temporali standardizzate, ciascuna relativa ad uno specifico individuo. Le serie temporali standardizzate relative ad ogni gruppo di 5 piante sottoposte allo stesso tipo di trattamento sono poi state mediate. In questo modo, per ogni parametro anatomico sono state ricavate 3 serie temporali medie relative ai singoli trattamenti. Nelle analisi sono poi state utilizzate le serie temporali relative agli anelli dal 2015 al 2023 al fine di avere per ogni pianta e modalità di trattamento delle serie di uguale lunghezza.

I dati standardizzati sono stati utilizzati per calcolare l'indice di correlazione lineare di Pearson (**r**) il quale permette di valutare se vi sono delle correlazioni tra i vari parametri anatomici analizzati.

L'indice di Pearson può variare tra -1 e 1 e consente di valutare se tra 2 variabili è presente una relazione lineare. Se il valore dell'indice  $r$  è pari a -1, tra le 2 variabili vi è una perfetta relazione lineare negativa mentre, se l'indice  $r$  è uguale ad 1, tra le 2 variabili vi è una perfetta relazione lineare positiva; qualora l'indice  $r$  assuma un valore pari a 0, le 2 variabili sono tra loro indipendenti. Le soglie di significatività sono state definite attraverso i valori critici dell'indice di Pearson.

Per ogni possibile coppia dei parametri anatomici considerati l'indice di Pearson ( $r$ ) è stato calcolato utilizzando i dati standardizzati di tutti e 30 i campioni. Nello specifico sono stati utilizzati i dati degli anelli compresi tra il 2015 e il 2023. La correlazione tra ogni coppia di parametri anatomici è stata valutata utilizzando 269 coppie di valori, 90 relative ai campioni appartenenti al gruppo C, 90 relative ai campioni del gruppo N e 89 relative ai campioni del gruppo S in quanto il campione 1S2 presenta 8 anelli.

Per valutare se tra le serie temporali standardizzate relative ai 3 trattamenti vi sono delle differenze è stato utilizzato un test  $t$  di Student a 2 code a varianza dissimile; le differenze sono significative quando il risultato del test ( $p$ -value) è minore di 0.05. Si è inoltre considerato un ulteriore livello di significatività relativo a quelle differenze tra i trattamenti per le quali il risultato del test  $t$  ( $p$ -value) è minore di 0.1. Per ogni parametro anatomico, utilizzando i dati standardizzati, il test  $t$  di Student è stato calcolato per tutti gli anelli tra il 2015 e il 2023.

### 3. RISULTATI

#### 3.1. Danni da gelo

L'analisi qualitativa degli anelli con danni da gelo ha interessato gli ultimi 6 anelli di ciascun campione in quanto la prima manipolazione della copertura nevosa è stata effettuata nel 2018 (tabella 1).

Tabella 1. Campioni che presentano danni da gelo per gli anelli dal 2018 al 2023

Campione	Anello da gelo	Posizione	Intensità del danno
<b>TRATTAMENTO COPERTO C</b>			
<b>1C2</b>	2019	Late_Wood	Localizzato
	2020	Late_Wood	Localizzato
	2021	Early_Wood	Parziale
	2023	Early_Wood	Localizzato
<b>2C2</b>	2021	Late_Wood	Localizzato
<b>3C1</b>	2018	Early_Wood	Localizzato
<b>4C1</b>	2018	Early_Wood	Localizzato
<b>5C1</b>	2022	Early_Wood	Parziale
<b>5C2</b>	2019	Late_Wood	Parziale
<b>TRATTAMENTO NEUTRO N</b>			
<b>1N1</b>	2019	Early_Wood	Localizzato
	2022	Early_Wood	Parziale
<b>1N2</b>	2022	Early_Wood	Parziale
<b>2N1</b>	2018	Early_Wood	Localizzato
	2021	Late_Wood	Localizzato
	2022	Early_Wood	Intero
<b>2N2</b>	2022	Early_Wood	Quasi totale
<b>4N1</b>	2022	Early_Wood	Parziale
<b>4N2</b>	2022	Early_Wood	Quasi totale
<b>5N1</b>	2022	Early_Wood	Quasi totale
<b>5N2</b>	2019	Early_Wood	Localizzato
	2021	Early_Wood	Localizzato
<b>TRATTAMENTO SCOPERTO S</b>			
<b>1S1</b>	2018	Early_Wood	Parziale
	2022	Early_Wood	Quasi totale
<b>1S2</b>	2022	Early_Wood	Parziale
<b>2S1</b>	2022	Early_Wood	Quasi totale
<b>2S2</b>	2022	Early_Wood	Parziale
<b>3S1</b>	2022	Early_Wood	Localizzato
<b>3S2</b>	2018	Early_Wood	Localizzato
	2019	Early_Wood	Localizzato
	2022	Early_Wood	Quasi totale
<b>4S1</b>	2022	Early_Wood	Parziale
<b>5S1</b>	2020	Early_Wood	Localizzato

Utilizzando i risultati riportati in tabella 1, è stata valutata la frequenza annuale dei danni causati dalle gelate tardive. Nel 2022, dei 10 campioni prelevati dalle piante per le quali la stagione vegetativa è stata allungata (S), 7 presentano anelli da gelo e, la stessa cosa si è verificata per i 10 campioni relativi alle piante di controllo (N). Per quanto riguarda i 10 campioni prelevati dagli individui per i quali la stagione vegetativa è stata accorciata (C), solamente 1 campione presenta lesioni da gelo (figura 19).

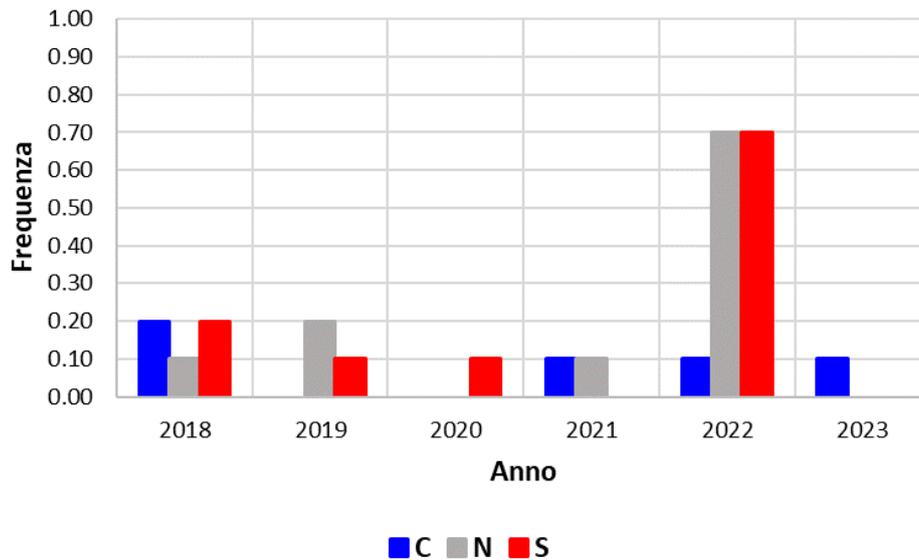


Figura 19. Frequenza degli anelli da gelo dovuti a gelate tardive per le 3 tipologie di trattamento

### 3.2. Effetto del trattamento sulla struttura anatomica dello xilema

A seguito della standardizzazione, il range di variazione dell'indice del parametro considerato (Z-) (figura 20) è simile tra i 3 gruppi di piante e, questo facilita i confronti tra i trattamenti.

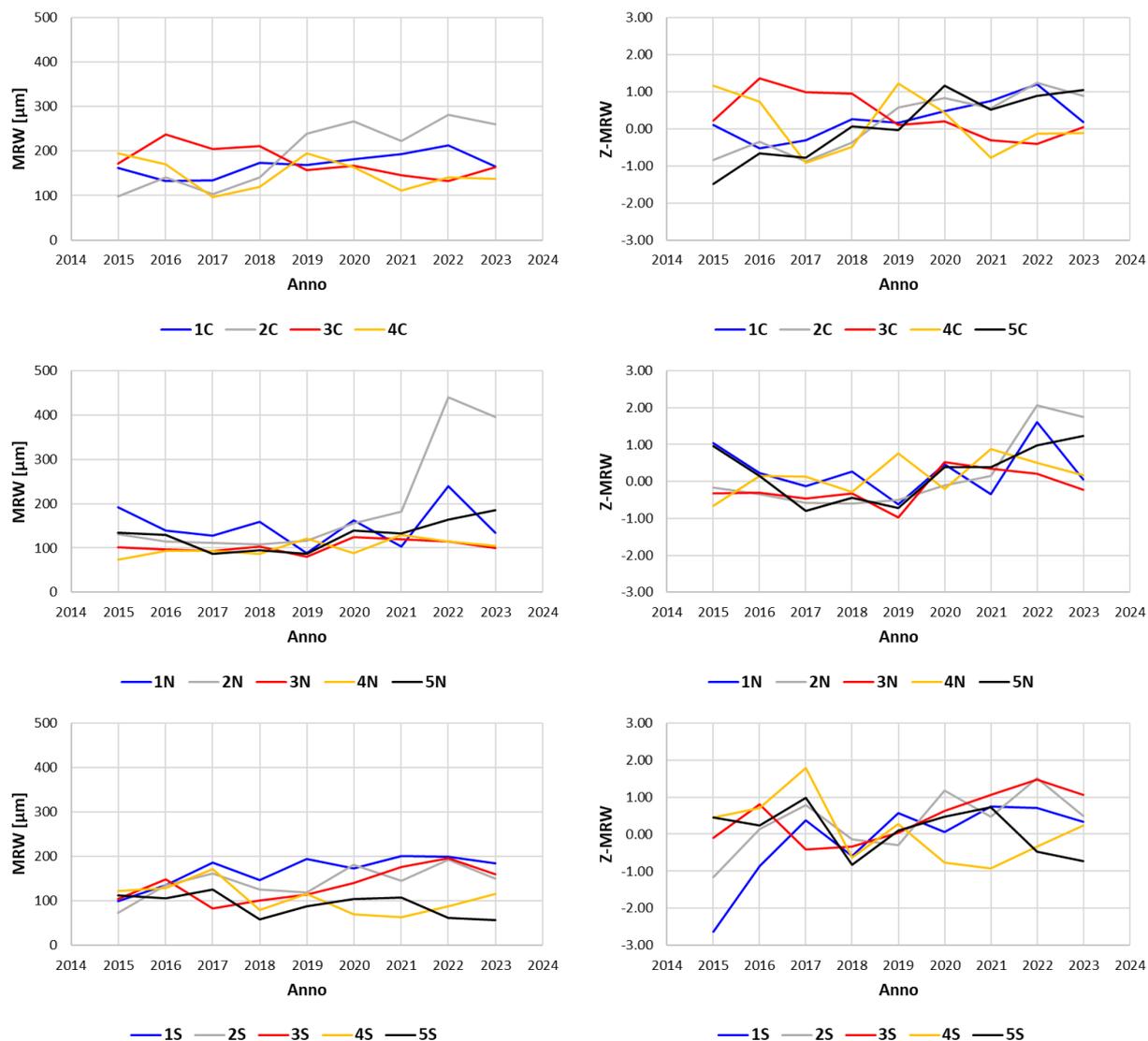


Figura 20. Confronto tra le serie temporali della larghezza media dell'anello (MRW) (sinistra) e le serie temporali dell'indice di larghezza medio dell'anello (Z-MRW) (destra). Il confronto viene effettuato per ciascuna modalità di trattamento: dall'alto verso il basso Coperto (C), Neutro (N), Scoperto (S)

In questo studio sono stati analizzati 12 parametri anatomici ed alcuni tra questi sono risultati altamente correlati (tabella 2). Sono stati selezionati la larghezza media dell'anello (MRW), la conduttività idraulica teorica specifica dello xilema per anello annuale (Ks) e l'area media delle pareti cellulari (CWA) come proxy per accrescimento secondario, trasporto idraulico, supporto meccanico ed accumulo di carbonio. I risultati relativi alle altre variabili analizzate sono inclusi nei materiali supplementari (figure S1-S4) e mostrano andamenti simili ai parametri di seguito descritti.

Tabella 2. Coefficiente di correlazione  $r$  di Pearson relativo ad ogni coppia di parametri anatomici analizzati. In grassetto sono riportate le coppie di parametri per le quali la correlazione è significativa. L'indice  $r$  è stato calcolato utilizzando i dati standardizzati dei 30 campioni e, per ogni campione sono stati usati i dati relativi agli anelli compresi tra il 2015 e il 2023

	Z-MRW	Z-CNo	Z-CD	Z-CTA	Z-MLA	Z-Dh	Z-Kh	Z-Ks	Z-CWTtan	Z-CWTrad	Z-CWTall	Z-CWA
Z-MRW	1											
Z-CNo	0.716	1										
Z-CD	-0.212	-0.157	1									
Z-CTA	0.659	0.965	-0.211	1								
Z-MLA	0.436	0.625	-0.317	0.730	1							
Z-Dh	0.455	0.614	-0.287	0.677	0.929	1						
Z-Kh	0.622	0.925	-0.250	0.979	0.777	0.708	1					
Z-Ks	0.399	0.630	-0.196	0.735	0.964	0.915	0.782	1				
Z-CWTtan	0.403	0.182	-0.245	0.096	-0.151	-0.047	0.055	-0.217	1			
Z-CWTrad	0.223	-0.026	-0.187	-0.121	-0.401	-0.298	-0.159	-0.481	0.826	1		
Z-CWTall	0.315	0.076	-0.207	-0.014	-0.285	-0.180	-0.054	-0.360	0.948	0.946	1	
Z-CWA	0.578	0.453	-0.529	0.439	0.396	0.443	0.428	0.291	0.664	0.506	0.595	1

All'interno di ciascun gruppo di individui, tra le varie piante, l'indice di larghezza medio dell'anello (Z-MRW) presenta valori piuttosto variabili per cui, non sono state valutate le tendenze delle singole piante ma solo quelle medie relative ai 3 gruppi. Lo spessore medio dell'anello presenta un andamento crescente per tutte e 3 le tipologie di trattamento ma, questa tendenza non è significativa né per le piante del gruppo C ( $R^2 = 0.52$ ), né per quelle dei gruppi N ( $R^2 = 0.41$ ) ed S ( $R^2 = 0.20$ ) (figura 21).

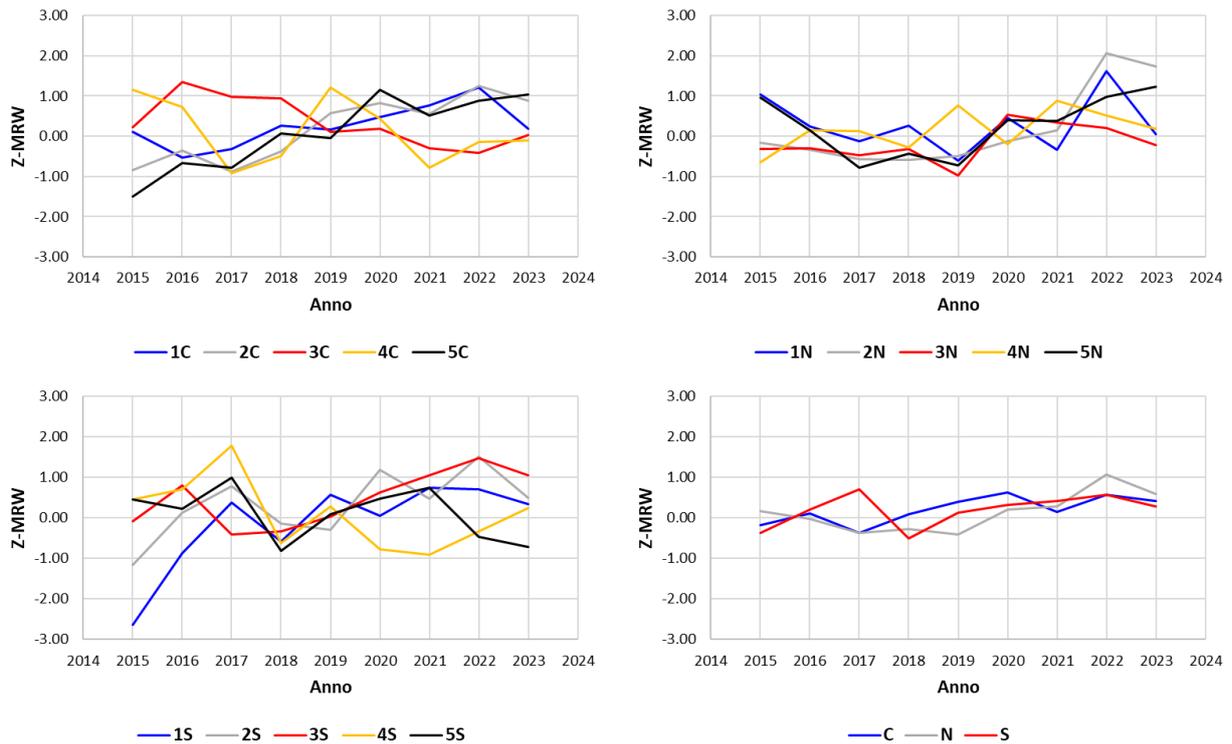


Figura 21. Serie temporali dell'indice di larghezza media dell'anello (Z-MRW) relative alle singole piante raggruppate per modalità di trattamento. In basso a destra si riportano le serie temporali medie relative ai 3 trattamenti

All'interno di ciascun gruppo, l'indice di conduttività idraulica specifica (Z-Ks) presenta un'elevata variabilità dei valori relativi alle singole piante per cui, non è stato analizzato l'andamento dei singoli individui ma solo quello medio relativo ai 3 gruppi. Per il gruppo C, l'indice di conduttività mostra una significativa tendenza di crescita ( $R^2 = 0.95$ ), la quale è stata riscontrata anche per il gruppo N ( $R^2 = 0.78$ ), mentre, per il gruppo S, questa tendenza non è significativa ( $R^2 = 0.55$ ) (figura 22).

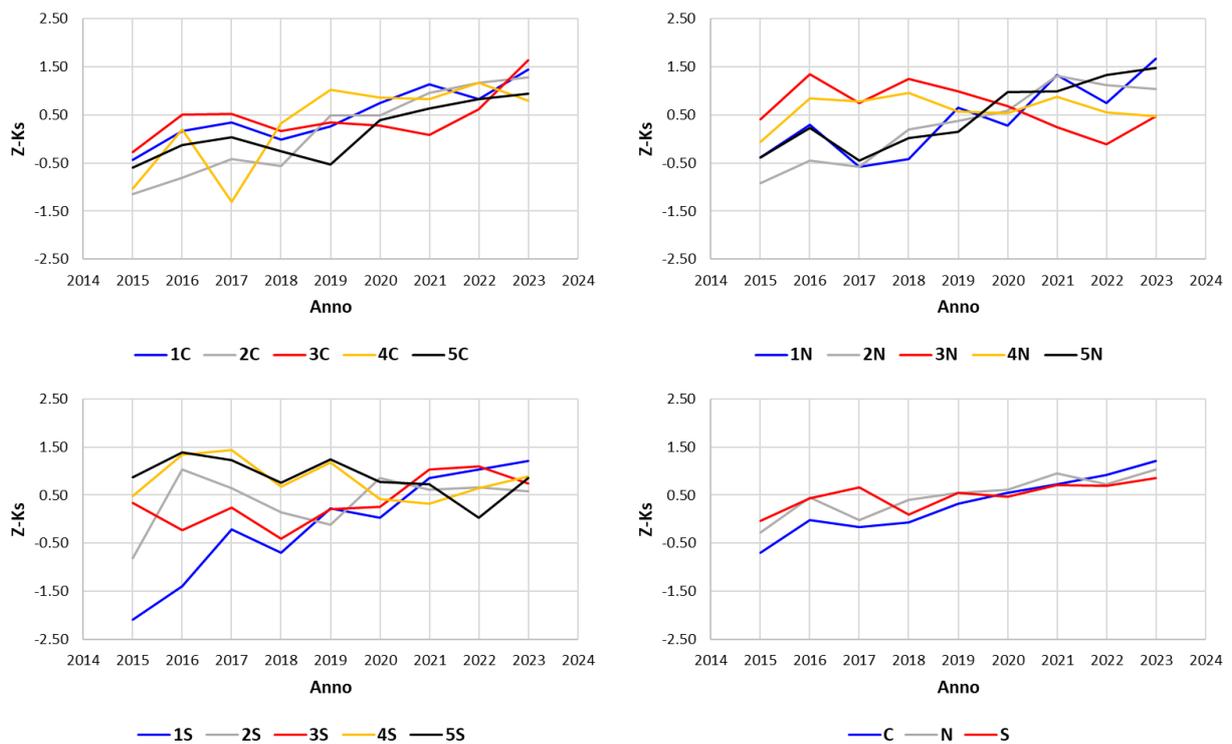


Figura 22. Serie temporali dell'indice di conduttività idraulica teorica specifica dello xilema per anello annuale (Z-Ks) relative alle singole piante raggruppate per modalità di trattamento. In basso a destra si riportano le serie temporali medie relative ai 3 trattamenti

Per quanto riguarda l'indice dell'area media delle pareti cellulari (Z-CWA), all'interno di ciascun gruppo, per i singoli individui, l'indice assume valori piuttosto variabili per cui, non sono state analizzate le tendenze delle singole piante ma solamente quelle medie relative alle 3 tipologie di trattamento. Le piante del gruppo C mostrano una significativa tendenza di crescita ( $R^2 = 0.77$ ), la quale però non è significativa per le piante dei gruppi N ( $R^2 = 0.56$ ) ed S ( $R^2 = 0.18$ ) (figura 23).

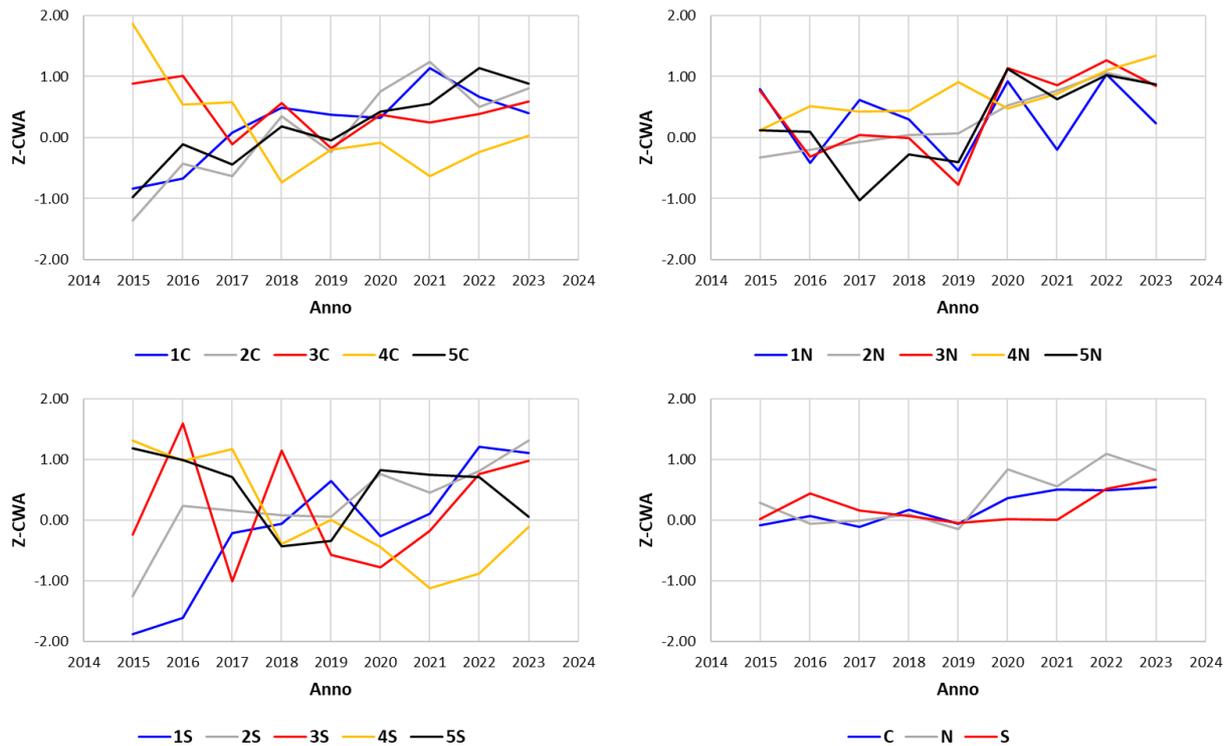


Figura 23. Serie temporali dell'indice dell'area media delle pareti cellulari (Z-CWA) relative alle singole piante raggruppate per modalità di trattamento. In basso a destra si riportano le serie temporali medie relative ai 3 trattamenti

Per ognuno dei 3 parametri anatomici selezionati sono state ricavate 3 serie temporali standardizzate relative ai singoli trattamenti. Per ciascuna delle 3 serie temporali dei 3 parametri selezionati sono stati calcolati gli errori standard della media relativi ad ogni anello tra il 2015 e il 2023 (tabelle 3, 4 e 5).

Tabella 3. Serie temporali dell'indice di larghezza medio dell'anello (Z-MRW). Queste serie sono relative ai 3 trattamenti (coperto C, neutro N, scoperto S) ed hanno una lunghezza di 9 anni (dal 2015 al 2023). Per ogni anno di ciascuna serie è stato calcolato l'errore standard della media

Z-MRW						
Anno	TRATTAMENTO COPERTO C		TRATTAMENTO NEUTRO N		TRATTAMENTO SCOPERTO S	
	SERIE C	Err. Std.	SERIE N	Err. Std.	SERIE S	Err. Std.
2015	-0.17	0.32	0.17	0.38	-0.37	0.38
2016	0.11	0.30	-0.02	0.21	0.20	0.27
2017	-0.38	0.38	-0.36	0.19	0.70	0.30
2018	0.08	0.26	-0.27	0.28	-0.50	0.17
2019	0.40	0.21	-0.41	0.23	0.14	0.23
2020	0.62	0.16	0.21	0.14	0.31	0.26
2021	0.15	0.23	0.28	0.20	0.42	0.35
2022	0.56	0.27	1.07	0.25	0.58	0.37
2023	0.41	0.21	0.60	0.30	0.28	0.31

Tabella 4. Serie temporali dell'indice di conduttività idraulica teorica specifica dello xilema per anello annuale (Z-Ks). Queste serie sono relative ai 3 trattamenti (coperto C, neutro N, scoperto S) ed hanno una lunghezza di 9 anni (dal 2015 al 2023). Per ogni anno di ciascuna serie è stato calcolato l'errore standard della media

Z-Ks						
Anno	TRATTAMENTO COPERTO C		TRATTAMENTO NEUTRO N		TRATTAMENTO SCOPERTO S	
	SERIE C	Err. Std.	SERIE N	Err. Std.	SERIE S	Err. Std.
2015	-0.70	0.21	-0.27	0.19	-0.04	0.35
2016	-0.02	0.23	0.45	0.25	0.43	0.37
2017	-0.16	0.25	-0.02	0.27	0.67	0.24
2018	-0.07	0.19	0.40	0.22	0.10	0.20
2019	0.31	0.21	0.54	0.13	0.55	0.27
2020	0.55	0.16	0.61	0.16	0.46	0.14
2021	0.73	0.14	0.95	0.18	0.71	0.19
2022	0.92	0.12	0.72	0.25	0.69	0.23
2023	1.22	0.16	1.02	0.20	0.85	0.18

Tabella 5. Serie temporali dell'indice dell'area media delle pareti cellulari (Z-CWA). Queste serie sono relative ai 3 trattamenti (coperto C, neutro N, scoperto S) ed hanno una lunghezza di 9 anni (dal 2015 al 2023). Per ogni anno di ciascuna serie è stato calcolato l'errore standard della media

Z-CWA						
Anno	TRATTAMENTO COPERTO C		TRATTAMENTO NEUTRO N		TRATTAMENTO SCOPERTO S	
	SERIE C	Err. Std.	SERIE N	Err. Std.	SERIE S	Err. Std.
2015	-0.08	0.52	0.29	0.19	0.02	0.48
2016	0.07	0.24	-0.06	0.24	0.44	0.39
2017	-0.11	0.21	0.00	0.28	0.17	0.29
2018	0.17	0.21	0.10	0.18	0.07	0.21
2019	-0.06	0.09	-0.15	0.21	-0.04	0.24
2020	0.36	0.14	0.84	0.15	0.02	0.25
2021	0.51	0.27	0.56	0.19	0.01	0.25
2022	0.49	0.16	1.10	0.16	0.52	0.27
2023	0.54	0.13	0.83	0.13	0.67	0.29

Sono state quindi analizzate le possibili differenze significative attraverso il test t di Student (tabella 6).

Tabella 6. Test t di Student calcolato per gli indici di larghezza media dell'anello (Z-MRW), conduttività idraulica teorica specifica dello xilema per anello annuale (Z-Ks) ed area media delle pareti cellulari (Z-CWA). Il test è stato calcolato per i 3 trattamenti (coperto C, neutro N e scoperto S) utilizzando gli anelli dal 2015 al 2023. In grassetto sono evidenziate le combinazioni per le quali vi è una differenza significativa al 95%

Anno	Z-MRW			Z-Ks			Z-CWA		
	C-N	N-S	C-S	C-N	N-S	C-S	C-N	N-S	C-S
2015	0.496	0.330	0.703	0.153	0.568	0.130	0.515	0.606	0.889
2016	0.732	0.531	0.826	0.184	0.958	0.321	0.694	0.283	0.426
2017	0.973	<b>0.010</b>	<b>0.040</b>	0.695	0.071	<b>0.027</b>	0.771	0.679	0.461
2018	0.364	0.489	0.075	0.131	0.324	0.565	0.794	0.918	0.735
2019	<b>0.020</b>	0.115	0.410	0.372	0.984	0.500	0.696	0.741	0.952
2020	0.074	0.737	0.339	0.802	0.514	0.700	<b>0.036</b>	<b>0.014</b>	0.260
2021	0.671	0.737	0.532	0.341	0.365	0.934	0.886	0.098	0.195
2022	0.177	0.280	0.971	0.494	0.920	0.390	<b>0.017</b>	0.085	0.926
2023	0.610	0.466	0.737	0.465	0.538	0.161	0.124	0.619	0.681

I risultati del test t di Student, per l'indice di larghezza medio dell'anello (Z-MRW) hanno evidenziato delle differenze significative nel 2017 sia tra i trattamenti C ed S (p-value = 0.04) che tra i trattamenti N ed S (p-value = 0.01), mentre, nel 2019 la differenza è significativa solo tra i trattamenti C ed N (p-value = 0.02). Sono inoltre risultate tendenzialmente significative le differenze nel 2018 tra i trattamenti C ed S (p-value = 0.075) e nel 2020 tra i trattamenti C ed N (p-value = 0.074) (figura 24; tabella 6).

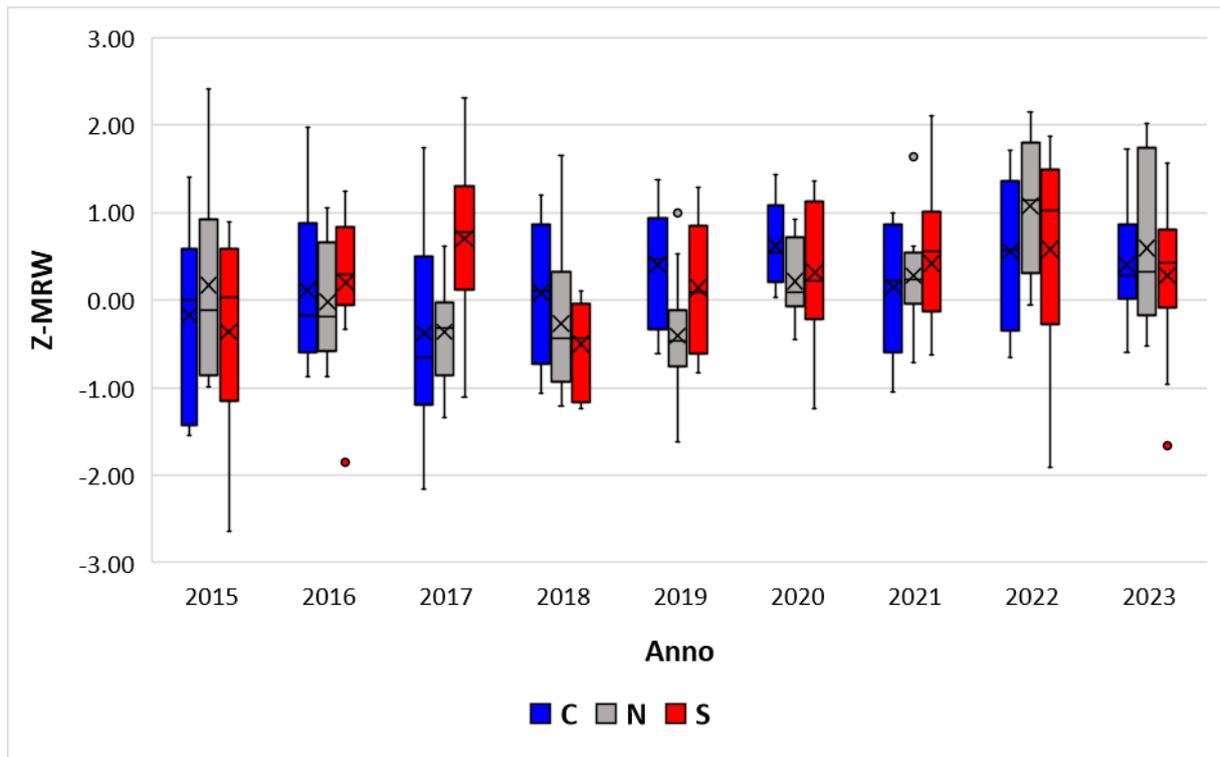


Figura 24. Confronto tra l'indice di larghezza medio dell'anello (Z-MRW) relativo ai 3 trattamenti (coperto C, neutro N, scoperto S). La figura mostra il 1° e il 3° quartile (box), i valori massimi e minimi (baffi), gli outlier (punti), le mediane (–) e le medie (X)

I risultati del test t di Student mostrano che l'indice di conduttività idraulica teorica specifica dello xilema per anello annuale (Z-Ks) presenta una differenza significativa tra i trattamenti C ed S (p-value = 0.027) nel 2017, mentre, tra i trattamenti N ed S (p-value = 0.071) la differenza risulta solo tendenzialmente significativa (figura 25; tabella 6).

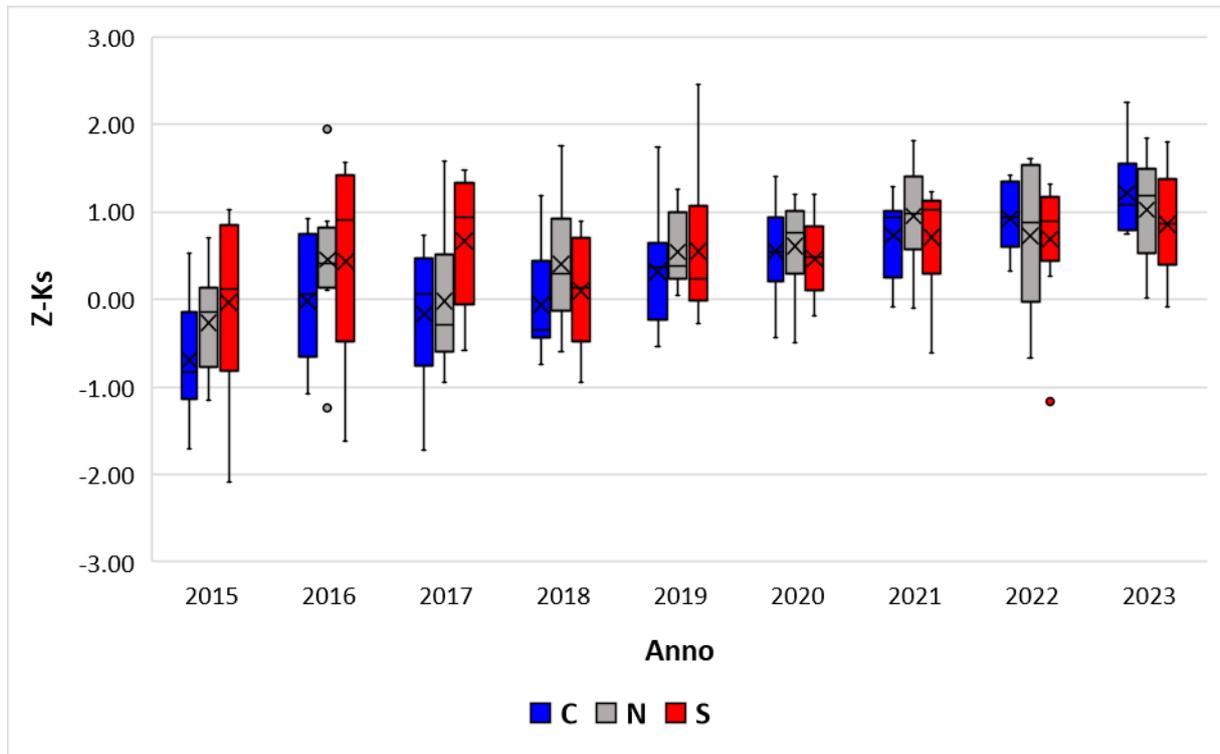


Figura 25. Confronto tra l'indice di conduttività idraulica teorica specifica dello xilema per anello annuale (Z-Ks) relativo ai 3 trattamenti (coperto C, neutro N, scoperto S). La figura mostra il 1° e il 3° quartile (box), i valori massimi e minimi (baffi), gli outlier (punti), le mediane (—) e le medie (X)

I risultati del test t di Student, per l'indice dell'area media delle pareti cellulari (Z-CWA) mostrano delle differenze significative nel 2020 sia tra trattamenti C ed N (p-value = 0.036) che tra i trattamenti N ed S (p-value = 0.014), mentre, nel 2022 la differenza è significativa solo tra i trattamenti C ed N (p-value = 0.017) (figura 26; tabella 6).

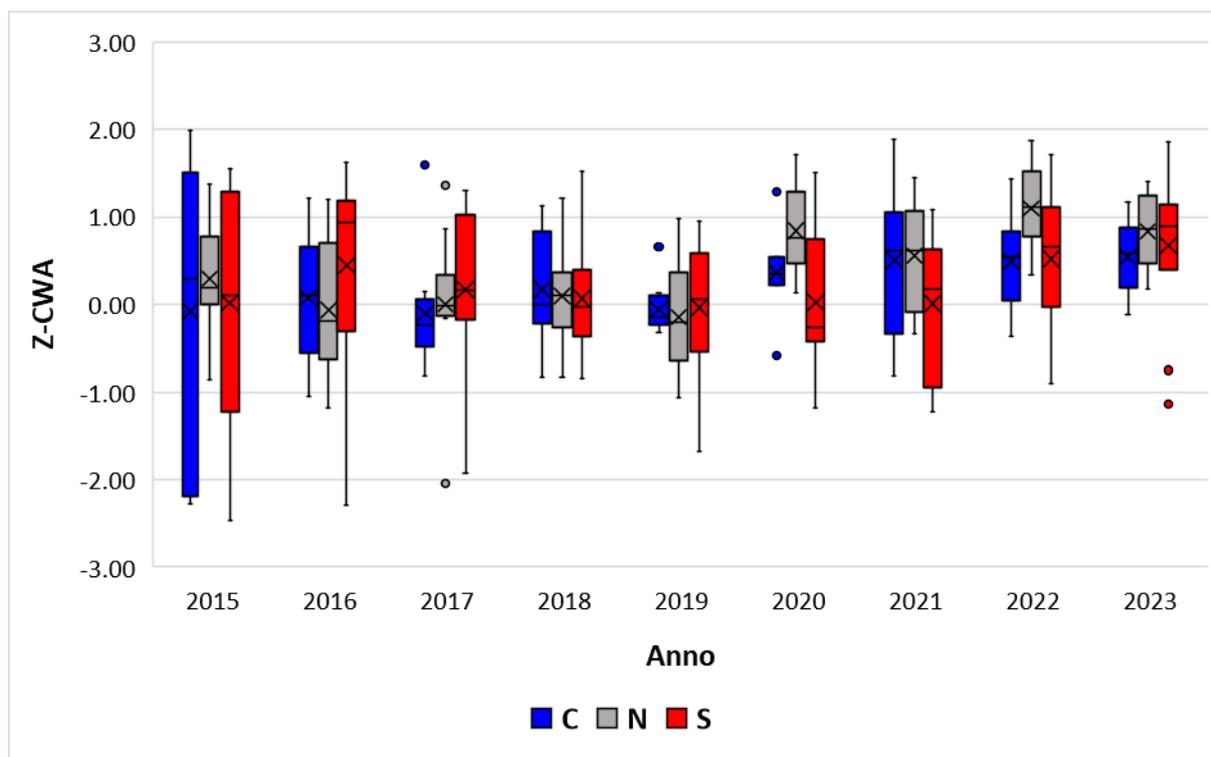


Figura 26. Confronto tra l'indice dell'area media delle pareti cellulari (Z-CWA) relativo ai 3 trattamenti (coperto C, neutro N, scoperto S). La figura mostra il 1° e il 3° quartile (box), i valori massimi e minimi (baffi), gli outlier (punti), le mediane (—) e le medie (X)

Gli indici di larghezza media dell'anello (Z-MRW) e conduttività idraulica teorica specifica dello xilema per anello annuale (Z-Ks) presentano delle differenze significative per il 2017. Queste differenze non sono dovute alle diverse modalità di trattamento in quanto la prima manipolazione della copertura nevosa è stata effettuata nel 2018 per cui, tali differenze probabilmente sono dovute a fattori ambientali o alla variabilità interna delle singole piante.

### 3.3. Effetto del trattamento sulla struttura anatomica dello xilema escludendo il legno di compressione

Le analisi sopra descritte sono state ripetute eliminando i dati relativi agli anelli che presentano un'elevata quantità di legno di compressione. Questa valutazione è stata effettuata in quanto il legno di compressione rispetto al legno normale presenta tracheidi con parete cellulare più spessa e lumi cellulari di forma arrotondata; quest'ultima caratteristica crea degli spazi intercellulari anomali

all'interno dello xilema (Westing, 1965). In questo modo è stato possibile valutare se il legno di reazione modifica in maniera sostanziale i risultati delle analisi.

Con questa modifica, l'indice di larghezza media dell'anello (Z-MRW) presenta delle differenze significative per il 2017 tra i trattamenti N ed S (p-value = 0.031) mentre, per il 2019 le differenze sono significative sia tra i trattamenti C ed N (p-value = 0.004) che tra i trattamenti N ed S (p-value = 0.034) (tabella 7).

Per quanto riguarda l'indice di conduttività idraulica teorica specifica dello xilema per anello annuale (Z-Ks) non risultano differenze significative tra i trattamenti (tabella 7).

Relativamente all'indice dell'area media delle pareti cellulari (Z-CWA) c'è una differenza significativa per il 2020 tra i trattamenti N ed S (p-value = 0.009), mentre, è solo tendenzialmente significativa la differenza nel 2020 tra i trattamenti C ed N (p-value = 0.052) (tabella 7).

Confrontando la tabella 6 con i corrispondenti indici dei parametri anatomici della tabella 7, si nota che eliminando il legno di compressione vi è una variazione negli anni per i quali i trattamenti presentano differenze significative. In ogni caso, anche eliminando il legno di compressione, per ognuno dei 3 parametri anatomici considerati non emergono sostanziali differenze tra i 3 trattamenti.

*Tabella 7. Test t di Student calcolato per gli indici di larghezza media dell'anello (Z-MRW), conduttività idraulica teorica specifica dello xilema per anello annuale (Z-Ks) ed area media delle pareti cellulari (Z-CWA). Il test è stato calcolato per i 3 trattamenti (coperto C, neutro N e scoperto S) utilizzando gli anelli dal 2015 al 2023. In questo caso sono stati eliminati i dati relativi agli anelli con legno di compressione. In grassetto sono evidenziate le combinazioni per le quali vi è una differenza significativa al 95%*

Anno	Z-MRW			Z-Ks			Z-CWA		
	C-N	N-S	C-S	C-N	N-S	C-S	C-N	N-S	C-S
2015	0.285	0.404	0.919	0.382	0.648	0.286	0.238	0.387	0.713
2016	0.506	0.879	0.528	0.123	0.964	0.261	0.757	0.873	0.710
2017	0.885	<b>0.031</b>	0.082	0.540	0.213	0.073	0.569	0.691	0.415
2018	0.168	0.838	0.131	0.251	0.373	0.766	0.976	0.396	0.508
2019	<b>0.004</b>	<b>0.034</b>	0.410	0.295	0.899	0.500	0.330	0.463	0.952
2020	0.063	0.469	0.512	0.977	0.096	0.071	0.052	<b>0.009</b>	0.156
2021	0.556	0.553	0.305	0.142	0.169	0.833	0.620	0.093	0.288
2022	0.185	0.175	0.819	0.751	0.284	0.271	0.271	0.371	0.964
2023	0.570	0.466	0.803	0.750	0.538	0.293	0.101	0.619	0.610

### 3.4. Variazioni anatomiche legate alle condizioni climatiche

Per quanto riguarda le condizioni climatiche del sito sperimentale, nel 2017 e nel 2022 le precipitazioni sono state minori rispetto alla media del periodo 1992-2022. Relativamente alle temperature, la primavera e l'estate del 2022 sono state più calde rispetto alla media del periodo 2018-2023, durante il quale sono state effettuate le manipolazioni della copertura nevosa.

Queste condizioni climatiche sembrerebbero avere un effetto a livello anatomico sull'indice di conduttività idraulica teorica specifica dello xilema per anello annuale (Z-Ks); la figura 22 consente di valutare l'andamento di tale indice per le 5 piante sottoposte a trattamento di tipo N (controllo), le cui tendenze non sono state influenzate dalle manipolazioni della copertura nevosa. Si può notare che sia per il 2017 che per il 2022, rispetto agli anni immediatamente precedenti, per tutte le piante vi è una riduzione dell'indice di conduttività ad eccezione della pianta 5N per la quale nel 2022 l'indice aumenta rispetto al 2021.

In ogni caso, il 2016 presenta precipitazioni superiori alla media del periodo 1992-2022 mentre, il 2021 presenta sia precipitazioni che temperature in linea rispettivamente con le medie del periodo 1992-2022 e 2018-2023. Per quanto riguarda gli altri 2 parametri anatomici, questi non sembrano essere legati alle particolari condizioni climatiche di questi 2 specifici anni.

Si deve infine considerare che non è stato possibile analizzare nel dettaglio le eventuali relazioni tra i parametri anatomici e i fattori climatici in quanto, non vi sono dati sufficienti per realizzare un'analisi dettagliata poiché la manipolazione della copertura nevosa prosegue da pochi anni.

## 4. DISCUSSIONE

### 4.1. Lesioni da gelate tardive

Negli ambienti alpini, la copertura nevosa protegge la vegetazione dalle basse temperature invernali (Bannister et al., 2005) e dalle gelate tardive di fine primavera. Le manipolazioni della copertura nevosa che simulano un allungamento della stagione vegetativa possono quindi alterare la frequenza dei danni causati dalle gelate tardive in quanto espongono precocemente le piante agli estremi termici di inizio primavera.

In questo studio, per il 2022 è stata riscontrata la stessa frequenza di anelli da gelo nelle piante sottoposte a trattamento di tipo S ed N e, tale frequenza è superiore rispetto a quella individuata per le piante gestite con trattamento di tipo C (figura 19); negli altri 5 anni di sperimentazione invece, tra i 3 gruppi di piante non sono state riscontrate elevate differenze nelle frequenze dei danni da gelo. Di fatto, le lesioni causate dalle gelate, si verificano solamente con determinate condizioni climatiche, nello specifico durante l'attività cambiale e la crescita delle cellule xilematiche la temperatura deve essere inferiore a 0 °C (solitamente al di sotto di -5 °C) affinché si formi un anello da gelo (Hantemirov et al., 2000).

Per spiegare la particolarità del 2022 si deve considerare che l'inverno del 2021-2022 è stato caratterizzato da un clima siccitoso, con frequenti condizioni di inversione termica e con minore accumulo di neve in montagna (<https://www.arpa.veneto.it/temi-ambientali/climatologia/dati/inverno-2021-22-1>). Per le piante appartenenti al gruppo S, la copertura nevosa viene rimossa manualmente verso la fine dell'inverno e, questo le espone precocemente alle condizioni primaverili che possono causare delle lesioni da gelo; nel 2022 la carenza di neve ha fatto sì che anche le piante del gruppo N in primavera non fossero protette dalla copertura nevosa e fossero quindi esposte al rischio di danni da gelo. Questa particolare condizione spiegherebbe come mai tra i 2 gruppi di piante vi è la stessa frequenza di lesioni da gelo. Per le piante del gruppo C invece nel 2022 la frequenza dei danni da gelo è piuttosto bassa in quanto queste piante non sono esposte alle condizioni primaverili visto che vengono mantenute artificialmente al di sotto della copertura nevosa. In ogni caso, per alcuni anni sono stati riscontrati dei danni da gelo anche nelle piante del gruppo C (figura 19) e, questi sono probabilmente dovuti a gelate che si sono verificate dopo il completo scioglimento della copertura nevosa.

Il risultato di questa analisi consente di confermare quanto riscontrato da Rixen et al. (2010) secondo cui una copertura nevosa più duratura protegge le piante dalle rigide condizioni primaverili e di inizio estate ed evita che queste ultime subiscano danni da gelo. Questa protezione permette di superare l'effetto negativo di una stagione di crescita più breve (Rixen et al., 2010). In ogni caso, non si può supporre che il riscaldamento globale comporti una riduzione delle gelate (Rixen et al., 2010) e, quindi, dei danni da gelo sulla vegetazione in quanto, le temperature che possono determinare tali lesioni possono comunque verificarsi; in aggiunta, potrebbe mancare anche l'effetto protettivo della neve. Si deve infatti considerare che nell'arco alpino e nell'emisfero settentrionale, la durata primaverile della copertura nevosa è in diminuzione (Gobiet et al, 2014; IPCC, 2023).

## 4.2. Variazioni tratti anatomici

La standardizzazione dei dati ha permesso di rimuovere i trend allometrici ed ontogenetici e, quindi, di valutare se sono presenti particolari tendenze dovute alle differenti condizioni ambientali di crescita dei 3 gruppi di piante. In accordo con quanto ipotizzato, nel periodo precedente il trattamento (anelli 2015-2017), non sono risultate differenze significative tra i trattamenti, ad eccezione del 2017 per l'ampiezza dell'anello tra le piante appartenenti ai gruppi C ed S. Al contrario, diversamente da quanto ipotizzato, i risultati mostrano che le diverse modalità di trattamento non hanno determinato particolari differenze a livello dei singoli parametri anatomici. In generale, tutti e 3 gli indici dei parametri anatomici considerati, mostrano un trend positivo, il quale però non sempre risulta significativo.

I risultati ottenuti sono in accordo con Unterholzner et al., (2020). Anche in questo studio, infatti, le caratteristiche idrauliche dello xilema sono risultate omogenee sia lungo un gradiente altitudinale che tra diverse provenienze europee. Le minime variazioni nelle caratteristiche idrauliche dello xilema di *Juniperus communis*, dovute probabilmente a variabilità fenotipica e/o genotipica, indicano comunque una bassa variabilità (Unterholzner et al., 2020).

### 4.2.1. Larghezza media dell'anello

Negli anni precedenti la sperimentazione, le differenze significative del 2017 nell'indice di larghezza medio dell'anello (tabella 6) potrebbero essere dovute a fattori ambientali o di variabilità interni ai singoli individui. Nei primi 3 anni di sperimentazione invece, nonostante la stagione vegetativa più breve, le piante del gruppo C presentano degli accrescimenti secondari superiori (ma non

significativamente) rispetto alle altre piante (figura 21; tabella 6). Questa condizione è stata riscontrata anche da Rixen et al. (2010) secondo il quale, la copertura nevosa più duratura è vantaggiosa nelle estati fredde (non in quelle calde) poiché protegge le piante dalle rigide condizioni di inizio stagione. Di fatto, la protezione contro il gelo determinerebbe condizioni di crescita più favorevoli che potrebbero superare l'effetto negativo di una stagione di crescita più breve (Rixen et al., 2010).

Secondo questa considerazione, le piante del gruppo S ed N sarebbero cresciute meno a causa dei danni da gelo ma, in realtà, gli individui di questi 2 gruppi presentano un numero maggiore di anelli da gelo rispetto alle piante del gruppo C solamente nel 2022; per gli altri anni di sperimentazione, tra i 3 gruppi di piante la frequenza di anelli da gelo è infatti paragonabile (figura 19). Si deve inoltre considerare che Unterholzner et al. (2022) non hanno individuato significativi danni da gelo, come rami o aghi morti, per il periodo 2018-2020 e, la stessa cosa è stata osservata da Forner (2023) per i 3 anni successivi (2021-2023). La protezione contro i danni da gelo garantita dalla prolungata copertura nevosa potrebbe giustificare una maggiore crescita delle piante del gruppo C per il 2022 ma, per questo specifico anno, gli individui dei gruppi C ed S presentano simili valori dell'indice di larghezza medio dell'anello (tabella 3).

In ogni caso, secondo Carrer et al. (2019), la crescita del ginepro comune è condizionata dalle precipitazioni solide, le quali hanno sia un effetto positivo di isolamento termico che un effetto negativo di riduzione della durata della stagione vegetativa, infatti, una copertura nevosa prolungata riduce la durata della stagione vegetativa e limita la crescita del ginepro. Si deve inoltre considerare che la larghezza dell'anello è condizionata anche dalle temperature di maggio, le quali se sono miti accelerano lo scioglimento della neve determinando una stagione di crescita più lunga e accrescimenti secondari maggiori (Carrer et al., 2019). I risultati di questo elaborato non rispecchiano però quanto sopra descritto poiché le piante del gruppo S nel complesso non presentano anelli significativamente più larghi di quelli delle piante degli altri gruppi (tabella 6) per cui, rispetto a quanto ipotizzato in partenza, la durata della stagione vegetativa non sembra influenzare la larghezza degli anelli e quindi l'accrescimento secondario.

Se si considera quanto osservato da Bär et al. (2007), si potrebbe spiegare l'assenza di differenze significative nell'indice di larghezza medio dell'anello tra i 3 gruppi di piante. Secondo Bär et al. (2007) infatti, al di sopra del limite del bosco la durata della stagione vegetativa, non altera in modo sostanziale la struttura dell'anello in quanto, il principale fattore che condiziona la crescita è la

temperatura media estiva (giugno-agosto). Nel periodo estivo, quando le temperature sono più elevate, le 15 piante sono tutte in attività vegetativa e crescono nelle stesse condizioni di temperatura, inoltre, Deslauriers e Morin (2005) hanno osservato che sono soprattutto le temperature minime giornaliere dell'aria e del suolo a controllare il tasso di divisione cellulare. Di fatto, per le piante del gruppo S l'allungamento della stagione vegetativa comporta un inizio dell'attività cambiale con temperature minime dell'aria ancora basse; nella prima parte della stagione vegetativa, per queste piante, il tasso di divisione cellulare potrebbe essere ridotto per cui, la crescita sarebbe comunque limitata; di conseguenza, anche se la stagione vegetativa è più lunga, nel complesso, le piante del gruppo S non avrebbero accrescimenti maggiori rispetto a quelle degli altri gruppi.

Si presume che la lunghezza della stagione vegetativa abbia un effetto sugli accrescimenti secondari soprattutto se la sua durata è alterata dalle temperature di inizio stagione.

#### 4.2.2. Conduttività idraulica

Durante la xilogenesi, le condizioni ambientali influenzano le caratteristiche anatomiche delle tracheidi, in particolare, la disponibilità idrica condiziona la dimensione delle cellule (Olano et al., 2012) in quanto influenza la pressione di turgore cellulare, la quale determina l'ingrandimento delle cellule vegetali (Cosgrove, 1993); in condizioni di stress inoltre, le piante producono maggiori quantità di ormoni come l'acido abscissico (ABA) (Xiong et al., 2002) il quale, nelle conifere in caso di stress idrico può limitare l'espansione delle tracheidi (Little e Savidge, 1987).

Le precipitazioni invernali influenzano le caratteristiche idrauliche di *Juniperus communis* in quanto, in un inverno con poche precipitazioni solide, si forma una copertura nevosa di limitato spessore che in primavera si scioglie rapidamente (Rudley et al., 2023). Questo determina una disponibilità idrica precoce la quale ha un effetto positivo sulle caratteristiche idrauliche (Rudley et al., 2023). Si deve inoltre considerare che le caratteristiche anatomiche ed idrauliche del ginepro sono influenzate positivamente anche dalle temperature massime primaverili (Rudley et al., 2023). Se queste ultime sono elevate, allora determinano uno scioglimento anticipato della neve e quindi aumentano la disponibilità idrica ad inizio stagione (Rudley et al., 2023). Questo può influenzare positivamente sia l'attività cambiale che la conduttività idraulica dello xilema (Rudley et al., 2023).

Le piante del gruppo S, per le quali la stagione vegetativa è stata allungata, potrebbero corrispondere alla condizione osservata da Rudley et al., (2023) di scioglimento precoce della copertura nevosa per

cui dovrebbero presentare una conduttività idraulica maggiore delle piante degli altri gruppi. In realtà, i risultati sono in linea con l'ipotesi iniziale e mostrano che non vi sono significative differenze di conduttività dovute ai trattamenti (tabella 6). L'assenza di differenze tra i 3 gruppi di piante potrebbe essere dovuta al fatto che per le piante del gruppo S l'allungamento della stagione vegetativa avviene attraverso la rimozione della copertura nevosa e non per lo scioglimento anticipato della neve, il quale garantirebbe la disponibilità idrica precoce con effetti positivi sulle caratteristiche idrauliche degli individui.

Per quanto riguarda le piante del gruppo C, queste presentano un indice di conduttività sempre minore delle altre piante, ad eccezione degli ultimi 2 anni per i quali l'indice di queste piante ha un valore superiore rispetto agli altri gruppi (figura 22; tabella 4).

Infine, relativamente al periodo precedente i trattamenti, l'indice di conduttività idraulica teorica specifica dello xilema per anello annuale (Z-Ks) presenta una differenza significativa tra le piante dei gruppi C ed S per il 2017 (tabella 6) e, questa differenza potrebbe essere dovuta a fattori ambientali o di variabilità interni ai singoli individui.

#### 4.2.3. Pareti cellulari

Lo spessore della parete cellulare è strettamente connesso alla conducibilità idraulica poiché deve garantire che i condotti xilematici non implodano a causa della pressione negativa presente al loro interno (Pittermann et al., 2006b); un maggiore spessore delle pareti determina una minore efficienza idraulica ed un maggiore costo di costruzione in termini di carbonio allocato nelle pareti (Pittermann et al., 2006b). Secondo Olano et al. (2012), il lume cellulare e lo spessore della parete cellulare dipendono dalle condizioni ambientali rispettivamente della fase di espansione e di maturazione. Lo spessore della parete cellulare, nel legno primaticcio è positivamente correlato alla disponibilità idrica di inizio stagione mentre, nel legno tardivo dipende dalle temperature di fine stagione (Olano et al., 2012). Le cellule del legno primaticcio hanno una parete cellulare relativamente sottile (comunque sufficiente per ridurre al minimo i rischi di implosione) e un diametro elevato in quanto soddisfano la maggior parte del fabbisogno idrico della chioma mentre, le cellule del legno tardivo presentano una parete cellulare più spessa e lumi di ridotte dimensioni (Björklund et al., 2017).

Come visto in precedenza, in ambiente alpino, la lunghezza della stagione vegetativa è controllata dalla profondità e dalla durata della copertura nevosa (Francon et al., 2020; Carrer et al., 2019) che

dipendono sia dal quantitativo di precipitazioni invernali che dalle temperature di maggio, le quali possono anticipare lo scioglimento della neve (Carrer et al., 2019). Inoltre, una copertura nevosa di ridotto spessore si scioglie rapidamente e garantisce una disponibilità idrica precoce, la quale ha un effetto positivo sia sulle caratteristiche idrauliche dello xilema (Rudley et al., 2023) che sulle pareti cellulari del legno primaticcio (Olano et al., 2012). Per quanto riguarda il legno tardivo invece, secondo quanto sopra descritto, il generale aumento delle temperature dell'arco alpino (Auer et al., 2007) dovrebbe determinare un aumento di spessore della parete cellulare.

In ogni caso, un aumento della lunghezza della stagione vegetativa determina un incremento della crescita radiale degli arbusti al di sopra del limite del bosco (Francon et al., 2020; Carrer et al., 2019; Rudley et al., 2023) e, poiché la biomassa prodotta con la crescita radiale si accumula principalmente nelle pareti cellulari (Rathgeber et al., 2016), si potrebbe supporre che assieme all'aumento della crescita radiale aumenti anche lo spessore delle pareti cellulari.

In questo studio non è stata effettuata una suddivisione tra lo spessore delle pareti del legno primaticcio e quelle del legno tardivo ma è stato utilizzato un unico valore. Si deve inoltre considerare che nei risultati è stato presentato il parametro anatomico dell'area media delle pareti cellulari e non quello dello spessore ma, questi 2 parametri sono tra loro connessi in quanto, un aumento di spessore determina anche un aumento dell'area occupata dalle pareti all'interno dell'anello.

In relazione a quanto descritto, le piante del gruppo S dovrebbero presentare un indice dell'area media delle pareti cellulari superiore a quello degli altri gruppi. Il gruppo S però per i primi 4 anni di sperimentazione mostra un indice minore rispetto agli altri gruppi mentre, per gli ultimi 2 anni presenta valori paragonabili a quelli del gruppo C (figura 23; tabella 5). L'indice dell'area media delle pareti cellulari per le piante del gruppo N presenta dei valori significativamente superiori per il 2020 rispetto agli altri 2 gruppi e per il 2022 rispetto al gruppo C (tabella 6) ma, nonostante questa condizione, le manipolazioni della copertura nevosa nel complesso non hanno determinato delle sostanziali differenze tra i 3 gruppi di piante. I risultati sono quindi coerenti con l'ipotesi iniziale.

In ogni caso, nel tempo, proseguendo con la sperimentazione, potrebbero comunque emergere delle differenze significative tra i trattamenti soprattutto se dovesse mantenersi la maggiore crescita dell'area delle pareti cellulari mostrata dalle piante S negli ultimi 2 anni (figura 23).

### 4.3. Confronti con precedenti analisi

Nel sito di studio, a partire dal 2018 sono state effettuate delle misurazioni al fine di valutare le differenze nella fenologia e negli accrescimenti primari degli individui sottoposti ai 3 diversi trattamenti. Secondo Forner (2023), per le piante del gruppo C, la maggiore durata della copertura nevosa posticipa lo sviluppo delle gemme, le quali raggiungono il completo sviluppo più tardi rispetto alle piante degli altri 2 gruppi. Per quanto riguarda gli anni 2022-2023 sembra che le piante del gruppo C si siano adattate al trattamento, infatti, le loro gemme raggiungono il completo sviluppo nello stesso periodo di quelle degli altri trattamenti (Forner, 2023). In ogni caso, per le piante del gruppo C, l'accorciamento della durata della stagione vegetativa non sembra posticipare l'inizio dell'allungamento dei germogli, inoltre, nei primi anni di trattamento, la velocità di crescita dei germogli del gruppo C sembra essere minore rispetto a quella degli altri 2 gruppi ma, nel tempo questa differenza sembra annullarsi (Forner, 2023). Nel complesso, nell'arco dei 6 anni di sperimentazione, il diverso trattamento non sembra condizionare la lunghezza finale dei germogli del gruppo C, ad eccezione dei primi 2 anni (Forner, 2023). Unterholzner et al. (2022), per il periodo 2018-2020 hanno osservato una tendenza di convergenza tra i trattamenti relativamente ad accrescimenti primari, area fogliare, peso secco delle foglie e, parzialmente, anche per il contenuto fogliare di amido; questo potrebbe suggerire una progressiva acclimatazione delle piante alle nuove condizioni nel tempo (Unterholzner et al., 2022).

Le alterazioni della durata della stagione vegetativa dovute alla sperimentazione determinano quindi delle differenze tra i 3 gruppi di piante nello sviluppo delle gemme e negli accrescimenti primari ma, queste differenze nel tempo tendono ad annullarsi. Per quanto riguarda le caratteristiche anatomiche degli anelli legnosi e gli accrescimenti secondari, fin dal primo anno di sperimentazione non vi sono differenze significative tra i trattamenti.



## 5. CONCLUSIONI

In alta quota, una copertura nevosa duratura garantisce protezione contro le gelate tardive in quanto ritarda l'inizio dell'attività vegetativa ed evita che le piante vengano esposte alle rigide condizioni primaverili. I risultati di questo studio mostrano che nel 2022 le piante mantenute artificialmente al di sotto della copertura nevosa presentano una minore frequenza di anelli da gelo rispetto agli altri individui. Si deve considerare che gli anelli da gelo si formano quando, durante l'attività vegetativa, la temperatura è minore di 0 °C ma, questa condizione non si verifica ogni anno. Si ritiene quindi utile proseguire la manipolazione della copertura nevosa per valutare se queste differenze nelle frequenze degli anelli da gelo si presentano anche nei successivi anni di sperimentazione.

Le analisi eseguite mostrano che i singoli parametri anatomici non presentano sostanziali differenze dovute alle diverse modalità di manipolazione della copertura nevosa. Rispetto a quanto osservato in altri studi e inizialmente ipotizzato, la lunghezza della stagione vegetativa non sembra influenzare la larghezza dell'anello. Per quanto riguarda la conduttività idraulica e lo spessore delle pareti cellulari, i risultati confermano l'ipotesi di partenza. L'assenza di differenze anatomiche potrebbe essere dovuta: al fatto che la manipolazione prosegue da 6 anni e, questo tempo potrebbe non essere sufficiente per determinare delle sostanziali differenze, oppure, potrebbe essere determinata dall'elevata acclimatazione di *Juniperus communis*, il quale mostra un'elevata omogeneità nei tratti idraulici xilematici sia lungo un gradiente altitudinale che tra diverse provenienze europee, in accordo con Unterholzner et al., (2020).

Il lieve andamento crescente dello spessore medio dell'anello osservato in questo studio, anche se non significativo, rispecchia quanto osservato da Hallinger et al. (2010), secondo i quali negli ultimi decenni l'accrescimento secondario degli arbusti è aumentato a causa del riscaldamento globale. Per quanto riguarda la tendenza di crescita osservata per gli altri 2 parametri, si deve considerare che, se aumenta lo spessore dell'anello, di conseguenza, cresce sia la conducibilità idraulica dell'anello che l'area occupata dalle pareti cellulari.

Si ritiene utile proseguire le sperimentazioni in maniera tale da ripetere le analisi considerando un intervallo temporale più lungo. Questo consentirebbe di valutare se nel tempo emergono delle sostanziali differenze anatomiche dovute ai trattamenti, oppure, di confermare che questa modalità di manipolazione della durata della stagione non ha un effetto significativo sulle caratteristiche anatomiche del ginepro comune.

In ogni caso, vista la plasticità di crescita di *Juniperus communis* L. (Tumajer et al., 2021; Unterholzner et al., 2022), le condizioni climatiche mutevoli ed in base ai risultati di questo esperimento durato sette anni è ancora difficile prevedere chiaramente come le tendenze di crescita e i cambiamenti strutturali si verificheranno in questa specie arbustiva d'alta quota, e le conseguenti implicazioni a livello di dinamiche vegetazionali nel prossimo futuro.

## 6. BIBLIOGRAFIA

Adler, C., P. Wester, I. Bhatt, C. Huggel, G.E. Insarov, M.D. Morecroft, V. Muccione, and A. Prakash, 2022: Cross-Chapter Paper 5: Mountains. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Lösche, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 2273–2318, doi:10.1017/9781009325844.022

Auer I., Böhm R., Jurkovic A., Lipa W., Orlik A., Potzmann R., Schöner W., Ungersböck M., Matulla C., Briffa K., Jones P., Efthymiadis D., Brunetti M., Nanni T., Maugeri M., Mercalli L., Mestre O., Moisselin J.-M., Begert M., Müller-Westermeier G., Kveton V., Bochnicek O., Stastny P., Lapin M., Szalai S., Szentimrey T., Cegnar T., Dolinar M., Gajic-Capka M., Zaninovic K., Majstorovic Z. e Nieplova E. (2007), HISTALP—historical instrumental climatological surface time series of the Greater Alpine Region. *International Journal of Climatology*, 27: 17-46

Bannister P., Maegli T., Dickinson K. J. M., Halloy S. R. P., Knight A., Lord J. M., Mark A. F. e Spencer K. L. (2005). Will loss of snow cover during climatic warming expose New Zealand alpine plants to increased frost damage?. *Oecologia*, 144: 245-256

Bär A., Pape R., Bräuning A., e Löffler J. (2008). Growth-ring variations of dwarf shrubs reflect regional climate signals in alpine environments rather than topoclimatic differences. *Journal of Biogeography*, 35(4): 625-636

Barkman J. J. (1985). Geographical variation in associations of Juniper scrub in the central European plain. Ed. Neuhäusl R., Dierschke H., Barkman J.J. *Chorological phenomena in plant communities. Advances in vegetation science*, vol 5. Springer

Beniston M. (1997). VARIATIONS OF SNOW DEPTH AND DURATION IN THE SWISS ALPS OVER THE LAST 50 YEARS: LINKS TO CHANGES IN LARGE-SCALE CLIMATIC FORCINGS. *Climatic Change* 36, 281-300

Beniston M. (2012). Is snow in the Alps receding or disappearing?. *WIREs Climate Change*, 3: 349-358

- Björklund J., Seftigen K., Schweingruber F., Fonti P., von Arx G., Bryukhanova M. V., Cuny H. E., Carrer M., Castagneri D. e Frank D. C. (2017). Cell size and wall dimensions drive distinct variability of earlywood and latewood density in Northern Hemisphere conifers. *New Phytologist*, 216 (3): 728-740
- Brändström J. (2001). MICRO- AND ULTRASTRUCTURAL ASPECTS OF NORWAY SPRUCE TRACHEIDS: A REVIEW. *IAWA Journal*, 22 (4): 333-353
- Brunetti M., Maugeri M., Nanni T., Auer I., Böhm R., e Schöner W. (2006), Precipitation variability and changes in the greater Alpine region over the 1800-2003 period. *Journal of Geophysical Research*, 111 (D11)
- Cannone N., Sgorbati S. e Guglielmin M. (2007). Unexpected impacts of climate change on alpine vegetation. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 5 (7): 360-364
- Carrer M., von Arx G., Castagneri D. e 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 Physiology*, 35 (1): 27-33
- Carrer M., Pellizzari E., Prendin A. L., Pividori M. e Brunetti M. (2019). Winter precipitation - not summer temperature - is still the main driver for Alpine shrub growth. *Science of the Total Environment*, 682: 171-179
- Caudullo G., Welk E. e San-Miguel-Ayanz, J. (2017). Chorological maps for the main European woody species. *Data in brief*, 12: 662-666
- Ceppi P., Scherrer S. C., Fischer A. M. e Appenzeller C. (2012). Revisiting Swiss temperature trends 1959–2008. *International Journal of Climatology* 32: 203-213
- Cochard H., Badel E., Herbette S., Delzon S., Choat B., Jansen S. (2013). Methods for measuring plant vulnerability to cavitation: a critical review. *Journal of Experimental Botany*, Volume 64: 4779-4791
- Cosgrove D. J. (1993). Water uptake by growing cells: an assessment of the controlling roles of wall relaxation, solute uptake, and hydraulic conductance. *International journal of plant sciences*, 154 (1): 10-21
- Cuny H. E., Rathgeber C. B. K., Frank D., Fonti P. e Fournier M. (2014). Kinetics of tracheid development explain conifer tree-ring structure. *New Phytologist*, 203 (4): 1231-1241

Delzon S., Douthe C., Sala A., e Cochard, H. (2010). Mechanism of water-stress induced cavitation in conifers: bordered pit structure and function support the hypothesis of seal capillary-seeding. *Plant, Cell & Environment*, 33 (12): 2101-2111

Deslauriers A. e Morin H. (2005). Intra-annual tracheid production in balsam fir stems and the effect of meteorological variables. *Trees*, 19: 402-408

Elmendorf S. C., Henry G. H. R., Hollister R. D., Björk R. G., Bjorkman A. D., Callaghan T. V., Collier L. S., Cooper E. J., Cornelissen J. H. C., Day T. A., Fosaa A. M., Gould W. A., Grétarsdóttir J., Harte J., Hermanutz L., Hik D. S., Hofgaard A., Jarrad F., Jónsdóttir I. S., Keuper F., Klanderud K., Klein J. A., Koh S., Kudo G., Lang S. I., Loewen V., May J. L., Mercado J., Michelsen A., Molau U., Myers-Smith I. H., Oberbauer S. F., Pieper S., Post E., Rixen C., Robinson C. H., Schmidt N. M., Shaver G. R., Stenström A., Tolvanen A., Totland Ø., Troxler T., Wahren C.-H., Webber P. J., Welker J. M. e Wookey P. A. (2012). Global assessment of experimental climate warming on tundra vegetation: heterogeneity over space and time. *Ecology Letters*, 15 (2): 164-175

Ferguson C. W. (1970). *Concepts and Techniques of Dendrochronology*. Laboratory of Tree-Ring Research, University of Arizona (Tucson, AZ)

Fonti P., von Arx G., García-González I., Eilmann B., Sass-Klaassen U., Gärtner H. e Eckstein D. (2010). Studying global change through investigation of the plastic responses of xylem anatomy in tree rings. *New Phytologist*, 185 (1): 42-53

Forner F. (2023). Effects of six years snowpack manipulation on growth and phenology of common juniper (*Juniperus communis* L.) at high elevation. *Relatore Carrer M.* Department of Land, Environment, Agriculture and Forestry. University of Padova, Legnaro

Francon L., Corona C., Till-Bottraud I., Choler P., Carlson B. Z., Charrier G., Améglio T., Morin S., Eckert N., Roussel E., Lopez-Saez J. e Stoffel M. (2020). Assessing the effects of earlier snow melt-out on alpine shrub growth: the sooner the better?. *Ecological Indicators*, 115

Giovannelli A., Emiliani G., Traversi M. L., Deslauriers A. e Rossi S. (2011). Sampling cambial region and mature xylem for non structural carbohydrates and starch analyses. *Dendrochronologia*, 29 (3): 177-182

Gobiet A., Kotlarski S., Beniston M., Heinrich G, Rajczak J. e Stoffel M. (2014). 21st century climate change in the European Alps—A review. *Science of The Total Environment*, 493: 1138-1151

- Hallinger M., Manthey M., e Wilmking M. (2010). Establishing a missing link: warm summers and winter snow cover promote shrub expansion into alpine tundra in Scandinavia. *New Phytologist*, 186 (4): 890-899
- Hantemirov R. M., Gorlanova L. A. e Shiyatov S. G. (2000). Pathological tree-ring structures in Siberian Juniper (*Juniperus sibirica* burgsd.) and their use for reconstructing extreme climatic events. *Russian Journal of Ecology*, 31: 167-173
- Hantemirov R., Shiyatov S. e Gorlanova L. (2011). Dendroclimatic study of Siberian juniper. *Dendrochronologia*, 29 (2): 119-122
- IPCC, 2023: Sections. In: *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Core Writing Team, H. Lee and J. Romero (eds.)]. IPCC, Geneva, Switzerland, pp. 35-115, doi: 10.59327/IPCC/AR6-9789291691647
- Jönsson A. M. e Barring L. (2011) Ensemble analysis of frost damage on vegetation caused by spring backlashes in a warmer Europe. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11 (2): 401-418
- Kaennel M., Schweingruber F. H., e Swiss Federal Institute for Forest, Snow and Landscape Research, WSL/FNP (Eds.). (1995). *Multilingual glossary of dendrochronology. Terms and definitions in English, German, French, Spanish, Italian, Portuguese and Russian*. Berne: Haupt
- Lamprecht A., Semenchuk P. R., Steinbauer K., Winkler M. e Pauli, H. (2018). Climate change leads to accelerated transformation of high-elevation vegetation in the central Alps. *New Phytol*, 220 (2): 447-459
- Larcher W., Kainmüller C. e Wagner J. (2010). Survival types of high mountain plants under extreme temperatures. *Flora - Morphology, Distribution, Functional Ecology of Plants*, 205 (1): 3-18
- Li X., Rossi S., Liang E. e Camarero J. J. (2016). Temperature thresholds for the onset of xylogenesis in alpine shrubs on the Tibetan Plateau. *Trees* 30: 2091-2099
- Little C. H. A. e Savidge R. A. (1987). 7. The role of plant growth regulators in forest tree cambial growth. *Plant Growth Regul* 6: 137-169
- Malfasi F. e Cannone N. (2020). Climate Warming Persistence Triggered Tree Ingression After Shrub Encroachment in a High Alpine Tundra. *Ecosystems*, 23: 1657-1675

- Mantovani E. (2023). Tree ring and wood anatomical traits responses to climate in Scots pine at the leading edge of its natural distribution. Relatore Carrer M., Correlatore Frigo D., Prendin A. L. Department of Land, Environment, Agriculture and Forestry. Forestry and Environmental Science. Università degli studi di Padova, Legnaro
- Marty C., Philipona R., Fröhlich e Ohmura A. (2002). Altitude dependence of surface radiation fluxes and cloud forcing in the alps: results from the alpine surface radiation budget network. *Theoretical and Applied Climatology* 72: 137-155
- Morris H., Plavcová L., Cvecko P., Fichtler E., Gillingham M. A. F., Martínez-Cabrera H. I., McGlenn D. J., Wheeler E., Zheng J., Ziemińska K. e Jansen S. (2016). A global analysis of parenchyma tissue fractions in secondary xylem of seed plants. *New Phytol*, 209 (4): 1553-1565
- Myburg A. A., Lev-Yadun S. e Sederoff R. R. (2013). Xylem Structure and function. *Encyclopedia of Life Sciences*
- Neuner G. (2014). Frost resistance in alpine woody plants. *Frontiers in Plant Science*, 5
- Olano J. M., Eugenio M., Garcia-Cervigon A. I., Folch M., e Rozas, V. (2012). Quantitative tracheid anatomy reveals a complex environmental control of wood structure in continental Mediterranean climate. *International Journal of Plant Sciences*, 173 (2): 137-149
- Pauli H., Gottfried M., e Grabherr G. (2003). Effects of climate change on the alpine and nival vegetation of the Alps. *Journal of mountain ecology*, 7: 9-12
- Pescador D. S., Sierra-Almeida Á., Torres P.J. e Escudero A. (2016). Summer Freezing Resistance: A Critical Filter for Plant Community Assemblies in Mediterranean High Mountains. *Frontiers in Plant Science*, 7
- Pittermann J., Sperry J. S., Hacke U. G., Wheeler J. K. e Sikkema E. H. (2006a). Inter-tracheid pitting and the hydraulic efficiency of conifer wood: the role of tracheid allometry and cavitation protection. *American Journal of Botany*, 93: 1265-1273
- Pittermann J., Sperry J. S., Wheeler J. K., Hacke U. G., e Sikkema E. H. (2006b). Mechanical reinforcement of tracheids compromises the hydraulic efficiency of conifer xylem. *Plant, Cell & Environment*, 29 (8): 1618-1628

- Rathgeber C. B., Cuny H. E., e Fonti P. (2016). Biological basis of tree-ring formation: a crash course. *Frontiers in Plant Science*, 7
- Ren P., Rossi S., Camarero J. J., Ellison A. M., Liang E. e Peñuelas J. (2018). Critical temperature and precipitation thresholds for the onset of xylogenesis of *Juniperus przewalskii* in a semi-arid area of the north-eastern Tibetan Plateau. *Annals of Botany*, 121 (4): 617-624
- Rixen C., Schwoerer C., e Wipf S. (2010). Winter climate change at different temporal scales in *Vaccinium myrtillus*, an Arctic and alpine dwarf shrub. *Polar Research*, 29 (1): 85-94
- Rossi S., Deslauriers A., Anfodillo T., Carraro V., Carrer M., Urbinati C., Menardi R. e Fontanella F. (2007a). Effetti della temperatura e del fotoperiodo sulla xilogenesi al limite superiore del bosco. *L'Italia Forestale e Montana*, 62 (2): 81-97
- Rossi S., Deslauriers A., Anfodillo T. e Carraro V. (2007b). Evidence of threshold temperatures for xylogenesis in conifers at high altitudes. *Oecologia* 152: 1-12
- Rossi S., Girard M. J., e Morin H. (2014). Lengthening of the duration of xylogenesis engenders disproportionate increases in xylem production. *Global change biology*, 20 (7): 2261-2271
- Rossi S., Anfodillo T., Čufar K., Cuny H. E., Deslauriers A., Fonti P., Frank D., Gričar J., Gruber A., Huang J.-G., Jyske T., Kašpar J., King G., Krause C., Liang E., Mäkinen H., Morin H., Nöjd P., Oberhuber W., Prislán P., Rathgeber C. B. K., Saracino A., Swidrak I. e Treml V. (2016). Pattern of xylem phenology in conifers of cold ecosystems at the Northern Hemisphere. *Global Change Biology*, 22 (11): 3804-3813
- Rudley D., DeSoto L., Rodríguez-Echeverría S., e Nabais C. (2023). Climate effect on the growth and hydraulic traits of two shrubs from the top of a Mediterranean mountain. *Science of The Total Environment*, 902, 165911
- Scherrer S. C., Ceppi P., Croci-Maspoli M. e Appenzeller C. (2012). Snow-albedo feedback and Swiss spring temperature trends. *Theoretical and Applied Climatology*, 110: 509-516
- Shetti R., Buras A., Smiljanic M. e Wilmking M. (2018). Climate sensitivity is affected by growth differentiation along the length of *Juniperus communis* L. shrub stems in the Ural Mountains. *Dendrochronologia*, 49: 29-35
- Słupianek A., Dolzblasz A. e Sokołowska K. (2021). Xylem Parenchyma-Role and Relevance in Wood Functioning in Trees. *Plants*, 10 (6): 1247

- Sperry J. S., Hacke U. G. and Pittermann J., (2006). Size and function in conifer tracheids and angiosperm vessels. *American journal of Botany*, 93 (10): 1490-1500
- Taschler D. e Neuner G. (2004). Summer frost resistance and freezing patterns measured *in situ* in leaves of major alpine plant growth forms in relation to their upper distribution boundary. *Plant, Cell & Environment*, 27 (6): 737-746
- Thibaut B. e Gril J. (2021). Tree growth forces and wood properties. *Peer Community Journal*, 1
- Thomas P. A., El-Barghathi M. e Polwart A. (2007). Biological Flora of the British Isles: *Juniperus communis* L. *Journal of Ecology* 95 (6): 1404-1440
- Tumajer J., Buras A., Camarero J. J., Carrer M., Shetti R., Wilmking M., Altman J., Sangüesa-Barreda G. e Lehejček J. (2021). Growing faster, longer or both? Modelling plastic response of *Juniperus communis* growth phenology to climate change. *Global Ecology and Biogeography*, 30 (11): 2229-2244
- Unterholzner L., Carrer M., Bär A., Beikircher B., Dämon B., Losso A., Prendin A. L. e Mayr S. (2020). *Juniperus communis* populations exhibit low variability in hydraulic safety and efficiency. *Tree Physiology*, 40 (12): 1668-1679
- Unterholzner L., Prendin A. L., Dibona R., Menardi R., Casolo V., Gargiulo S., Boscutti F. e Carrer M. (2022). Transient Effects of Snow Cover Duration on Primary Growth and Leaf Traits in a Tundra Shrub. *Frontiers in Plant Science, Sec. Functional Plant Ecology*, 13
- Vieira J., Carvalho A., e Campelo F. (2020). Tree growth under climate change: evidence from xylogenesis timings and kinetics. *Frontiers in Plant Science*, 11
- Vilčinskis R., Marozas V., Jocienė L. e Kupčinskienė E. (2016). Variety of habitats associated with common juniper (*Juniperus communis* L.) growing in Lithuania. *Biologija*, 62 (3): 169-179
- Von Arx G. e Carrer M. (2014). ROXAS - A new tool to build centuries-long tracheid-lumen chronologies in conifers. *Dendrochronologia*, 32 (3): 290-293
- Von Arx G., Crivellaro A., Prendin A. L., Čufar K., e Carrer M. (2016). Quantitative wood anatomy—practical guidelines. *Frontiers in plant science*, 7: 781
- Westing A. H. (1965). Formation and function of compression wood in gymnosperms. *The Botanical Review volume*, 31: 381–480

Wipf S. e Rixen C. (2010). A review of snow manipulation experiments in Arctic and alpine tundra ecosystems. *Polar Research*, 29 (1): 95-109

Xiong L., Schumaker K. S., e Zhu J. K. (2002). Cell signaling during cold, drought, and salt stress. *The plant cell*, 14 (suppl\_1): S165-S183

Zava M. (2021). Effetti su fenologia, accrescimenti e tratti fogliari in *Juniperus communis* L. in risposta alla manipolazione del manto nevoso. Relatore Carrer M., Correlatore Unterholzner L. Dipartimento Territorio E Sistemi Agro-Forestali. Scienze Forestali ed Ambientali. Università degli studi di Padova, Legnaro

## 7. SITOGRAFIA

Arpav. (2024). <https://www.arpa.veneto.it/temi-ambientali/climatologia/dati/inverno-2021-22-1>

Copernicus Europe's eyes on Earth. (2024). <https://climate.copernicus.eu/last-four-years-have-been-warmest-record-and-co2-continues-rise>

Copernicus Europe's eyes on Earth. (2024). <https://climate.copernicus.eu/esotc/2021/globe-in-2021>

Geoportale regione Veneto. Ortofoto 2021. (2024). <https://idt2.regione.veneto.it/>

Storie minerali. (2024). <https://storieminerali.it/ghiacciai-cultura/>

Wikipedia. (2024). [https://it.wikipedia.org/wiki/Juniperus\\_communis](https://it.wikipedia.org/wiki/Juniperus_communis)

Wikipedia. (2024). [https://it.wikipedia.org/wiki/Passo\\_di\\_Giau](https://it.wikipedia.org/wiki/Passo_di_Giau)

Wikipedia. (2024). [https://it.wikipedia.org/wiki/Passo\\_di\\_Falzarego](https://it.wikipedia.org/wiki/Passo_di_Falzarego)



## 8. MATERIALI SUPPLEMENTARI

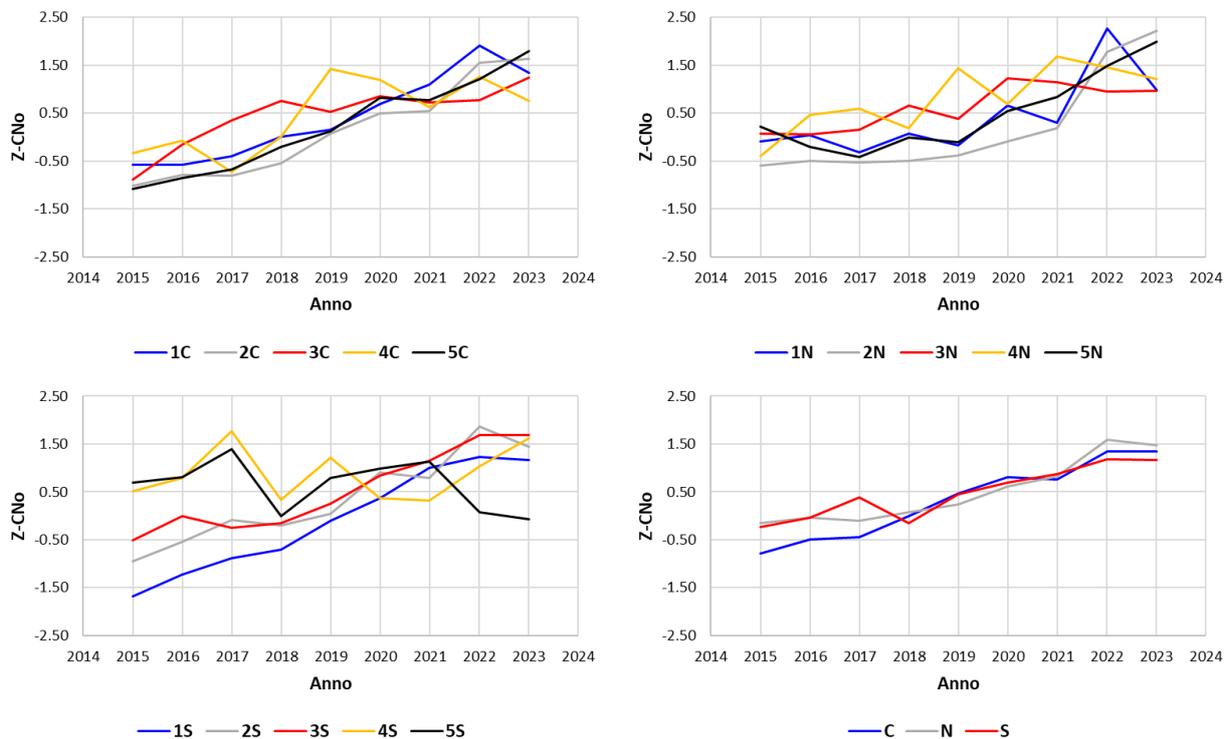


Figura S1. Serie temporali dell'indice del numero di cellule (Z-CNo) relative alle singole piante raggruppate per modalità di trattamento. In basso a destra si riportano le serie temporali medie relative ai 3 trattamenti

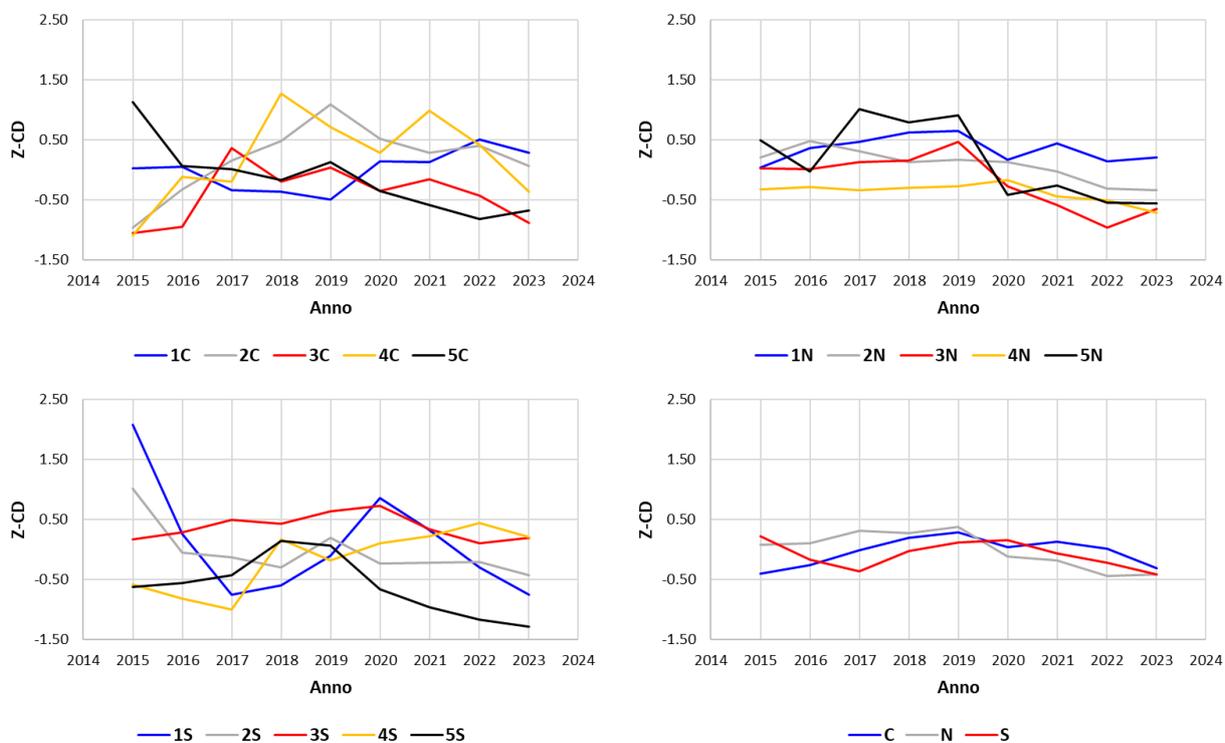


Figura S2. Serie temporali dell'indice di densità cellulare (Z-CD) relative alle singole piante raggruppate per modalità di trattamento. In basso a destra si riportano le serie temporali medie relative ai 3 trattamenti

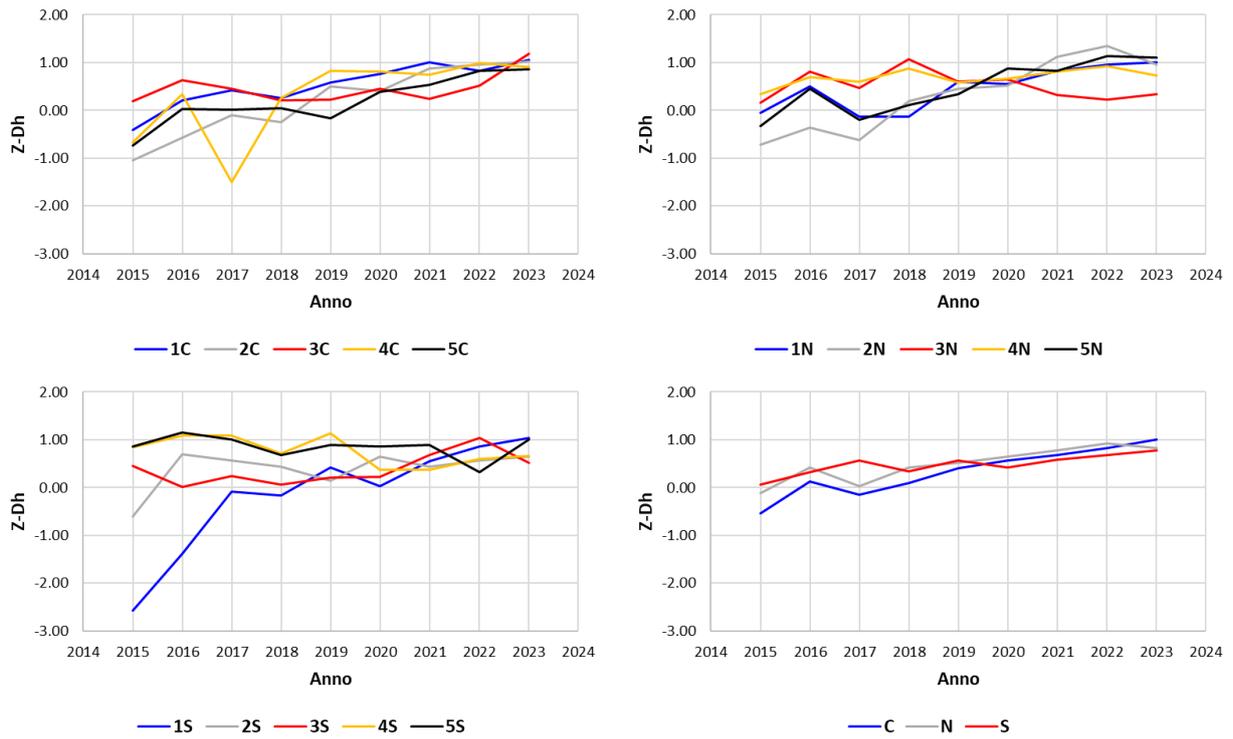


Figura S3. Serie temporali dell'indice di diametro idraulico medio (Z-Dh) relative alle singole piante raggruppate per modalità di trattamento. In basso a destra si riportano le serie temporali medie relative ai 3 trattamenti

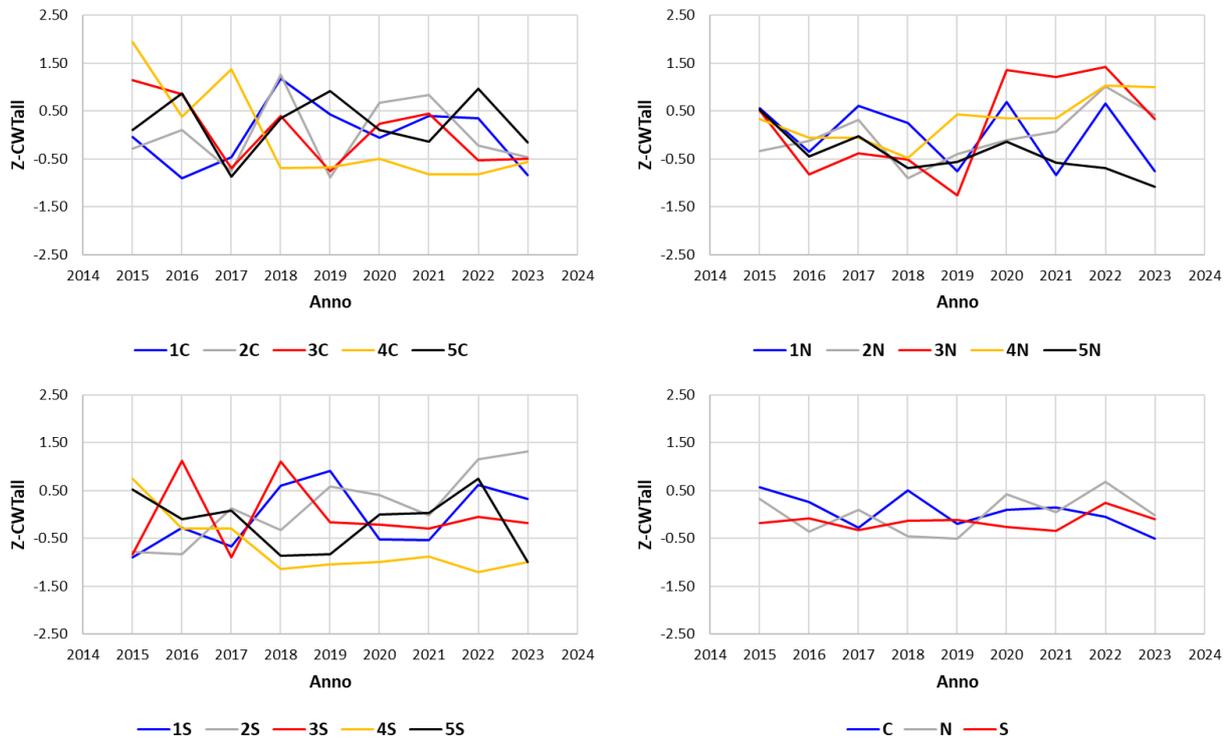


Figura S4. Serie temporali dell'indice di spessore medio di tutte le pareti cellulari (Z-CWTail) relative alle singole piante raggruppate per modalità di trattamento. In basso a destra si riportano le serie temporali medie relative ai 3 trattamenti