

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 su fenologia e accrescimenti primari in *Juniperus communis* L.

Effect of different snow cover permanence on phenology and primary growth in *Juniperus communis* L.

Relatore:

Prof. Marco Carrer

Laureando:

Francesco Paoli

Matricola n. 2018639

ANNO ACCADEMICO 2023 - 2024

INDICE

1	Introduzione	7
1.1	Cambiamento climatico	7
1.1.1	Andamento globale delle temperature ed emissioni	7
1.1.2	Criosfera e regioni di alta montagna	9
1.1.3	Effetti e conseguenze sulle specie vegetali	10
1.1.4	Ruolo della copertura nevosa	12
1.1.5	Situazione in Europa: anno 2022	13
1.1.6	Situazione attuale in Europa	14
1.2	Obiettivi.....	15
2	Materiali e Metodi	16
2.1	<i>Juniperus communis</i> : Ecologia specie e diffusione	16
2.2	Descrizione dell'area di studio	19
2.3	Sito sperimentale	22
2.4	Rilievi meteorologici.....	24
2.5	Fenologia e accrescimenti primari	25
3	Risultati e discussioni	27
3.1	Dati metereologici.....	27
3.1.1	Precipitazioni	27
3.1.2	Temperature	31
3.2	Fenologia.....	35
3.3	Analisi statistiche	45
3.4	Sperimentazione nell'anno 2023	46
4	Conclusioni	47
5	Bibliografia	49
5.1	Articoli scientifici, manuali e report.....	49
5.2	Siti web.....	51

Riassunto

Il cambiamento climatico è uno degli argomenti più discussi negli ultimi decenni ed è un fenomeno ben noto a livello globale per i suoi molteplici effetti. È confermata ormai la tendenza al riscaldamento delle terre emerse e degli oceani, la perdita di biodiversità e di interi ecosistemi, il ritiro delle calotte glaciali, l'aumento dell'intensità e della frequenza degli eventi estremi. Le comunità vegetali, e gli ecosistemi forestali in particolare, risentono dell'aumento delle temperature, delle precipitazioni estreme e degli eventi di siccità sempre più frequenti e intensi. Nelle regioni fredde, oltre all'aumento della temperatura, negli ultimi decenni è stato osservato, quasi globalmente, un cambiamento nelle dinamiche del manto nevoso, con una fusione più precoce (Xu et al., 2015). La risposta delle piante, quindi, è un aspetto importante da tenere presente per prevedere gli effetti delle modificazioni climatiche sulle comunità vegetali. Ad esempio, la riduzione della copertura nevosa e dell'umidità del suolo possono portare ad un anticipo delle diverse fasi fenologiche e un'alterazione del ritmo di crescita con potenziali modifiche anche nell'assorbimento di CO₂. Inoltre, sulle Alpi è stata osservata una migrazione delle specie vegetali dalle basse alle alte quote. Questi cambiamenti ambientali minacciano le specie che vivono nelle aree più fredde. È utile raccogliere quante più informazioni possibili sulle nuove dinamiche della copertura nevosa e sulla riduzione della permanenza per meglio comprendere come reagiranno le piante e come cambierà la composizione della vegetazione montana in futuro se la tendenza attuale continuerà.

Lo scopo di questa ricerca è valutare come il ginepro comune (*Juniperus communis* L.), la conifera con il più ampio areale di distribuzione nell'emisfero settentrionale, reagisca a diversi livelli di copertura nevosa.

A questo fine si è condotto un esperimento di manipolazione del manto nevoso al di sopra della *treeline* in ambiente alpino, dove si sono analizzate le risposte dell'arbusto in termini di fenologia e accrescimenti primari dei germogli. L'anno cui fa riferimento questa tesi è il 2022 su un periodo di sperimentazione totale che coinvolge sei anni (2018-2023).

I risultati mostrano che una durata prolungata del manto nevoso ha avuto un effetto nel periodo iniziale di crescita. Si è visto, infatti, che il tasso di sviluppo delle gemme nelle piante coperte è stato più lento rispetto agli altri trattamenti. Una durata ridotta del manto nevoso, invece, ha provocato una crescita maggiore nei primi anni a causa di una maggiore esposizione alla radiazione solare e alla disponibilità di un periodo vegetativo più lungo. Questo vantaggio si è attenuato negli anni successivi. Nel 2022 le piante scoperte hanno subito lo stress dovuto alle temperature estreme e al gelo compromettendo probabilmente lo sviluppo massimo di fine stagione. La convergenza della crescita in tutti i trattamenti osservata negli ultimi anni potrebbe rappresentare un meccanismo di acclimatazione. Si può affermare, quindi, che per una pianta con habitus prostrato, come il ginepro in alta quota, per migliorare le proiezioni delle future traiettorie di crescita in uno scenario di cambiamenti climatici, dovrebbero essere considerate non solo le temperature ma anche la frazione solida delle precipitazioni invernali.

Abstract

Climate change is one of the most discussed topics in recent decades, and to date this phenomenon is well known globally for its multiple effects. The warming trend of lands and oceans, loss of biodiversity and ecosystems, shrinking ice caps, and increasing intensity and severity of extreme events is now confirmed. Plant communities and forest ecosystems in particular are affected by rising temperatures, extreme precipitation, and increasingly frequent and intense drought events. In temperature-limited regions, in addition to the warming since the mid-20th century, a change in mountain snowpack behavior, with earlier melting, has been observed almost globally in recent decades (Xu et al., 2015). These changes are inducing shifts in geographic distributions and in phenological stages of plant species worldwide (Parmesan and Yohe 2003). Plant response, therefore, is an important aspect to keep in mind in predicting the effects of climatic changes on plant communities that may, for example, lead to earlier bud burst and flowering or a change in growth rate in relation to reduced snow cover or soil moisture and changes in CO₂ uptake as well.

In addition, a migration of woody species from low to high altitudes has been observed in the Alps due to rising temperatures. These environmental changes threaten species living in colder areas. It is useful to gather as much information as possible about new snow cover dynamics and reduced permanence to better understand how plants will respond and how the composition of mountain vegetation will change in the future if the current trend continues.

The purpose of this research is to evaluate how common juniper (*Juniperus communis* L.), the conifer with the widest range in the Northern Hemisphere, reacts to different levels of snow cover. To this end, a snowpack manipulation experiment above the treeline of the Italian Alps was carried out to assess the shrub responses to changes in snow cover duration, in terms of phenology and primary shoot growth. The year referred to in this thesis is 2022 over a total experimental period involving six years (2018-2023).

The results show that a prolonged snowpack duration had an effect in the early growth period, in which the rate of covered bud development was slower than in the other treatments, probably due to the negative effect of longer-lying snowcover. A shorter duration of snow cover, on the other hand, induced higher growth in the early years due to greater exposure to solar radiation for photosynthesis and longer growing season, but in later years this effect subsided. In 2022, the shrubs under reduced snow cover suffered stress due to extreme temperatures and frost probably compromising maximum late-season development. The convergence of growth in all treatments observed in recent years could represent an acclimation mechanism.

To improve projections of future growth trajectories in a scenario of climate change for a species with prostrate habit, such as juniper at high altitude, we should consider not only temperatures but also the solid fraction of winter precipitation.

1 Introduzione

1.1 Cambiamento climatico

1.1.1 Andamento globale delle temperature ed emissioni

I cambiamenti climatici causati dall'uomo stanno già influenzando molti fenomeni meteorologici e climatici estremi in ogni regione del mondo e fanno sì che si verifichino rapidi ed estesi cambiamenti nell'atmosfera, nell'idrosfera, nella criosfera e nella biosfera. Questo ha causato diffusi impatti negativi e relative perdite, e danni alla natura e alle persone (IPCC, 2023 AR6). Se il riscaldamento globale di questo secolo non ha precedenti negli ultimi 1000 anni, si calcola che solo il 25% circa dell'aumento di temperatura del XX secolo possa essere attribuito alla variabilità naturale (Crowley, 2000).

Tra i casi più eccezionali figurano le inondazioni, gli incendi, la siccità e il caldo estremo. Ad esempio, le emissioni globali stimate di carbonio dovute agli incendi nel 2023 sono aumentate del 30% rispetto al 2022, a causa in gran parte degli incendi persistenti in Canada.

I dati recenti forniti dal *Copernicus Climate Change Service* (C3S) mostrano come le attività umane, principalmente attraverso le emissioni di gas a effetto serra (GHG) abbiamo inequivocabilmente contribuito a causare il riscaldamento globale. Nel 2023 si è raggiunta una temperatura superficiale globale record di 1.48°C, superiore rispetto al livello preindustriale 1850-1900 (registrando 0.60°C in più del periodo 1991-2020), (figura 1.1).

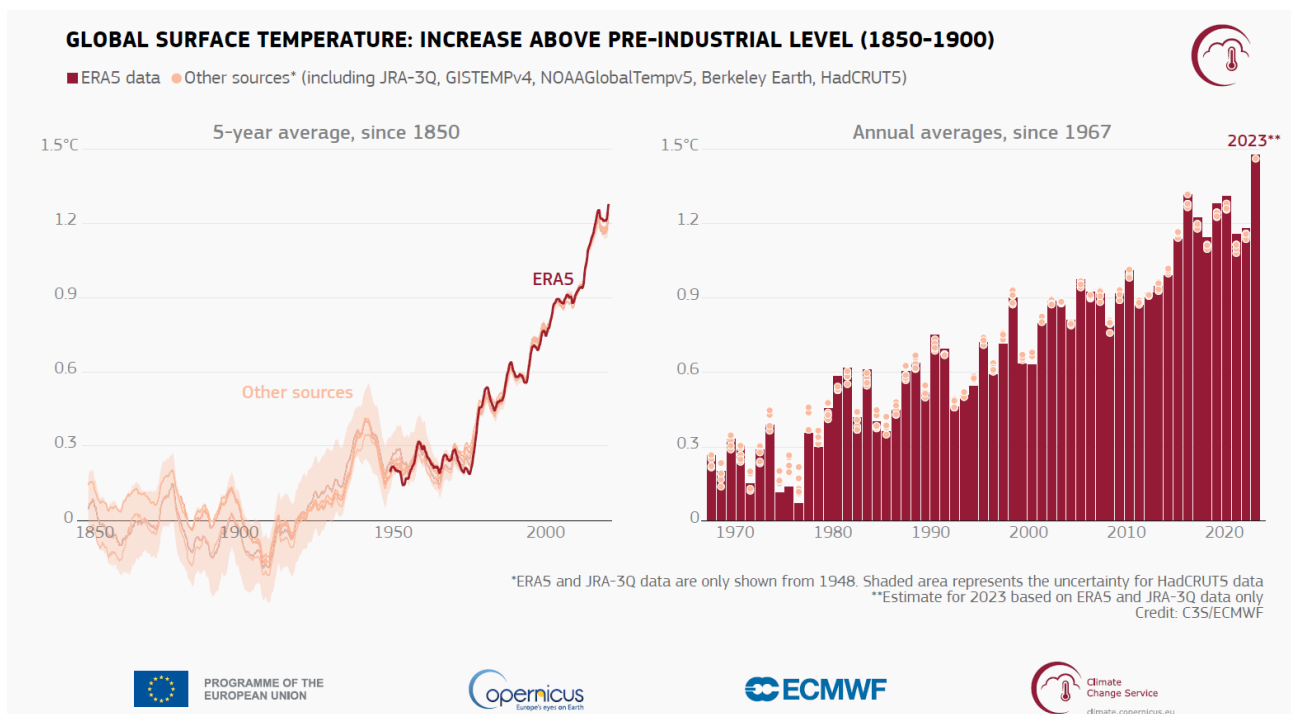


Fig. 1.1 Temperatura globale dell'aria (C°) rispetto alla media per il periodo 1850-1900. Periodo di riferimento preindustriale designato, sulla base di diversi set di dati sulla temperatura globale mostrati come medie quinquennali dal 1850 (a sinistra) e come medie annuali dal 1967 (a destra). Fonte: C3S/ECMWF.

Gli aumenti più consistenti secondo l'IPCC sono pari a 1.65°C sulla terraferma e 0.93°C per le temperature oceaniche. Le emissioni globali di GHG hanno continuato ad aumentare nel periodo 2010-2019, con contributi storici diseguali derivanti dall'uso dell'energia, dal cambiamento di uso del suolo, dagli stili di vita e dai modelli di consumo e produzione tra le regioni, tra i Paesi e all'interno di essi, e tra gli individui (IPCC, 2023 AR6). La CO₂ atmosferica ed il metano hanno continuato ad aumentare ed hanno raggiunto livelli record nel 2023, raggiungendo rispettivamente 419 ppm (circa +2.4 ppm rispetto al 2022) e 1902 ppb (circa +11 ppb), (C3S, 2023).

Il 2023 ha sostituito il 2016 come anno solare più caldo mai registrato. Secondo i dati ERA5, la temperatura media globale per il 2023 è stata di 14.98°C, 0.17°C in più rispetto a quella registrata per il 2016.

Ogni mese da giugno a dicembre nel 2023 è stato più caldo del mese corrispondente di qualsiasi anno precedente, tenendo conto che quasi il 50% dei giorni sono stati più di 1.5C° rispetto al livello preindustriale. Due giorni a novembre hanno superato, per la prima volta, la soglia di 2C° rispetto alla media. Luglio e agosto 2023 sono stati i due mesi più caldi mai registrati e l'estate boreale (giugno-agosto) è stata anche la stagione più calda mai registrata.

In generale, l'aumento annuale della temperatura media globale è stato eccezionalmente elevato dal 2022 al 2023. Esso segue la transizione di tre anni da La Niña (2020-2022) a El Niño nel 2023, anche se altri fattori hanno certamente giocato un ruolo rilevante. In tutto il mondo, la distribuzione delle anomalie della temperatura dell'aria nel 2023 infatti, mostra un netto contrasto con quella del 2022. Sebbene le anomalie di El Niño abbiano continuato a rafforzarsi contribuendo al raggiungimento di valori elevati del 2023, il fenomeno non è stato così forte rispetto alle fasi di accumulo dei forti eventi del 1997/98 e del 2015/16. Ciò dimostra che le temperature record del 2023 non sono dovute solo a El Niño quanto soprattutto al riscaldamento globale generale, anche se non è ancora disponibile un'attribuzione esaustiva per l'anno nel suo insieme.

Si sono tuttavia registrati anche alcuni cambiamenti in senso opposto nelle forzanti climatiche come l'aumento del vapore acqueo stratosferico (a causa dell'eruzione nel gennaio 2022 del vulcano Hunga Tonga-Hunga Ha'apai), la riduzione degli aerosol a causa delle minori emissioni di anidride solforosa da parte delle navi e l'avvicinarsi dell'apice nell'attuale ciclo solare.

L'OMM nelle sue previsioni decennali ha stimato nel 2022 una probabilità del 48% che la temperatura globale superasse 1.5°C rispetto al periodo preindustriale in almeno un anno tra il 2022 e il 2026. Tale probabilità è stata aumentata al 66% per il periodo 2023-2027 in un rapporto aggiornato pubblicato nel 2023.

Le previsioni per il 2024 secondo il servizio meteorologico britannico Met Office portano ad un superamento del limite di 1.5C° di aumento della temperatura media. Va ricordato come l'accordo di Parigi chiede di rimanere il più possibile vicino a tale soglia.

1.1.2 Criosfera e regioni di alta montagna

Osservazioni dei cambiamenti nella criosfera a causa dei cambiamenti climatici degli ultimi decenni, mostrano una riduzione generale del manto nevoso a bassa quota, dei ghiacciai e del permafrost (IPCC, SROCC).

Studi recenti hanno confermato con elevata affidabilità che l'estensione della copertura nevosa continua a diminuire nell'emisfero settentrionale in tutti i mesi dell'anno (IPCC, 2022). L'Artico si sta riscaldando rapidamente a causa del clima. Su ciò influiscono i feedback positivi di albedo legati alla dinamica della neve (IPCC, 2014).

Le indagini recenti riferite al 2023 mostrano come tale anno sia stato negativo per il ghiaccio marino antartico: esso ha infatti raggiunto estensioni minime record per il corrispondente periodo dell'anno in 8 mesi. Sia l'estensione giornaliera che quella mensile hanno raggiunto i minimi storici nel febbraio 2023.

L'estensione del ghiaccio marino artico invece, al suo picco annuale a marzo, è stata classificata tra le quattro più basse per il periodo dell'anno nei dati satellitari, con il valore minimo annuale di settembre che si è collocato come il sesto più basso di sempre.

Nelle regioni dove la temperatura è il fattore limitante, come gli ecosistemi artici ed alpini, gli effetti del riscaldamento globale risultano particolarmente evidenti. Infatti, dall'inizio degli anni '80 in risposta all'aumento della temperatura dell'aria e all'alterazione della copertura nevosa le temperature del permafrost sono aumentate in diverse regioni ed è stata osservata una variazione nel comportamento del manto nevoso con scioglimenti precoci (Xu et al., 2015).

La durata della copertura nevosa è diminuita in quasi tutte le regioni, soprattutto alle quote più basse, in media di 5 giorni per decennio, con un probabile intervallo da 0 a 10 giorni per decennio.

La variazione di massa dei ghiacciai in tutte le regioni montane (esclusi l'Artico canadese e russo, le Svalbard, la Groenlandia e l'Antartide) è stata ipotizzata pari a $-490 \pm 100 \text{ kg m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$ ($-123 \pm 24 \text{ Gt yr}^{-1}$) nel periodo 2006-2015. I bilanci di massa mediati a livello regionale sono stati particolarmente negativi (meno di $-850 \text{ kg m}^{-2} \text{ yr}^{-1}$) nelle Ande meridionali, nel Caucaso e nelle zone europee di Alpi e Pirenei.

Misure sparse e distribuite in modo disomogeneo mostrano un aumento della temperatura del permafrost in media di $0.19^\circ\text{C} \pm 0.05^\circ\text{C}$ per circa 28 località nelle Alpi europee, in Scandinavia, in Canada e in Asia durante l'ultimo decennio.

Il deflusso invernale è aumentato negli ultimi decenni a causa della maggiore quantità di precipitazioni che cadono sottoforma di pioggia. In alcuni fiumi il deflusso estivo e annuale è aumentato a causa dell'intensificarsi della fusione dei ghiacciai, ma è diminuito laddove l'acqua di fusione è diminuita. Queste diminuzioni sono state osservate soprattutto nelle regioni dominate da piccoli ghiacciai, come le Alpi.

Si prevede che le attuali tendenze dei cambiamenti legati alla criosfera negli ecosistemi di alta montagna continueranno e che gli impatti si intensifichino. La copertura nevosa, i ghiacciai e il permafrost continueranno a diminuire in quasi tutte le regioni per tutto il XXI secolo. Rispetto al periodo 1986-2005, lo spessore della neve a bassa quota diminuirà probabilmente del 10-40% per il 2031-2050, indipendentemente dal tipo di scenario considerato (*Representative Concentration Pathway* - RCP, scenari futuri forniti da IPCC) e per il 2081-2100, probabilmente del 10-40% per RCP2.6 e del 50-90% per RCP8.5.

Le riduzioni di massa dei ghiacciai previste tra il 2015 e il 2100 sono verosimilmente del 22-44% per il RCP2.6 e del 37-57% per l'RCP8.5. Nelle regioni con ghiacciai più piccoli e con una copertura di ghiaccio relativamente scarsa (ad esempio, Alpi europee, Pirenei, Caucaso, Asia settentrionale, Scandinavia, Ande tropicali, Messico, Africa orientale e Indonesia), i ghiacciai perderanno oltre l'80% della loro massa attuale entro il 2100, secondo le previsioni di RCP8.5. e molti ghiacciai scompariranno indipendentemente dallo scenario di emissione. Il disgelo e il degrado del permafrost aumenteranno nel corso del XXI secolo, ma le proiezioni quantitative in questo caso sono ancora scarse.

1.1.3 Effetti e conseguenze sulle specie vegetali

Negli ultimi decenni le temperature medie sono progressivamente aumentate e nei prossimi anni questa tendenza crescerà molto rapidamente. Tra le conseguenze possibili, all'interno del bacino del mediterraneo è prevista una maggiore frequenza di eventi di siccità estrema (IPCC,2014).

Va ricordato come le foreste immagazzinino quasi la metà del carbonio terrestre (Bonan, 2008) e contribuiscono a mitigare il continuo aumento della CO₂ atmosferica (Pan et al, 2011). Tuttavia, vi è una crescente preoccupazione per il destino di alcune foreste in aree soggette a siccità, poiché l'aumento della frequenza e dell'intensità degli estremi climatici, come le ondate di calore e le siccità prolungate, può rendere alcuni popolamenti particolarmente vulnerabili al deficit idrico (Bréda et al., 2006; Allen et al., 2010; Allen et al. 2015).

Si prevedono estinzioni locali o regionali per le specie che non sono in grado di adattarsi o spostarsi (Vittoz et al., 2013) inoltre, i rapidi cambiamenti di temperatura provocheranno l'estinzione di specie vegetali particolarmente adattate alle basse temperature in montagna, insieme a un drastico ricambio delle comunità vegetali alpine.

In alcune regioni, le proiezioni basate sui modelli di distribuzione delle specie prevedono un ricambio delle specie nelle comunità vegetali alpine fino al 100% entro il 2100 (Alexander et al., 2018). Attualmente le specie vegetali di media e bassa quota stanno iniziando a colonizzare le quote più elevate mentre altre, in ambienti xerici, con l'aumento delle precipitazioni, si insediano a quote inferiori (IPCC, 2022). Tali migrazioni, ad esempio, stanno già alterando le comunità vegetali che vivono nella tundra boreale e alpina.

L'effetto sulla vita delle piante è un aumento più marcato della crescita e della produttività nel bioma polare, con un'espansione diffusa degli arbusti e un rapido passaggio dagli arbusti bassi a quelli alti (Arctic 'greening') osservato in molti ecosistemi della tundra (Tape et al., 2006; Devi et al., 2008; Macias-Fauria et al., 2012; Myers-Smith et al., 2015).

Si prevede, infatti, che il riscaldamento climatico aumenti la produttività e la crescita delle piante legnose, in particolare negli ambienti limitati dalla temperatura come nelle aree a latitudini o a quote più elevate. Tuttavia, questo riscaldamento è disomogeneo dal punto di vista spaziale e variabile dal punto di vista temporale, e l'aumento delle temperature influisce in modo diverso sui biomi e sulle forme di crescita (Pellizari et al., 2017). Le risposte della crescita alla siccità, quindi, sono complesse e dipendono dalle caratteristiche della pianta, come l'età, le dimensioni e i tratti specifici della specie. Se da un lato l'alta montagna fornirà nuove e maggiori aree di habitat, dall'altro si prevede un'espansione e una riduzione dell'areale, che alle alte quote porterà a un declino delle popolazioni.

Pellizari et al., (2017) hanno analizzato come la crescita dei ginepri arbustivi e degli alberi coesistenti (specie di larice e pino) risponda all'aumento delle temperature lungo una fascia latitudinale di 5000 km che comprende siti dai biomi polari, alpini e mediterranei. I risultati mostrano forme di crescita divergenti in tutti e tre i biomi, con migliori accrescimenti nelle conifere prostrate rispetto a quelle arboree nei siti mediterranei rispetto a quelli polari e alpini. Il declino della crescita degli alberi dopo gli anni '80 nei siti mediterranei potrebbe essere indotto dallo stress da siccità amplificato dal riscaldamento climatico che in questo caso non ha, per ora, interessato il ginepro. Uno stesso fattore climatico, quindi, può dare risposte differenti. Inoltre, altri fattori come la durata della copertura nevosa potrebbero localmente giocare un ruolo fondamentale sulla crescita delle piante legnose in Europa.

Le zone di limite degli alberi sono molto sensibili al riscaldamento climatico a causa dei limiti di temperatura dell'aria e del suolo (Peters et al. 1985). Inoltre, la crescita degli alberi alle alte quote e latitudini avviene in una stagione di crescita più breve rispetto alle basse quote (Holtmeier, 2009; Körner, 2012).

In un'ottica europea gli andamenti futuri vedono continui spostamenti dell'areale delle popolazioni e si prevedono cambiamenti nella distribuzione per le principali specie arboree in tutte le regioni a 1.7°C GWL (*Global Warming Level*), con implicazioni economiche per la gestione delle foreste.

L'allungamento della stagione vegetativa in Europa settentrionale ed Europa centro-occidentale favorirà l'insediamento di specie invasive. Temperature di 3.4°C GWL renderebbero ampie parti di Europa meridionale e centro-occidentale più favorevoli alla diffusione di parassiti, come ad esempio, i coleotteri del legno, e aumenterebbero le perdite economiche dovute alla minore qualità del legname prodotto (IPCC, 2022).

Nei prossimi 50 anni le Alpi saranno interessate da un aumento della temperatura di circa 1.8°C (Rixen et al. 2010). Ciò significa che la stagione invernale sarà più calda e quindi con più precipitazioni liquide e meno neve. La variazione del manto nevoso e il suo scioglimento precoce in primavera hanno effetti notevoli sulla crescita, lo sviluppo, la vitalità e la distribuzione delle piante. Il disgelo precoce della neve provoca, da un lato, un periodo vegetativo più lungo e quindi potenzialmente una maggiore crescita degli alberi e produzione di biomassa; dall'altro, aumenta il rischio per le piante di soffrire delle gelate primaverili e della siccità estiva a causa della minore disponibilità idrica (Choler 2015).

1.1.4 Ruolo della copertura nevosa

La copertura nevosa ha una notevole importanza sul futuro di molte specie vegetali. A riprova di tale affermazione si possono consultare diversi studi. Un gruppo di ricercatori ha analizzato gli effetti specifici e combinati sulla crescita delle piante della temperatura, delle precipitazioni e della dinamica della stagione nevosa e hanno evidenziato come questa sia principalmente guidata da fattori climatici a loro volta influenzati dalla dinamica della stagione nevosa (Jonas et al., 2008).

Wipf et al. (2009) hanno analizzato il modo in cui una sostanziale diminuzione dello spessore della copertura nevosa e un suo più precoce scioglimento influenzino la fenologia, la crescita e la riproduzione delle quattro specie di arbusti nani più abbondanti in una comunità di tundra alpina; è emerso come i cambiamenti nella copertura nevosa possono avere un'ampia gamma di effetti specie-specifici.

Per quanto riguarda il ginepro comune, specie d'interesse per questo studio: è stato osservato che le modificazioni a livello climatico influenzano i modelli biogeografici e la capacità di adattamento di questa specie. Sono emerse, infatti, delle differenze regionali nelle dinamiche di crescita intra-annuali e nelle risposte ai mutamenti climatici in corso (Tumajer et al., 2021).

Uno studio di Carrer et al. (2019), sugli effetti delle precipitazioni e della dinamica del manto nevoso sulle forme prostrate della vegetazione alpina, ha rilevato un ruolo negativo della frazione solida delle precipitazioni invernali. Tale ruolo si mantiene negativo anche negli ultimi anni, nonostante la tendenza al riscaldamento. Nello specifico il prolungarsi della copertura nevosa ritarderebbe l'inizio dell'attività vegetativa e impedirebbe l'attività fotosintetica del ginepro, inducendo così un effetto negativo sulla crescita (Francon et al., 2017; Hallinger et al., 2010; Pellizzari et al., 2017; Schmidt et al., 2010).

1.1.5 Situazione in Europa: anno 2022

I Global Climate Highlights hanno rivelato che nel 2022 sono stati battuti molti record di temperatura: con un aumento di 1.4°C sopra la media quella del 2022 è diventata l'estate più calda mai registrata in Europa. Insieme alle alte temperature, vi sono stati diversi eventi estremi, tra cui intense ondate di calore, condizioni di siccità ed estesi incendi.

Il rapporto ESOTC (*European State of the Climate*) per il 2022 ha rilevato che la temperatura media per l'Europa nell'ultimo quinquennio è stata di circa 2.2°C al di sopra dell'era preindustriale (1850-1900) e che il 2022 è stato il terzo anno più caldo mai registrato, con 0.9°C al di sopra della temperatura media 1991-2020.

In generale, in Europa si registra una tendenza al rialzo nel numero di giorni estivi con stress da caldo "forte" o "molto forte", e nell'Europa meridionale lo stesso si osserva per lo "stress da caldo estremo". C'è anche una tendenza decrescente nel numero di giorni senza stress da caldo.

Nella regione artica, le temperature sono aumentate molto più rapidamente che nel resto del globo, e il 2022 è stato il sesto anno più caldo mai registrato per l'Artico nel suo complesso e il quarto più caldo per le aree artiche. Una delle regioni artiche più colpite sono state le isole Svalbard, che hanno vissuto l'estate più calda mai registrata, con alcune aree che hanno registrato temperature superiori a 2.5°C sopra la media. In Groenlandia le temperature medie del mese sono state le più alte mai registrate, fino a 8°C in più rispetto alla media. Le ondate di caldo hanno causato uno scioglimento record della calotta glaciale, con almeno il 23% della calotta impattata al culmine della prima ondata di caldo.

Uno degli eventi più significativi che hanno colpito l'Europa nel 2022 è stata la diffusa siccità. A causa di quest'ultima gran parte del continente ha registrato meno giorni di neve rispetto alla media durante l'inverno 2021-22 e, in primavera, le precipitazioni sono state inferiori alla media con maggio che ha registrato le precipitazioni più basse mai registrate.

I ghiacciai alpini hanno ricevuto pochissima neve invernale e hanno vissuto un'estate insolitamente calda. Ciò ha portato a una perdita di ghiaccio di spessore medio superiore a 3.5 m. Un bilancio di massa di -1.0 m w.e. (*water equivalent*) all'anno equivale a una perdita di spessore del ghiaccio di circa 1.1 m all'anno e corrisponde a una perdita di massa di una tonnellata per metro quadrato. L'ammontare della perdita di ghiaccio per i ghiacciai alpini è pari a oltre 5 km³ di ghiaccio. La portata fluviale per l'Europa è stata la seconda più bassa mai registrata, segnando il sesto anno consecutivo con portate inferiori alla media. In termini dell'area interessata, il 2022 è stato l'anno più secco mai registrato, con il 63% dei fiumi europei che hanno registrato portate inferiori alla media.

Nelle Alpi italiane (*figura 1.2*) c'è stato un deficit medio di nevicate pari al 45% per l'intero anno. L'1% dei punti campionati ha registrato anomalie tra il 95% e il 100% al di sotto della media. Il picco massimo di

spessore del manto nevoso su tutto l'arco alpino comprensorio è stato raggiunto a metà marzo, con un valore inferiore alla media del 60%.

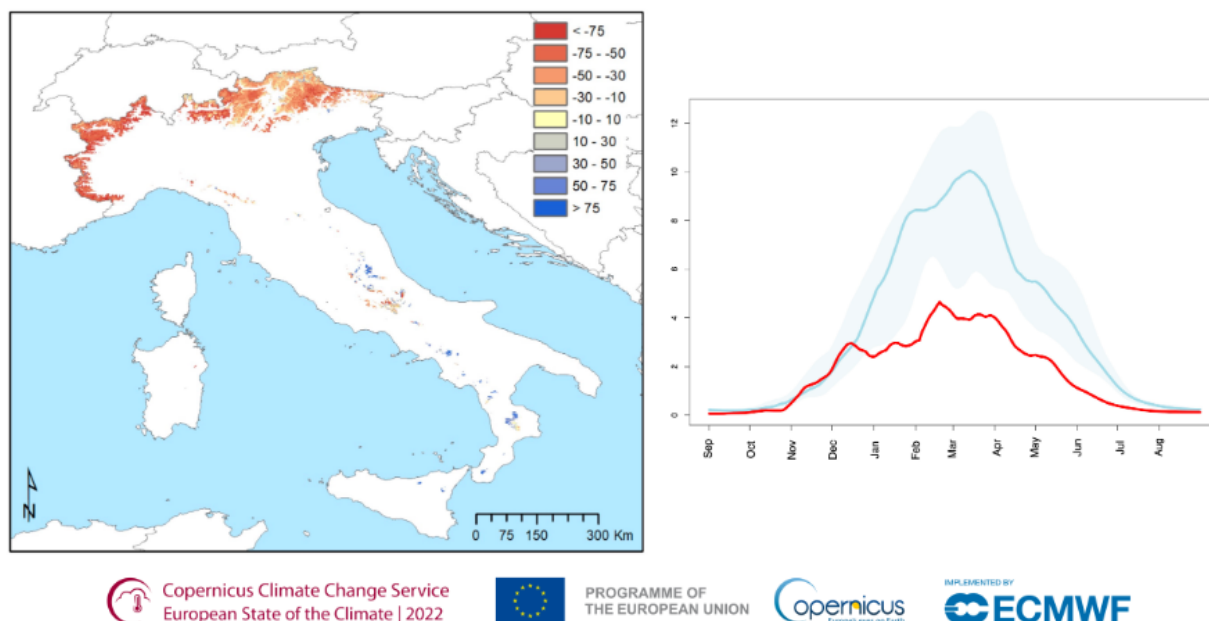


Fig. 1.2 Snow water equivalent nelle Alpi italiane: anomalie espresse in percentuale per l'anno 2022 rispetto alla media del periodo di riferimento 2010-2021 (a sinistra) e dal 1° settembre 2021 al 31 agosto 2022 (a destra), con volume (Gm^3 , linea rossa), 2010-2021 mediana (linea blu).

1.1.6 Situazione attuale in Europa

La situazione a livello del vecchio continente rispecchia l'andamento globale. Il 2023 è stato il secondo anno più caldo per l'Europa: 1.02°C in più rispetto alla media del periodo 1991-2020 e 0.17°C più freddo rispetto al 2020. Nel 2023 le temperature in Europa sono state superiori alla media per 11 mesi e settembre è stato il settembre più caldo mai registrato.

L'inverno europeo (dicembre 2022 – febbraio 2023) è stato il secondo inverno più caldo.

La temperatura media per l'estate europea (giugno-agosto) è stata di 19.63°C ; con 0.83°C sopra la media, è stata la quinta estate più calda mai registrata. L'Europa ha sperimentato ondate di calore (comprese ondate di calore a livello marino) con il superamento di numerosi record giornalieri di temperatura.

L'autunno europeo (settembre-novembre) ha avuto una temperatura media di 10.96°C , ovvero 1.43°C sopra la media. È stato il secondo più caldo mai registrato, appena 0.03°C più freddo dell'autunno 2020. Le forti precipitazioni hanno innescato significativi eventi alluvionali in tutto il continente, a partire dalla primavera.

In ambiente alpino oltre all'aumentare delle temperature, al riscaldamento globale saranno associati anche cambiamenti nella stagionalità delle precipitazioni, nella radiazione globale e nell'umidità relativa.

Di conseguenza varieranno gli eventi legati a questi fattori come inondazioni, siccità e permanenza del manto nevoso (Gobiet et al., 2014).

1.2 Obiettivi

Il ginepro comune (*Juniperus communis* L.) rappresenta una delle specie legnose più tipiche dell'ambiente di tundra e un *taxon* modello per studiare le risposte fisiologiche delle specie legnose alla variabilità ambientale in condizioni limitate dalla temperatura e al di sopra del limite del bosco (Unterholzner et al., 2022).

Nell'ambito di questo studio si è cercato di valutare l'effetto della diversa permanenza della copertura nevosa su fenologia e accrescimenti primari di questa specie .

Gli obiettivi specifici della tesi sono:

1. Analizzare le diverse fasi fenologiche, quindi sviluppo delle gemme e accrescimenti primari;
2. Analizzare le dinamiche degli accrescimenti primari;
3. Confrontare i risultati ottenuti nell'anno 2022 con quelli degli anni precedenti.

2 Materiali e Metodi

2.1 *Juniperus communis*: Ecologia specie e diffusione

Il genere *Juniperus* appartiene all'ordine delle gimnosperme e alla famiglia delle Cupressaceae (Pinophyta), comprende una sessantina di specie, che crescono in numerose varietà e sottospecie lungo una cintura che attraversa le zone climatiche temperate e subartiche dall'Europa all'Asia, fino al Giappone e poi al Nord America e alla Groenlandia meridionale.

La specie *Juniperus communis* L. si può trovare dal livello del mare sino oltre la *treeline*, più precisamente dal 15° parallelo Nord fino al 70° parallelo e oltre (Grossoni et al. 2018). Questa specie vede quindi il suo areale di distribuzione in gran parte degli habitat dell'emisfero settentrionale ad altitudini fino a 2400 m, con una sottospecie che si trova persino al di sopra del limite degli alberi nelle montagne euro-siberiane.

Il ginepro comune è la conifera più diffusa nel pianeta e l'unico taxa a essere presente sia nell'emisfero orientale che in quello occidentale (*figura 2.1*).

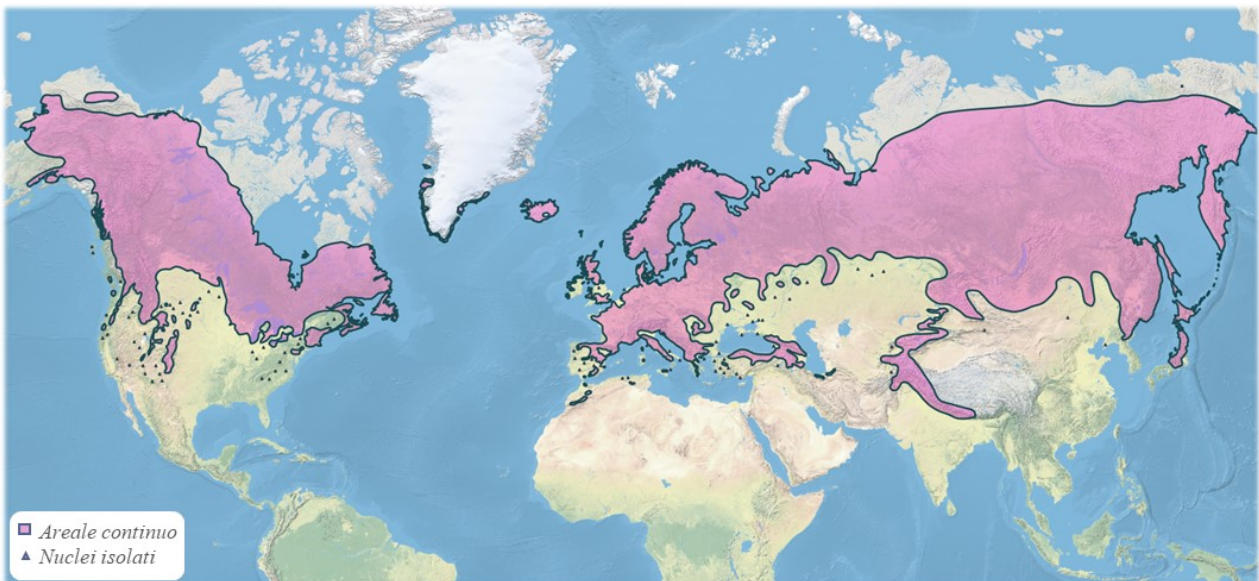


Fig. 2.1 Areale di distribuzione del *Juniperus communis* L., riadattata da Francesco Paoli. Fonte dataset: (Caudullo, Giovanni; Welk, Erik; San-Miguel-Ayanz, Jesús (2023), "Chorological data for the main European woody species", Mendeley Data, V17, doi: 10.17632/hr5h2hcg4.17)

In Europa si trova dalla Scandinavia settentrionale sino a parte della Spagna meridionale, anche se alle latitudini più meridionali è solitamente confinato nelle zone montane. In Italia, nello specifico, cresce dalla zona mediterranea fino a quella alpina (*figura 2.2*).

Nella figura 2.3 si possono osservare i diagrammi di autoecologia di questa particolare pianta, basati su osservazioni e dati a livello di continente europeo.

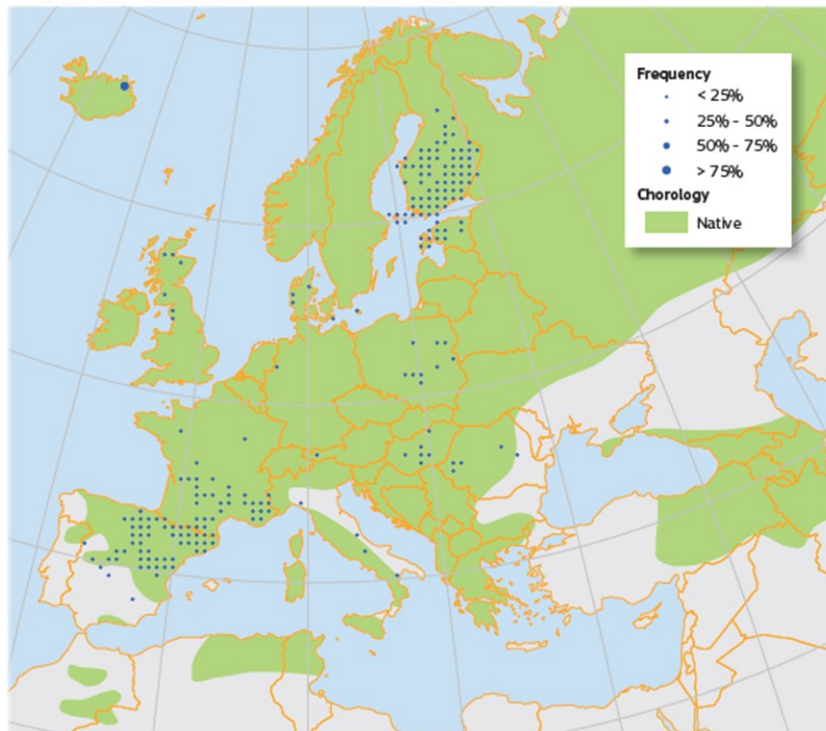


Fig. 2.2 Mappa di distribuzione e corologia semplificata di *Juniperus communis* L. Frequenza delle presenze di *Juniperus communis* all'interno delle osservazioni sul campo, come riportato dagli Inventari Forestali Nazionali. La corologia dell'areale nativo di *J. communis* è derivata da Meusel e Jäger. (Enescu, C. M., Houston Durrant, T., Caudullo, G., de Rigo, D., 2016)

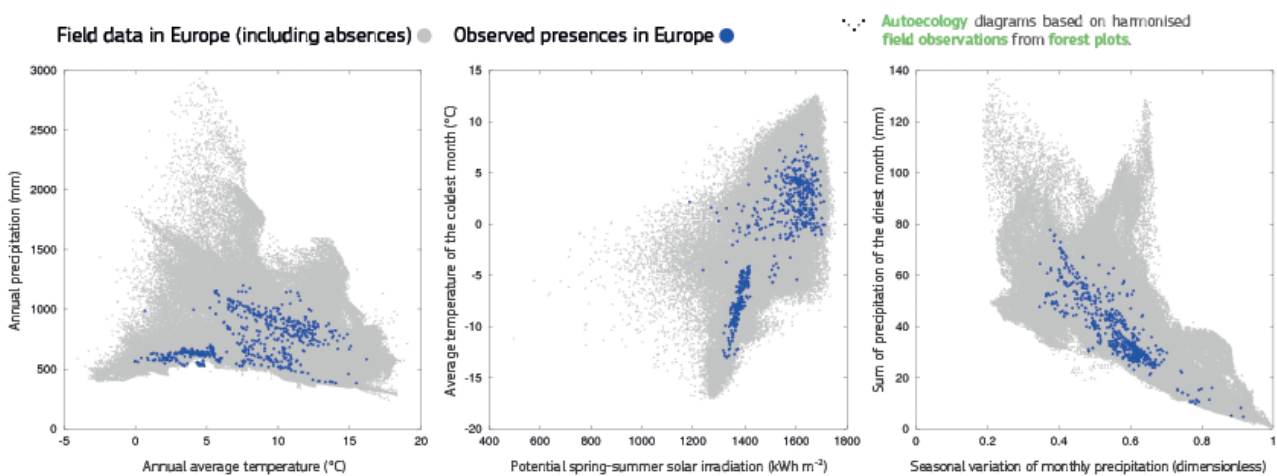


Fig. 2.3 Diagrammi di autoecologia basati su osservazioni di campo di plots forestali per *Juniperus communis* L. (Enescu, C. M., Houston Durrant, T., Caudullo, G., de Rigo, D., 2016)

Le specie di *Juniperus* hanno una radice a fittone, ma tende a espandersi orizzontalmente. Le dimensioni delle radici dipendono dalla specie e dall'ambiente (Grossoni et al. 2018). È resistente e tollerante ai terreni poveri di sostanze nutritive, alla siccità e alle basse temperature, ma non tollera l'ombreggiamento. Queste sue peculiarità fanno sì che sia in grado di caratterizzare ampie fasce del paesaggio, crescendo in una moltitudine di terreni e sulle rocce, trovandosi in praterie aperte o in popolamenti misti con latifoglie e conifere (specie pioniera). Diverse *cultivar* della specie sono anche ampiamente utilizzate come ornamentali in parchi e giardini.

Dal punto di vista ecologico è importante come fonte di cibo per numerose specie di uccelli e mammiferi selvatici, oltre che per gli animali da pascolo.

Portamento; Il ginepro comune è un tipico membro della famiglia delle Cupressaceae, dove la crescita irregolare è comune in molti taxa (Speer, 2010). È una specie polimorfa: può presentarsi come cespuglio prostrato, cespuglio eretto e raramente raggiunge le dimensioni di un piccolo albero (2-10 m), (figura 2.4); il tronco, abbondantemente ramificato, ha la corteccia che si stacca in strisce longitudinali di colore rosso-bruno. Il diametro del fusto solitamente non supera 10 cm. I rami laterali sono generalmente penduli. Il ginepro ha un legno a grana fine, con durame giallo-rossastro, con venature più scure e un albarno giallastro quasi bianco.



Fig. 2.4 Esempio di *Juniperus communis* L. a Passo Giau (Foto dell'autore)

I ginepri vecchi hanno per lo più forme prostrate e nodose, con frequenti episodi di mortalità cambiale e formazione di “strip bark” che inducono una crescita irregolare e lobata del fusto e la formazione di anelli incompleti (cfr. Fig. 3 in Pellizzari et al., 2014 o Fig. 2 in García-Cervigón et al., 2018).

Foglie; le foglie sono sempreverdi, rigide e pungenti, sessili, verticillate a tre, aghiformi 10-15mm, di forma lineare e si restringono gradatamente verso l'apice acuto che termina in una punta rigida e pungente. La superficie superiore è percorsa da una larga linea stomatica biancastra, il resto della foglia è di colore verde-grigiastro (figura 2.5).



Fig. 2.5 Foglie aghiformi disposte in verticilli di tre sul ramo con una banda di stomi bianchi sul lato superiore. (Copyright Vito Buono, www.actaplantarum.org: AP)

Fiori; Questa specie è generalmente dioica (occasionalmente monoica). I fiori sono quindi separati, si hanno, cioè, piante con soli fiori maschili e altre con soli fiori femminili; i primi sono riuniti in piccoli coni giallastri formati dalle antere protette da alcune squame triangolari, lunghi 2-3 mm (figura 2.7). Il cono maschile si trova ai margini dei rami, esteso e con 3-8 coppie di sporofilli opposti; ogni sporofillo porta 2-8 microsporangi. I coni femminili sono pedunculati, globosi e circondati da 6 brattee squamose; ogni squama porta 1-3 ovuli.

Frutti; Le diverse sottospecie di *Juniperus communis* hanno evoluto un cono femminile carnoso in cui le squame del cono sono fuse a formare un frutto sferico. Questo è spesso chiamato “pseudobacca” detta arcestida, infatti i coni maturi sono globosi (galbuli), la sfumatura di colore va dal rosso-brunastro al bluastro-nerastro e le dimensioni variano da 3 a 20 mm di diametro. Le squame sono persistenti, spesse e carnose (perché ricche di acqua e resine). I semi sono 1-3 per ogni squama, da rotondi a sfaccettati, lunghi 3-4 mm,

di colore bruno chiaro, privi di ali e ricoperti da un guscio duro che impedisce all'acqua e ai parassiti di entrare. Durante la maturazione il colore dei galbuli cambia dal verde chiaro al rosso-violetto, in un periodo di circa 18 mesi (figura 2.6). La dispersione dei semi è normalmente di tipo zoocoro grazie agli uccelli o altri animali.

Maturano nel secondo o terzo anno: contengono ben 30% di zucchero e oli essenziali aromatici e sono utilizzate a scopo alimentare per insaporire crauti e selvaggina ma anche per caratterizzare alcolici come il gin, il jenever olandese e lo Steinhäger tedesco. In grandi quantità, tuttavia, possono irritare i reni.

Considerando l'entità del suo areale, la crescita di *J. communis* L. è soggetta a fattori differenti a seconda della regione in cui questo trova sviluppo: nella zona dell'Artico è influenzato dalle basse temperature mentre per le Alpi orientali dall'ammontare delle precipitazioni invernali (Carrer et al., 2019). Bisogna comunque ricordare che le dinamiche di adattamento e crescita sono in gran parte influenzate dai cambiamenti climatici regionali (Tumajer et al., 2021).

La regione alpina, ed in particolare la sua zona orientale, presenta una marcata limitazione delle dinamiche di crescita estiva, probabilmente attribuibile al protrarsi della copertura nevosa al suolo.

In alcune recenti ricerche si è osservato come l'accrescimento del ginepro risulti più influenzato dalle precipitazioni che dalle temperature, con una forte risposta negativa rispetto alle precipitazioni invernali che alle alte quote si manifestano generalmente in forma solida.

La copertura nevosa, infatti, limita il periodo di produzione primaria; quindi, con temperature più elevate la crescita aumenta indirettamente per l'allungamento del periodo vegetativo (Carrer et al., 2019). Tuttavia, è possibile supporre che altri fattori importanti per la crescita del ginepro siano comunque presenti o attualmente latenti (Tumajer et al., 2021).

2.2 Descrizione dell'area di studio

L'area studio è situata nelle Alpi Orientali italiane nei pressi di Passo Giau, (figura 2.8). Il Passo Giau è una forcella che mette in comunicazione Cortina d'Ampezzo con Selva di Cadore, la Val Fiorentina e Colle Santa Lucia, tutte situate all'interno della Regione Veneto e più precisamente in territorio bellunese.

È un Passo particolarmente panoramico e tra i più elevati delle Dolomiti (2236 m s.l.m), collocato ai piedi del Monte Nuvolau (2574m) e del Monte Averau (2647 m), (figura 2.9).



Fig. 2.6 Rami di *Juniperus communis* L. Visibili i coni femminili a maturazione (Foto di Zappino)



Fig. 2.7 Rami di *Juniperus communis* L. Visibili i coni maschili (Fonte: C.Giordano/EUFORGEN)



Fig. 2.8 Localizzazione dell'area studio all'interno delle Alpi.
Derivata da immagini EOSDID Worldview.

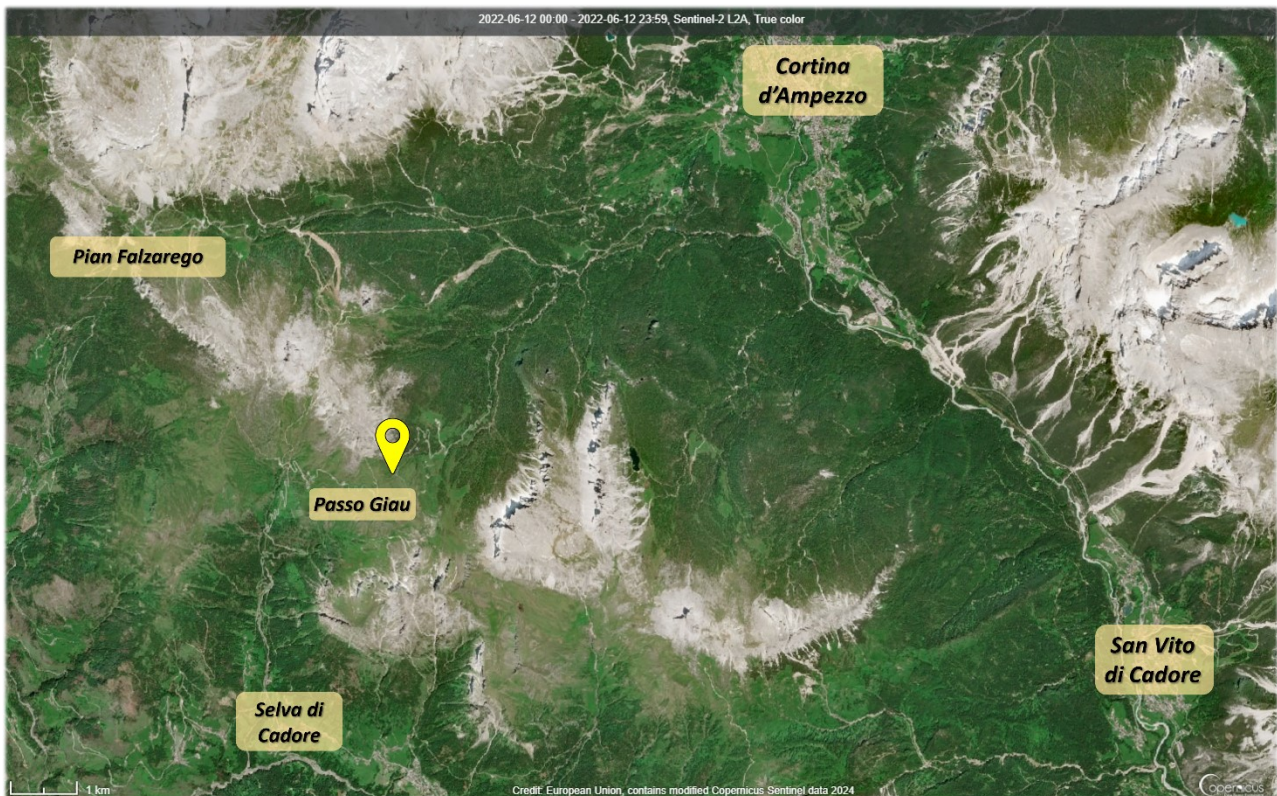


Fig. 2.9 Inquadramento dell'area studio (📍) nei pressi di Passo Giau (Immagine Copernicus Sentinel data, modificata).

In quest'area l'orografia complessa gioca un ruolo chiave nel determinare l'accentuata variabilità spaziale non solo delle temperature ma anche di altre variabili meteorologiche quali le precipitazioni, i venti, l'umidità relativa e la radiazione solare. Il lungo permanere di copertura nevosa, specie alle quote più elevate e nei versanti esposti a Nord, si traduce in un prolungamento della fase invernale e in un conseguente ritardo nell'affermarsi di condizioni primaverili. La morfologia delle valli favorisce la formazione di microclimi, specie in inverno, che rappresentano un elemento non trascurabile nell'inquadramento climatico di un territorio (Barbi et al., 2011).

Attualmente vengono utilizzati diversi sistemi di classificazione climatica: al fine di caratterizzare quello presente nell'area studio, si riporta quello di Köppen-Geiger aggiornato da Peel et al. nel 2007. Il **clima** secondo questa classificazione si contraddistingue per appartenere al gruppo "Dfc" (*Cold-Without dry season-Cold summer*) ($T_{hot}>10$ & $T_{cold}<0$). In generale, l'area di studio ricade nella definizione di bioma alto-subalpino (caratterizzato dalla linea altimetrica al di sopra della *timberline*). Presenta quindi inverni rigidi ed estati fresche, senza stagione secca.

Le precipitazioni sono elevate, intorno a 1400 mm e uniformemente distribuite nel corso dell'anno.

In alta montagna l'intensità e la direzione dei venti sono regolate dalle grandi correnti atmosferiche, talvolta all'origine di vere e proprie tempeste di vento, in particolare con forti flussi da nord, che possono determinare, anche nelle valli, violenti raffiche e condizioni di *föhn*.

La **morfologia** della zona deriva da una notevole successione di fenomeni di tettonica e geo-formazione. L'orografia di un territorio è fortemente condizionata dalla sua storia geologica; le Dolomiti, formate per l'appunto da dolomia (roccia sedimentaria composta principalmente dal minerale dolomite, $CaMg(CO_3)_2$), sono antiche scogliere coralline, separate da bracci di mare; esse portano ancor oggi un'impronta fortemente individuale e separata le une dalle altre, al contrario di altre porzioni delle Alpi, che assumono di più la fisionomia di "catene montuose" vere e proprie. La dolomia viene suddivisa in base all'età di formazione in tre tipi diversi (Bosellini, 1989). L'area che va dal Monte Nuvolau al Passo Giau è costituita dalla dolomia post-vulcanica o Cassiana, formata durante il periodo Ladiniano in seguito a diversi eventi vulcanici e movimenti tellurici.

Dal punto di vista botanico, il sito è caratterizzato da numerose specie vegetali, tipiche della vegetazione alpina. Ne vengono ora riportate alcune rappresentative (M. Da Pozzo, C. Argenti, C. Lasen, 2016):

- **Amaryllidaceae:** *Allium victorialis* L.; *Allium schoenoprasum* L.
- **Aspleniaceae:** *Asplenium seelosii* Leyb.
- **Asteraceae:** *Doronicum columnae* Ten.
- **Brassicaceae:** *Draba tomasii* W.D.J. Koch. = *Draba stylaris* W.D.J. Koch; *Hornungia alpina* (L.) O. Appel ssp. *brevicaulis* (Spreng.) O. Appel = *Pritzelago alpina* ssp. *brevicaulis* (Spreng.) Greuter & Burdet
- **Caryophyllaceae:** *Minuartia cherlerioides* (Hoppe) Bech. ssp. *Cherlerioides*
- **Campanulaceae:** *Campanula morettiana* Rchb.
- **Fabaceae:** *Astragalus alpinus* L., *Astragalus australis* (L.) Lam.; *Oxytropis campestris* (L.) DC.
- **Gentianaceae:** *Gentianella tenella* (Rottb.) Borner
- **Liliaceae:** *Gagea fragifera* (Vill.) Ehr. Bayer & G. López
- **Orchidaceae:** *Cypripedium calceolus* L.
- **Primulaceae:** *Androsace hausmanni* Leyb.; *Primula halleri* J. F. Gmel.
- **Poaceae:** *Trisetaria spicata* (L.) Paunero ssp. *Ovatipaniculata* Banfi & Soldano

- **Rosaceae:** *Potentilla brauneana* Hoppe
- **Ranunculaceae:** *Pulsatilla vernalis* (L.) Mill.; *Ranunculus glacialis* L.; *Ranunculus kuepferi* Greuter & Burdet ssp. *orientalis* W. Huber
- **Salicaceae:** *Salix foetida* Schleich.; *Salix glaucosericea* Flod.
- **Saxifragaceae:** *Saxifraga adscendens* L.

I nardeti del Passo Giau meritano una menzione per le spettacolari fioriture di arnica, genziana punteggiata e rododendro ferrugineo che ammantano i pendii sommitali.

Infine, essendo in corrispondenza della *treeline*, si ha una presenza sporadica e irregolare di: *Larix decidua* Mill., *Pinus mugo* Turra, *Pinus cembra* L. e *Picea abies* L. Karst.

2.3 Sito sperimentale

Il sito sperimentale coinvolto in questo studio si posiziona sopra il limite degli alberi, nei pressi di Passo Giau, alla quota di 2155 m s.l.m., e precisamente nel comune di San Vito di Cadore (BL), (coordinate SR WGS84 - 46°29'10"N; 12°03'23"E) (figura 2.10).

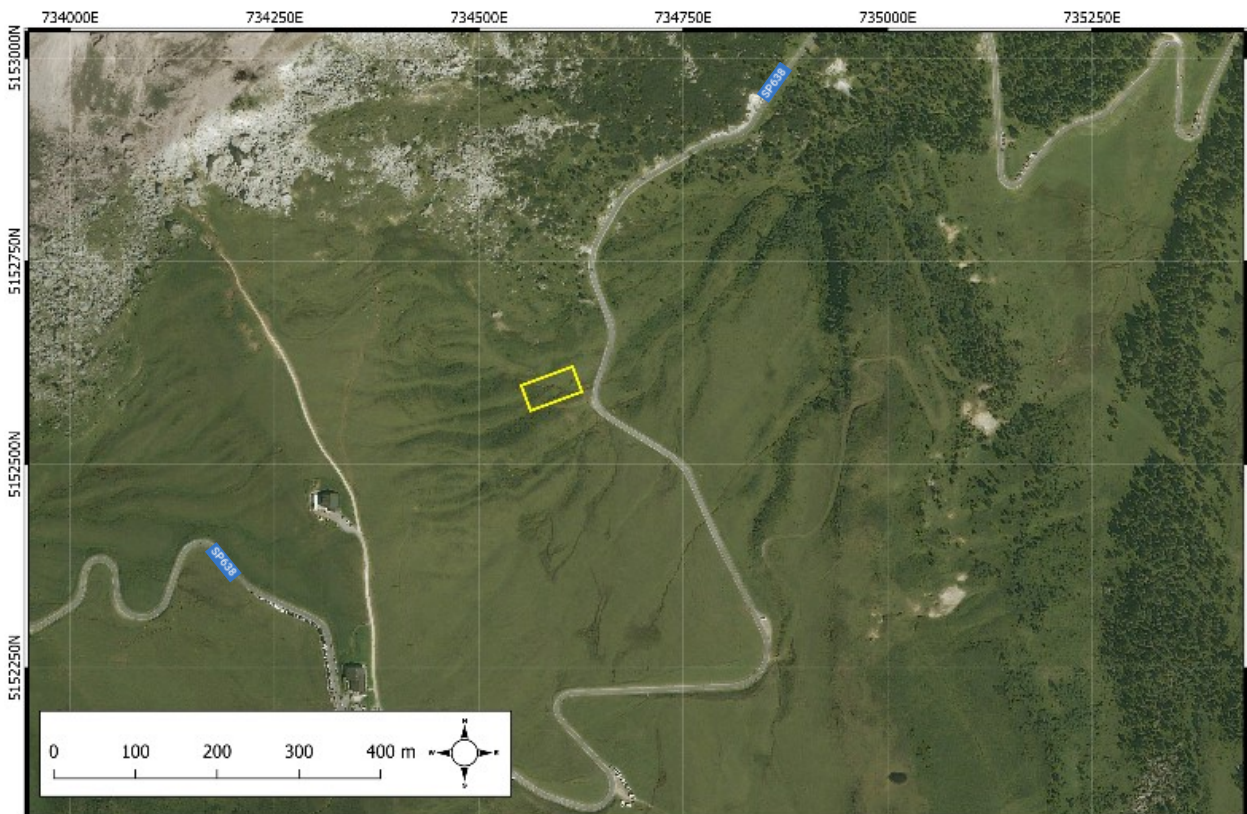


Fig. 2.10 Sito sperimentale a Passo Giau definito dal rettangolo giallo presente in figura.
Sistema di coordinate WGS84-EPSS 32632

L'area presenta omogeneità morfologica e abbondanza di individui di *Juniperus communis* posizionati lungo una cresta che segue la linea di massima pendenza. L'esposizione risulta essere Est/Sud-Est e la pendenza è di circa 20°. Il substrato è siliceo e i suoli sono costituiti da *leptosol* profondi (ARPAV-Servizio Osservatorio Suolo e Bonifiche 2011).

Il sito è distribuito su una particella di grandezza pari a circa 30 m x 4 m, definendo così una superficie di 120 m², quasi completamente coperta dalla specie target, nella quale sono stati identificati 15 arbusti chiaramente distinti l'uno dall'altro.

Il sito è stato scelto anche per la sua accessibilità: essendo a pochi metri dalla strada pubblica (SP638), quindi facilmente raggiungibile in auto, in modo da favorire gli interventi di manipolazione del manto nevoso, le ripetute misurazioni dei diversi caratteri fenologici e le operazioni di campionamento.

Dal momento che il sito si trova in un'area dedita all'attività pascoliva, per evitare danni alle piante da parte degli animali, in primavera-estate si procede con l'installazione di una recinzione provvisoria. Inoltre, nel periodo autunnale vengono posizionate presso le piante oggetto di studio delle paline in ferro per consentire una immediata localizzazione degli individui analizzati anche durante i mesi invernali (figura 2.11).



Fig. 2.11 Immagini del sito sperimentale. In primavera si può intravedere la recinzione posta a protezione delle piante (sinistra). D'inverno si possono notare le paline utilizzate per localizzare le piante coperte dalla neve (destra).

Nell'area è presente anche una webcam che scatta una foto del sito ogni 15 minuti e viene utilizzata principalmente durante la stagione invernale per verificare la quantità di copertura nevosa e le dinamiche di scioglimento (figura 2.12). Essa è estremamente utile per pianificare le attività da svolgere in campo e per eseguire le operazioni di manipolazione del manto nevoso. Le date in cui si decide di intervenire infatti, dipendono dalle condizioni meteorologiche che possono variare significativamente di anno in anno.



Fig. 2.12 Webcam nelle vicinanze del sito sperimentale

L'esperimento è iniziato nel 2017, con i successivi e primi rilievi effettuati nel 2018.

I 15 esemplari di ginepro comune identificati, divisi in 3 diversi gruppi formati da 5 piante l'uno, sono stati sottoposti nel corso del tempo sempre allo stesso tipo di trattamento.

Il primo, identificato con la dicitura "S" (scoperto), è rappresentato dalle piante sulle quali, verso la fine della stagione invernale, si procede alla rimozione manuale della neve depositatasi per simulare un suo scioglimento precoce. Al fine di evitare di danneggiare le piante durante questa operazione, si posizionano in autunno delle reti metalliche a maglia fine sopra ogni singolo individuo (figura 2.13).

Il secondo gruppo, "C" (coperto), prevede il prolungamento della copertura nevosa sulle piante riportando manualmente, quando necessario, la neve dalle zone circostanti e utilizzando dei teli termici isolanti e riflettenti (imbottitura in alluminio e poliestere) di circa 1.5 mm di spessore. Il tutto, permette di ritardare lo scioglimento del manto nevoso e di modificare le condizioni di albedo e simulare così la fusione tardiva dell'innevamento, posticipando il più possibile la ripresa vegetativa di queste piante (figura 2.13).

Il terzo gruppo di piante, "N" (controllo), non sono sottoposte ad alcun trattamento in modo da avere un riferimento naturale e indisturbato nei confronti della relazione copertura nevosa-pianta.



Fig. 2.13 Immagini del sito sperimentale. Rete di protezione in trattamento S in data 24/02/2022 (sinistra).
Visione di 4 individui soggetti a trattamento C e il 3S in data 19/04/2022 (destra).

2.4 Rilievi meteorologici

L'area oggetto di studio dispone di una stazione meteorologica alimentata da un pannello solare, installata e posta in funzione dall'Università di Padova nel settembre 2017 (figura 2.14). Ogni 15 minuti effettua due misurazioni di temperatura dell'aria a un'altezza di 2 metri dal suolo. Ulteriori sensori consentono di monitorare la temperatura dei fusti e del suolo (10 cm di profondità). I sensori per la misura della temperatura sono termocoppie di tipo K [Chromel (Ni-Cr) (+)/Alumel (Ni-Al) (-)] con un ambito di misurazione compreso tra -129°C e 682°C, una sensibilità di 41 μ V/°C e una precisione minima di +/-0.5°C.

Viene registrato anche il contenuto idrico del suolo (SWC) con il metodo TDR (*Time Domain Reflectometry*), attraverso sonde precedentemente calibrate per il tipo di suolo (precisione $\pm 2\%$; Campbell Scientific co. Mo. SC615) (Unterholzner et al., 2022), (sensori umidità: piezometro e igrometro).

Operando attraverso un personal computer è possibile scaricare i dati registrati dal *DataLogger* presente alla base della stazione (*figura 2.15*).



Fig. 2.15 Personal computer connesso al DataLogger



Fig. 2.14 Stazione meteorologica nel sito sperimentale

2.5 Fenologia e accrescimenti primari

Le misurazioni hanno avuto inizio nel 2018 e hanno riguardato inizialmente 1 ramo per pianta (15 rametti). Rappresentando un campione ridotto, vista anche la notevole variabilità nelle misure tipica della specie, l'anno successivo (2019) si è ritenuto necessario aggiungere altri due rametti per pianta, passando a 3, con 3 rami secondari per singolo trattamento ($n=135$). Dal 2020 sono stati aggiunti altri 3 rami per pianta con i rispettivi 3 rami secondari, aumentando ulteriormente i dati a disposizione ($n=270$ misurazioni totali).

L'aumento della numerosità campionaria consente di ottenere risultati più robusti, isolando eventuali anomalie, offrendo l'opportunità di risolvere problematiche in corso d'opera, come la rottura o danneggiamento accidentale di una parte della pianta e potenzialmente gestire la notevole variabilità inter- e intra-individuo propria della specie.

Le misurazioni dell'allungamento del getto apicale iniziano quando il germoglio della gemma inizia a svilupparsi. L'allungamento è stato misurato con un calibro (misura raccolta dalla base del germoglio fino a circa metà/un terzo della sua dimensione) tendenzialmente una volta alla settimana, nel periodo in cui la crescita è più rapida. Successivamente, constatato il rallentamento dello sviluppo, le misure sono state raccolte ogni 15 giorni fino alla cessazione degli accrescimenti. I germogli raggiungono la loro lunghezza massima solitamente nel mese di settembre.

Ogni pianta è stata numerata con cartellino colorato, collocato alla base del fusto principale che riporta diversi codici alfanumerici. Il codice è composto da una lettera ed un numero. La lettera indica il tipo di

trattamento effettuato (*C, S, N*) e il numero il gruppo di appartenenza della pianta da 1 a 5 (ad esempio *1C, 1S, 1N, 2C, 2S, 2N, 3C, 3S, 3N...*).

A livello di rametti invece si indentificano le gemme di riferimento con apposite fascette di plastica aventi numero da 1 a 6 e la lettera A,B o C (*1A, 1B, 1C, 2A, 2B, 2C, 3A, 3B, 3C... 6A, 6B, 6C*), (figura 2.16).



Fig. 2.16 Identificazione della pianta mediante cartellino rosso (2S) e fascette arancioni nei singoli rametti (sinistra) e misurazione dei getti apicali effettuata con il calibro in prossimità del campione 1N-5A e 4N-5B (destra).

Il monitoraggio dello stadio di crescita delle singole gemme è stato eseguito su base visiva seguendo la codifica utilizzata negli anni precedenti:

- 0: chiusa o morta;
- 1: piccola, poco turgida, chiusa;
- 2: molto turgida, chiusa;
- 3: grande, aperta con inizio allungamento;
- 4: ramo in fase di estensione

Tale procedura di rilievo di norma comincia poche settimane dopo aver rimosso le coperture agli individui *C*, con il completo scioglimento del manto nevoso.

3 Risultati e discussioni

3.1 Dati meteorologici

In riferimento ai rilievi eseguiti per la stagione 2022 la tabella 1 illustra lo sviluppo temporale delle fasi chiave dell'esperimento nel corso dei mesi. Nello specifico, la manipolazione del manto nevoso è iniziata il 24 febbraio con la rimozione della neve dalle piante S. Questa operazione si è protratta sino a quando le condizioni meteorologiche lo hanno reso necessario.

Le coperture negli individui C sono state rimosse il 10 maggio e tali piante hanno cominciato ad avere dei rami esposti alla radiazione solare diretta già a partire dal 16 maggio. Nel 2022, quindi, si è ottenuta una differenza di copertura tra i due trattamenti, scoperti e coperti, di 82 giorni.

Gli anni precedenti, dal 2018 al 2021, le differenze erano risultate di 88, 132, 66 e 71 giorni.

Mese	Manipolazione manto nevoso	Sviluppo gemme	Allungamento germoglio
Febbraio			
Marzo			
Aprile			
Maggio			
Giugno			
Luglio			
Agosto			
Settembre			

Tabella 1. Riepilogo su base mensile delle diverse fasi che hanno coinvolto le piante campionate. Riferimento all'anno 2022.

3.1.1 Precipitazioni

I dati presi in considerazione appartengono a due stazioni meteorologiche ARPAV entrambe collocate a circa 5 km dal sito sperimentale. La prima, è situata a Nord del sito e precisamente sul Passo Falzarego ad una quota di 2090 (m s.l.m.), coordinate (EPSG:4258) 12.00683651E; 46.51873107N, mentre la seconda si trova a sud del sito, a Ponte Rio Cordon (Selva di Cadore), quota 1764 (m s.l.m.), coordinate (EPSG:4258) 12.09595652E; 46.45098415N.

Le misurazioni sono espresse in millimetri di precipitazione giornaliera; si classifica come giorno piovoso il giorno con un quantitativo di precipitazione ≥ 1 mm.

Nel corso dell'annata 2022 (figure 3.1 e 3.2), contraddistinta dalla linea di colore rosso, si osservano andamenti simili in entrambe le stazioni meteorologiche prese in considerazione. La distribuzione dei dati rispecchia gli andamenti stagionali della zona, anche se sotto la media, determinando una distribuzione abbastanza omogenea nel corso dell'anno.

In dettaglio, si individuano tre momenti significativi; fine aprile-inizio giugno, fine luglio-inizio settembre e fine ottobre-metà dicembre. I picchi massimi riscontrati sono pari a 45.6 mm ad inizio giugno, nella stazione di Passo Falzarego e 40 mm nel mese di luglio a Ponte Rio Cordon.

Alcune sporadiche precipitazioni si sono manifestate tra marzo e aprile e fenomeni unicamente legati a Ponte Rio Cordon a inizio gennaio e metà febbraio. Esclusi questi due ultimi eventi, è chiaro come la stagione invernale 2021-2022 e in particolare il periodo tra l'inizio di dicembre 2021 sino ad inizio aprile 2022, si contraddistingua per la quasi totale assenza di precipitazioni.

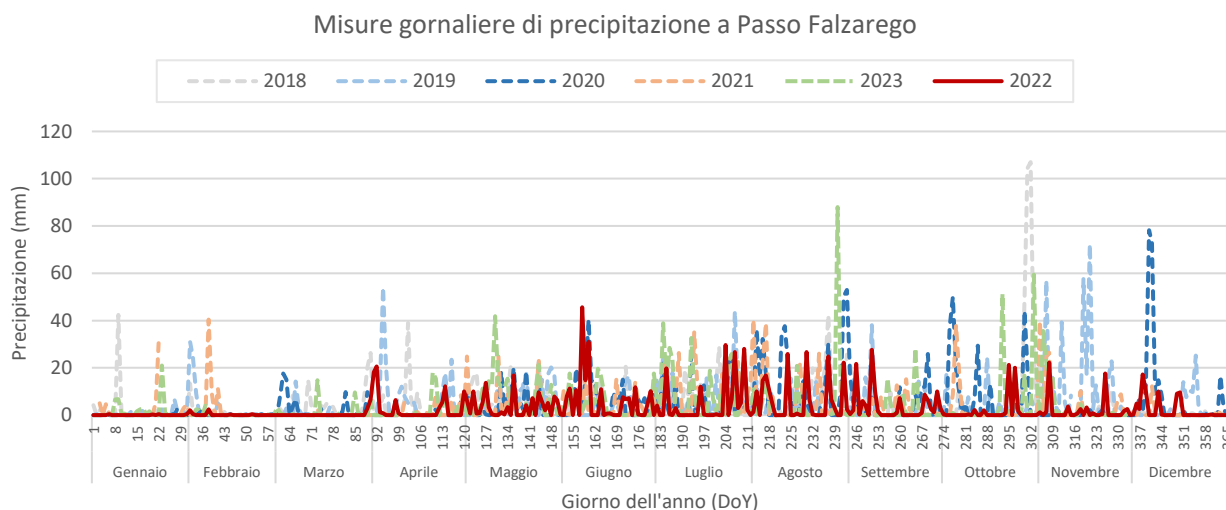


Figura 3.1 Quantità di precipitazioni su base giornaliera registrate a Passo Falzarego negli anni 2018-2023

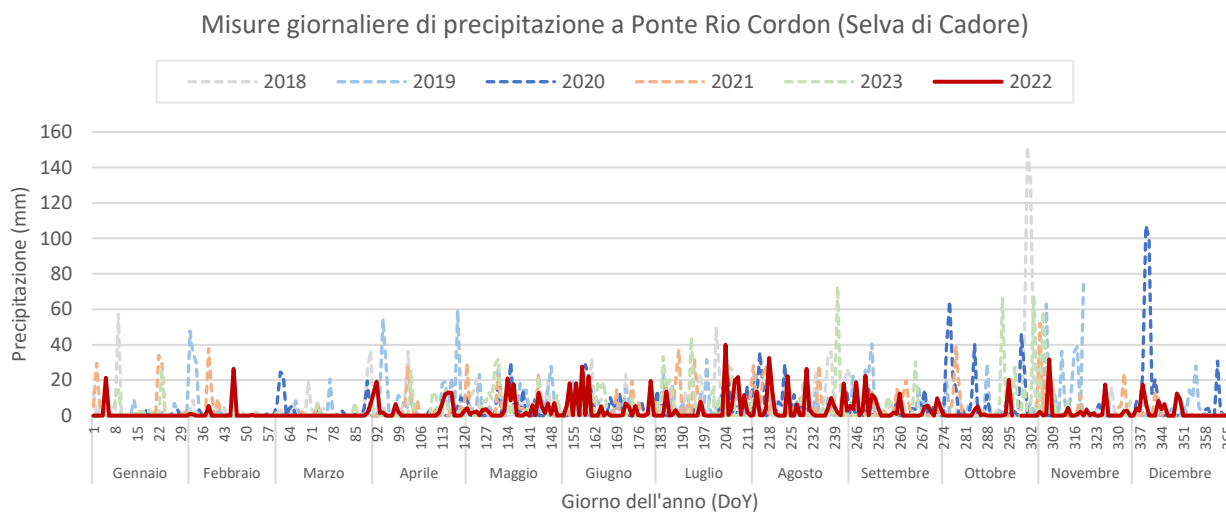


Figura 3.2 Quantità di precipitazioni su base giornaliera registrate a Ponte Rio Cordon negli anni 2018-2023

Alla luce del fatto che le due stazioni metereologiche hanno registrato valori molto simili, d'ora in poi si riporteranno unicamente i valori di Passo Falzarego, posto a quota paragonabile a quella del sito sperimentale.

Si può notare (figura 3.3) come l'annata 2022 sia stata la più secca mai registrata dal 2018. Andando ancora più a ritroso con le misurazioni e confrontando i dati con la media 1992-2023 è chiaro come il 2022 si configuri come un anno decisamente estremo da questo punto di vista. Nello specifico, il valore cumulato a fine anno è pari a 991 mm contro il valore di 1262 mm della media 1992-2023. Il valore massimo, invece, pari a 1577 mm, è stato registrato nel 2020.

Osservando anche il 2021 (1076 mm) emerge come le due annate precedenti all'effettuazione dei campionamenti siano state particolarmente scarse di precipitazioni.

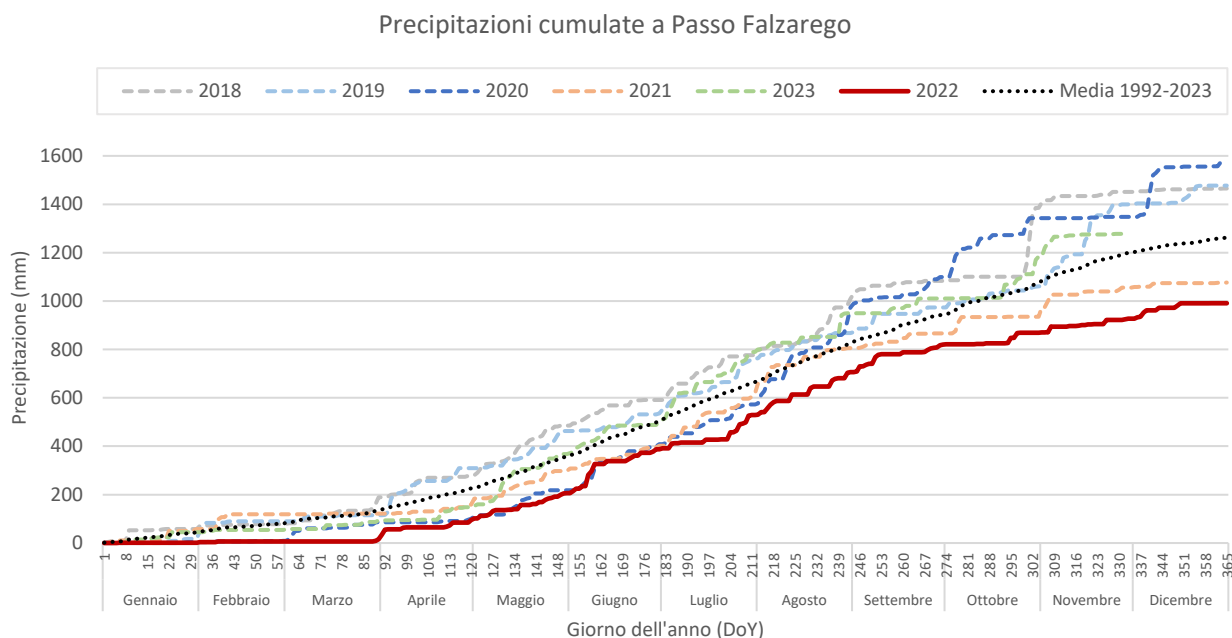


Figura 3.3 Precipitazioni (mm) cumulate nell'intervallo 2018-2023 e media 1992-2023.

Concentrandosi sulla precipitazione nevosa, in figura 3.4 è possibile osservare l'altezza del manto nevoso misurato da ARPAV per l'area identificata come "Dolomiti Nord". Tale zona, comprende anche l'area del Passo Giau ed evidenzia una netta diminuzione del manto nevoso nell'inverno 2021-2022 rispetto alla media 1989-1990/2020-2021. In particolare, il 2022 presenta valori al di sotto la media da gennaio a giugno.

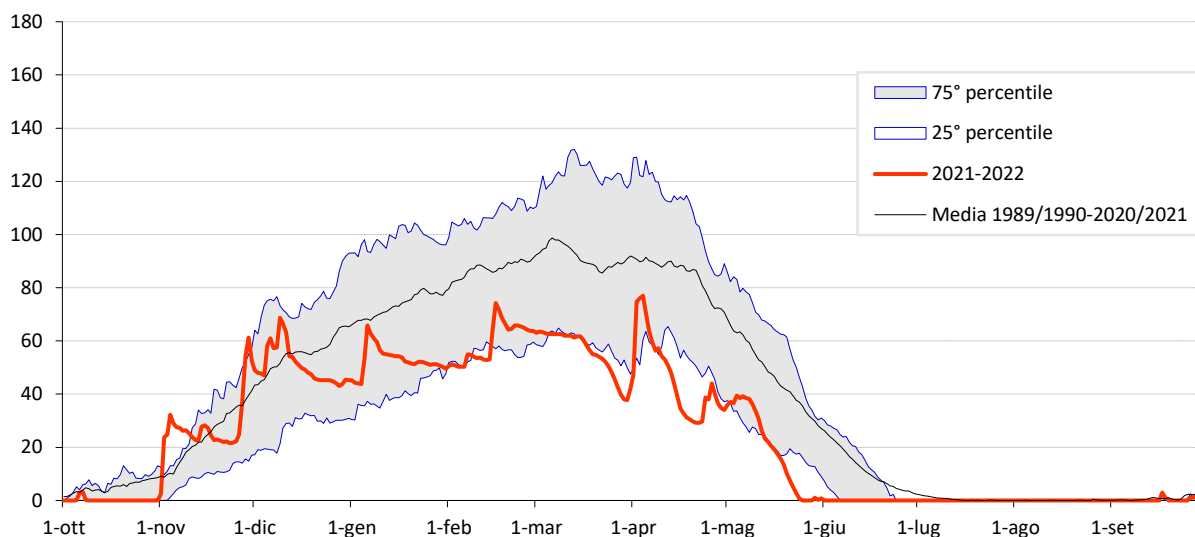


Figura 3.4 Altezza manto nevoso nel complesso “Dolomiti Nord” (dati ARPAV).

Analizzano la situazione con più dettaglio con i dati relativi alla stazione ARPAV di Ra Valles (2593 m s.l.m.), dalla figura 3.5 si evince come la differenza con gli anni precedenti sia netta a partire da inizio aprile.

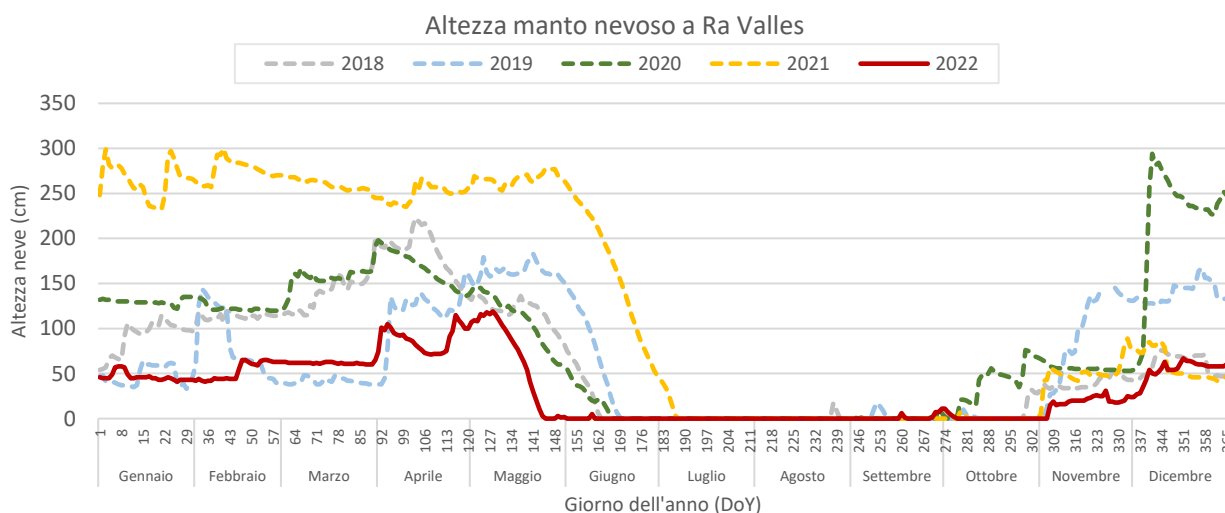


Figura 3.5 Altezze del manto nevoso misurate nella stazione nivometeorologica di Ra Valles.

In generale i dati sulle precipitazioni degli ultimi anni confermano come i cambiamenti climatici stiano probabilmente causando diffusi impatti negativi. Tra questi figurano per l'appunto fenomeni intensi di siccità e di caldo estremo, considerati tra gli eventi estremi più significativi che hanno interessato l'Europa nel 2022. A causa di questi ultimi gran parte del continente ha registrato meno giorni di neve rispetto alla media durante l'inverno 2021-22 e, in primavera, le precipitazioni sono state inferiori alla media con maggio che ha registrato le precipitazioni più basse mai registrate.

In relazione agli anni 2021 e 2022 la presenza di precipitazioni scarse in entrambe le situazioni ha verosimilmente influenzato l'allungamento dei rami, risultando a fine stagione quello più ridotto rispetto al periodo 2018-2020 (figura 3.16). Non sono tuttavia da escludere ulteriori elementi che potrebbero aver

contribuito a determinare tale risultato. Infatti, anche nel 2020 le precipitazioni hanno seguito un andamento simile a quello del 2021 e del 2022, soprattutto per quello che riguarda i mesi estivi, ma a partire da metà agosto si sono verificati più eventi piovosi che hanno contribuito a rendere tale anno il più piovoso tra quelli della serie. Tuttavia, la tendenza alla diminuzione della lunghezza massima nei rami è iniziata prima del 2021, quando le precipitazioni sono state decisamente abbondanti; quindi, le ragioni di questo risultato dovrebbero essere legate ad altro rispetto alle precipitazioni. Ad esempio, a una probabile acclimatazione progressiva alle nuove condizioni ambientali alle quali sono stati sottoposti gli individui S e C.

Nonostante le precipitazioni evidenzino una distribuzione abbastanza omogenea nel corso di tutto l'anno 2022, esse sono chiaramente sotto i livelli rispetto al periodo campionario 2018-2021 e rispetto alla media 1992-2023. Va ricordato però che gli impatti della scarsità di disponibilità d'acqua possono essere più significativi di quelli della temperatura, ma non sono necessariamente immediati. In particolare, la distribuzione e la variabilità stagionale possono essere più importanti della quantità totale (Morison & Morecroft, 2007).

In linea con le osservazioni dei cambiamenti nella criosfera, si conferma una riduzione generale del manto nevoso, ricordando come nelle Alpi italiane, per l'intero anno, ci sia stato un deficit medio di nevicate nel 2022 pari al 45%. Questa tendenza trova conferma nei dati ARPAV della zona dolomitica delle montagne venete, le quali in particolar modo hanno ricevuto pochissima neve invernale e hanno vissuto un'estate insolitamente calda (*figura 3.4*).

La variazione del manto nevoso e il suo scioglimento precoce provoca, da un lato, un periodo vegetativo più lungo e quindi potenzialmente maggiori accrescimenti per buona parte della vegetazione; dall'altro, aumenta il rischio per le piante di soffrire delle gelate primaverili e della siccità estiva a causa della minore disponibilità idrica (Choler 2015). Quest'ultimo caso sembrerebbe coinvolgere proprio l'anno interessato dai campionamenti effettuati a Passo Giau e in particolare per gli individui sottoposti al trattamento S (*figura 3.13*).

3.1.2 Temperature

Nella *figura 3.6* possiamo osservare l'andamento della temperatura dell'aria durante il periodo di svolgimento dell'esperimento; i dati provengono dal sensore di temperatura della stazione meteorologica situata nell'area di studio. Dai risultati è possibile osservare una tendenza all'aumento delle temperature altamente significativa ($p < 0,001$) che conferma la tendenza globale .

Le temperature più basse registrate sono state comprese tra -17.9°C e -19.7°C dal 26/02/18 al 28/02/18. La temperatura più alta registrata è stata di 20.7°C in data 27/06/19.

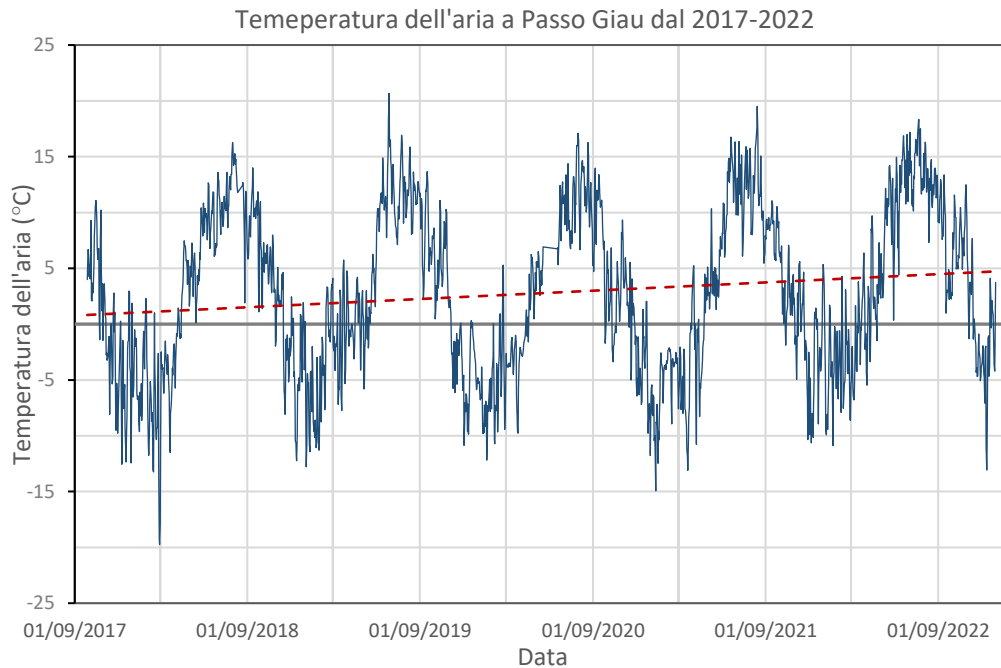


Figura 3.6 Dati sulla temperatura dell'aria registrate presso il sito sperimentale, periodo 27/09/2017-31/12/2022.

I dati di temperatura dell'aria registrati presso il sito sperimentale mostrano valori per l'anno 2022 di molto superiori rispetto alla media 2018-2021 (figura 3.7). Le temperature medie giornaliere più basse registrate durante l'anno sono comprese tra -10.9°C e -13.1°C dal 11/12/2022 al 12/12/2022, mentre la temperatura più alta è stata 18.3°C in data 22/07/2022.

Nella figura 3.8 è riportato il corso della temperatura nell'anno 2022 (linea rossa) rispetto a quella degli altri anni presi in considerazione. Da questa rappresentazione emerge chiaramente come la temperatura balzi vistosamente oltre la media nei mesi che vanno da marzo fino ad agosto e si stabilizzi poi fino ad ottobre, mese in cui è chiaro l'inizio di un'anomalia ben marcata che si protrae fino a novembre.

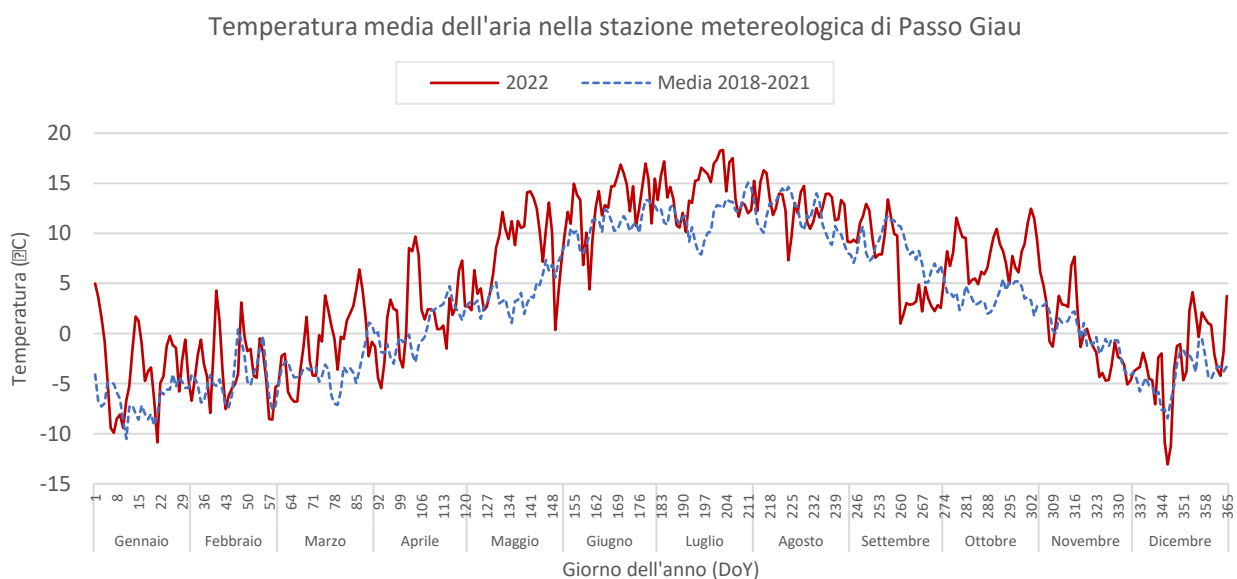


Figura 3.7 Confronto delle temperature medie giornaliere registrate nel periodo 2018-2021 e nell'anno 2022.

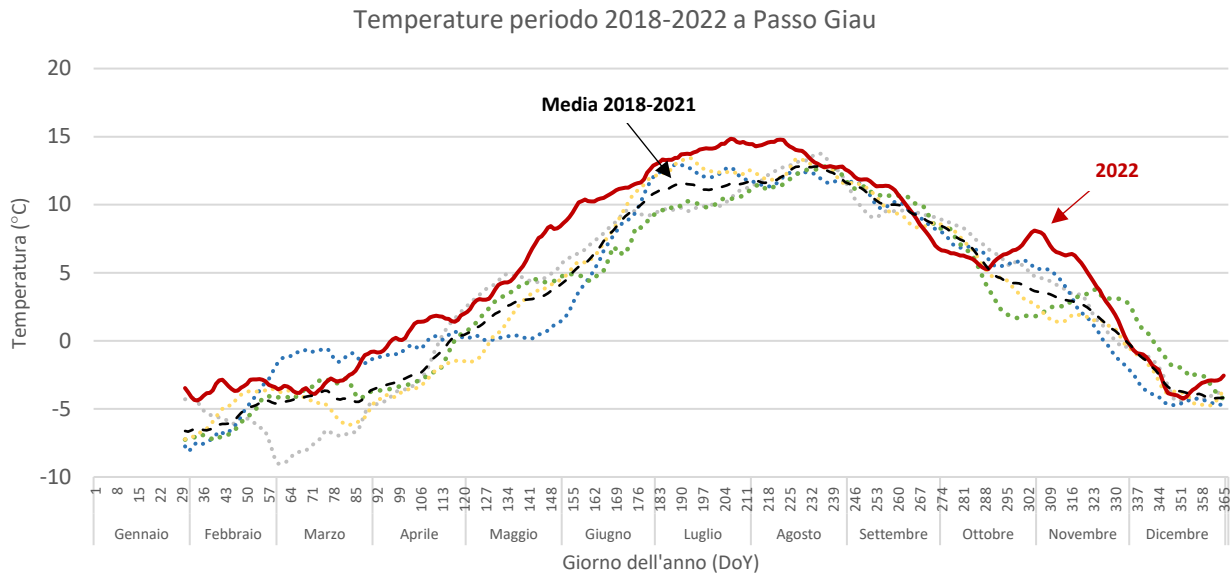


Figura 3.8 Confronto dell'andamento delle temperature medie giornaliere nel periodo 2018-2022.

In relazione all'effetto della temperatura nei riguardi del ginepro si può affermare come la sua influenza diretta non sembra provocare variazioni nel tasso di crescita così come riportato da Carrer et al. (2019). Va riportato però come l'andamento delle temperature abbia invece un'influenza significativa sulla permanenza dello strato di neve al suolo. Ciò comporta che in un'ottica di aumento delle temperature medie in ambiente alpino (Rixen et al., 2010) e di riduzione della copertura nevosa (Beniston et al., 2003) l'esposizione delle piante a condizioni invernali più rigide diventerà sempre più frequente.

La figura 3.9 mostra la variazione della temperatura del suolo e dei fusti in relazione all'aria nel periodo di svolgimento delle prove di campionamento dell'anno 2022 (temperatura al suolo della pianta 4 neutra), differenziando la distribuzione in base ai trattamenti.

Si può notare il mantenimento di una temperatura costante (intorno a 0) negli individui C e in minor misura negli N, rispetto a quelli S. Questo è dovuto certamente alla copertura nevosa estesa fino a fine maggio e che ha impedito alle piante sia di riscaldarsi durante la primavera ma anche di evitare brusche cadute di temperatura con maggiore rischio di danni da gelate tardive tra marzo e maggio.

In figura 3.10 invece, viene raffigurata la variazione nella temperatura al suolo e nei fusti per il periodo maggio-giugno 2022.

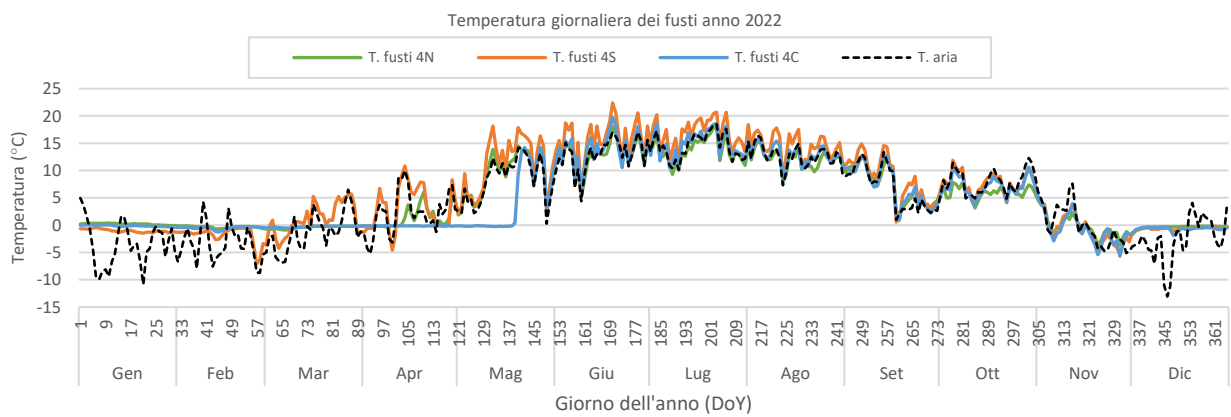
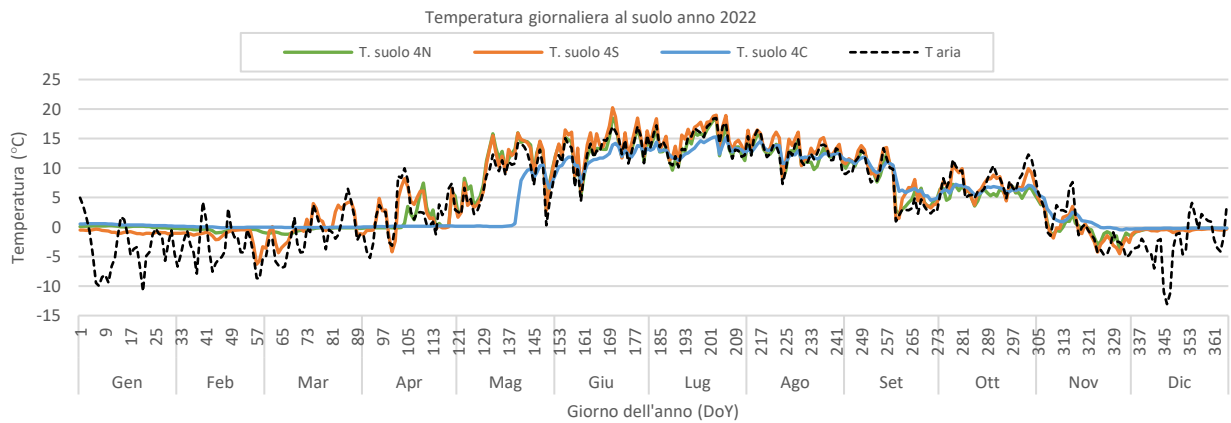


Figura 3.9 Variazione della temperatura media al suolo e nei fusti in relazione all'aria nell'anno 2022 suddivisi per trattamento.

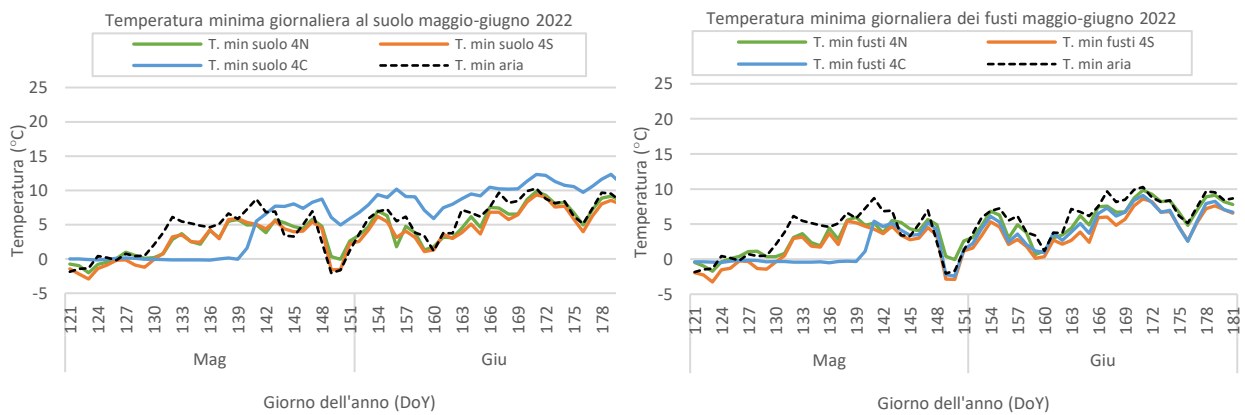


Figura 3.10 Variazione nella temperatura al suolo e nei fusti periodo maggio-giugno nell'anno 2022 suddivisi per trattamento.

Secondo i dati di temperatura dell'aria a fine maggio 2022 si è verificata una gelata tardiva che ha fatto registrare valori minimi di $-2.05\text{ }^{\circ}\text{C}$ il 29 maggio e $-1.66\text{ }^{\circ}\text{C}$ il 30 maggio. Questo evento ha causato, con molta probabilità, la formazione del cosiddetto "anello da gelo" (*frost ring*) in alcuni individui.

Questi anelli sono caratterizzati dalla presenza di cellule di forma estremamente irregolare, che sembrano lacerate, esplose. Tali cellule possono trovarsi nel legno primaticcio (gelate tardive) o nel legno tardivo (geli precoci). Alla luce di quanto riportato sopra è possibile ipotizzare che ciò possa avere maggiore incidenza nel gruppo di piante S che risultano essere maggiormente esposte. Durante l'inverno i meristemi degli arbusti

sono spesso coperti e protetti dalla neve, limitando il rischio di congelamento e di danni meccanici rispetto alle gemme degli alberi (Bokhorst et al., 2009; Rixen et al., 2010). Tuttavia, per i meristemi degli arbusti, gli effetti benefici del manto nevoso possono anche rivelarsi dannosi se lo spessore della copertura è così elevato o denso da indurre una fusione ritardata della neve e un accorciamento della stagione di crescita (Pellizzari et al., 2014).

Va ricordato quindi come la copertura nevosa sia in grado di proteggere le piante da fenomeni di questo tipo, mentre la sua assenza, con l'inizio anticipato della stagione vegetativa e l'esposizione anticipata all'aria libera rispetto allo scioglimento naturale del manto nevoso potrebbe aumentare il rischio di danni dovuti a eventi di gelo (Unterholzner et al., 2022).

In generale quindi, si può affermare che nel trattamento C avvengono escursioni termiche ridotte rispetto ad N, e ancor più S, i quali subiscono da subito una variabilità termica più accentuata, soprattutto nel primo periodo dopo la fuoriuscita dalla copertura nevosa.

Dai dati analizzati e da quanto detto sopra è evidente che la copertura nevosa vada anche a influenzare la temperatura dei fusti delle piante e del suolo. Le piante in presenza di neve sono certamente meno esposte alle escursioni giornaliere ma presentano un chiaro ritardo dell'inizio della stagione vegetativa come evidenziato in seguito (*figura 3.12*).

3.2 Fenologia

I grafici a colonna in figura 3.12 riportano i risultati, suddivisi per anno, dello sviluppo delle gemme attraverso le diverse fasi della crescita. I valori sono quelli medi per anno per tipo di trattamento.

Confrontando l'andamento delle fasi di sviluppo delle gemme sulla base della tipologia di trattamento si può subito notare come l'apertura delle gemme delle piante coperte C avvenga in modo più lento rispetto alle piante scoperte S e i controlli N raggiungendo lo stadio "4" in ritardo. Mediamente è stato riscontrato che nelle piante C il completamento dello sviluppo si realizza un mese dopo. Si può quindi concludere che la prolungata copertura nevosa produce come effetto diretto il ritardo dell'inizio dello sviluppo delle gemme.

In alcuni rametti si è rilevata la mancata apertura della gemma, o il suo disseccamento o predazione durante le fasi di apertura. In questi casi il rametto non raggiungerà mai la "fase di estensione" e si è quindi proceduto alla sua sostituzione. Nel 2022 si sono riscontrati 13 di questi casi.

Il 2022 si distingue comunque per la velocità di recupero delle piante C che già al 20° giorno dal primo rilievo avevano raggiunto lo stesso stadio di sviluppo della gemma degli altri trattamenti. Si può notare, in particolare, come le piante C abbiano impiegato lo stesso numero di giorni delle S per raggiungere la massima fase di sviluppo.

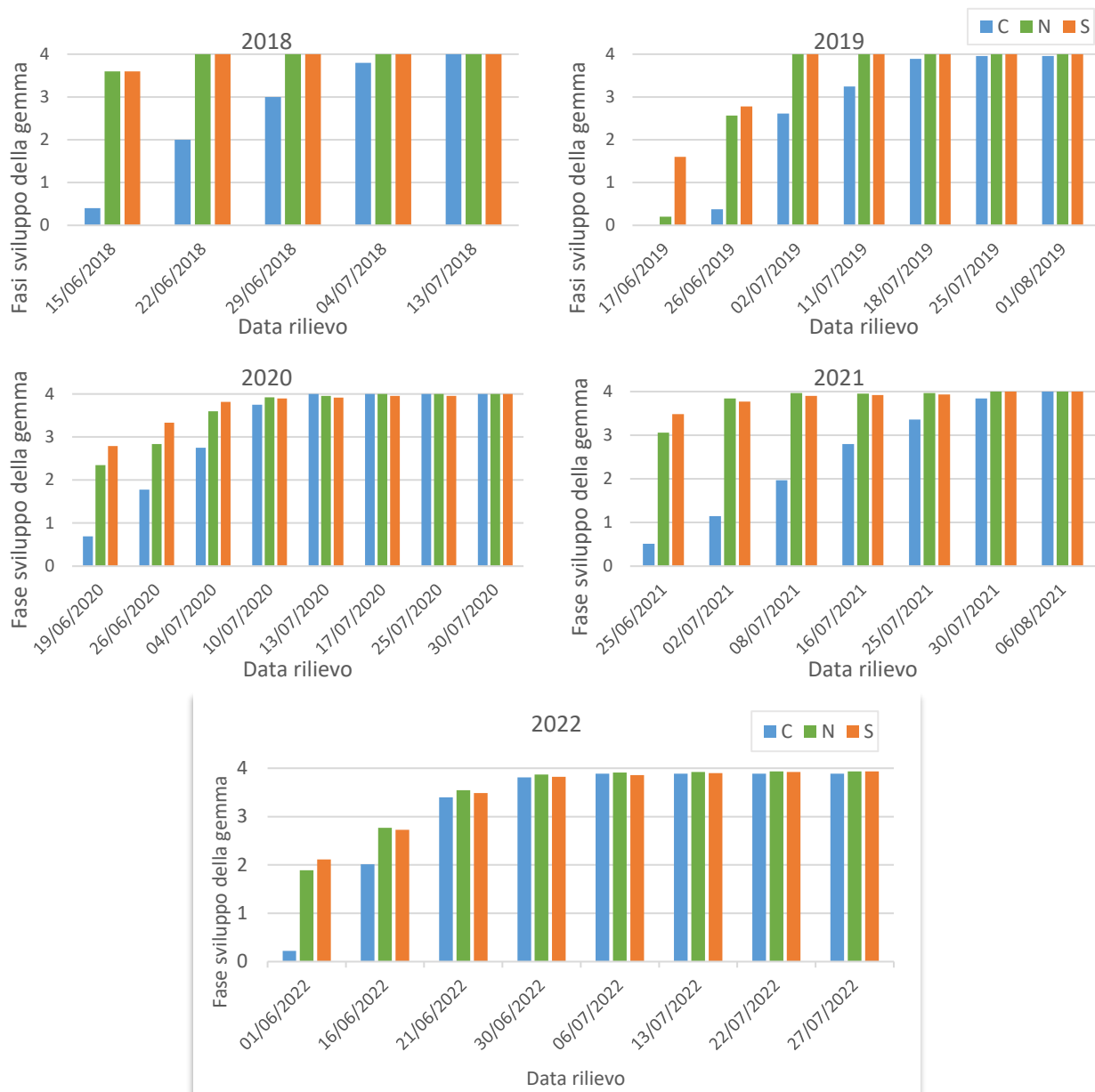


Figura 3.12 Fasi di apertura delle gemme per ogni anno del periodo 2018-2022, suddivise per trattamento e stadio di sviluppo (1-4)

Da notare, inoltre, come le gemme sulle piante *S*, durante il primo rilievo di ogni anno, si trovino generalmente in fasi di sviluppo più avanzate rispetto a quelle degli altri gruppi. Questo è dovuto certamente dall'anticipazione della stagione vegetativa. In futuro andrebbe tenuta in considerazione la possibilità di anticipare i rilievi fenologici prima della completa scomparsa della neve dall'area di studio. Comunque, nonostante le piante *S* vengano liberate in anticipo dalla neve, non evidenziano uno sviluppo più rapido rispetto alle *C* e *N*. Infatti, negli anni 2018, 2021 e 2022 i valori riscontrati nelle *S* sono assimilabili agli individui di controllo *N*.

Per quanto riguarda le gelate tardive nelle gemme la situazione sembra essere diversa rispetto all'accrescimento dei getti in quanto gli individui *S* non sembrano risentire dell'esposizione precoce all'aria o

all'elevata radiazione solare che potrebbe rallentare il loro sviluppo. Unterholzner et al. (2022) non hanno osservato alcun segno significativo di danni da gelo nel periodo 2018-2020.

I grafici a linee presenti nella figura sottostante (figura 3.13) riportano i valori di distensione dei getti primari divisi per anno e trattamento permettendo di evidenziare le differenze nella crescita.

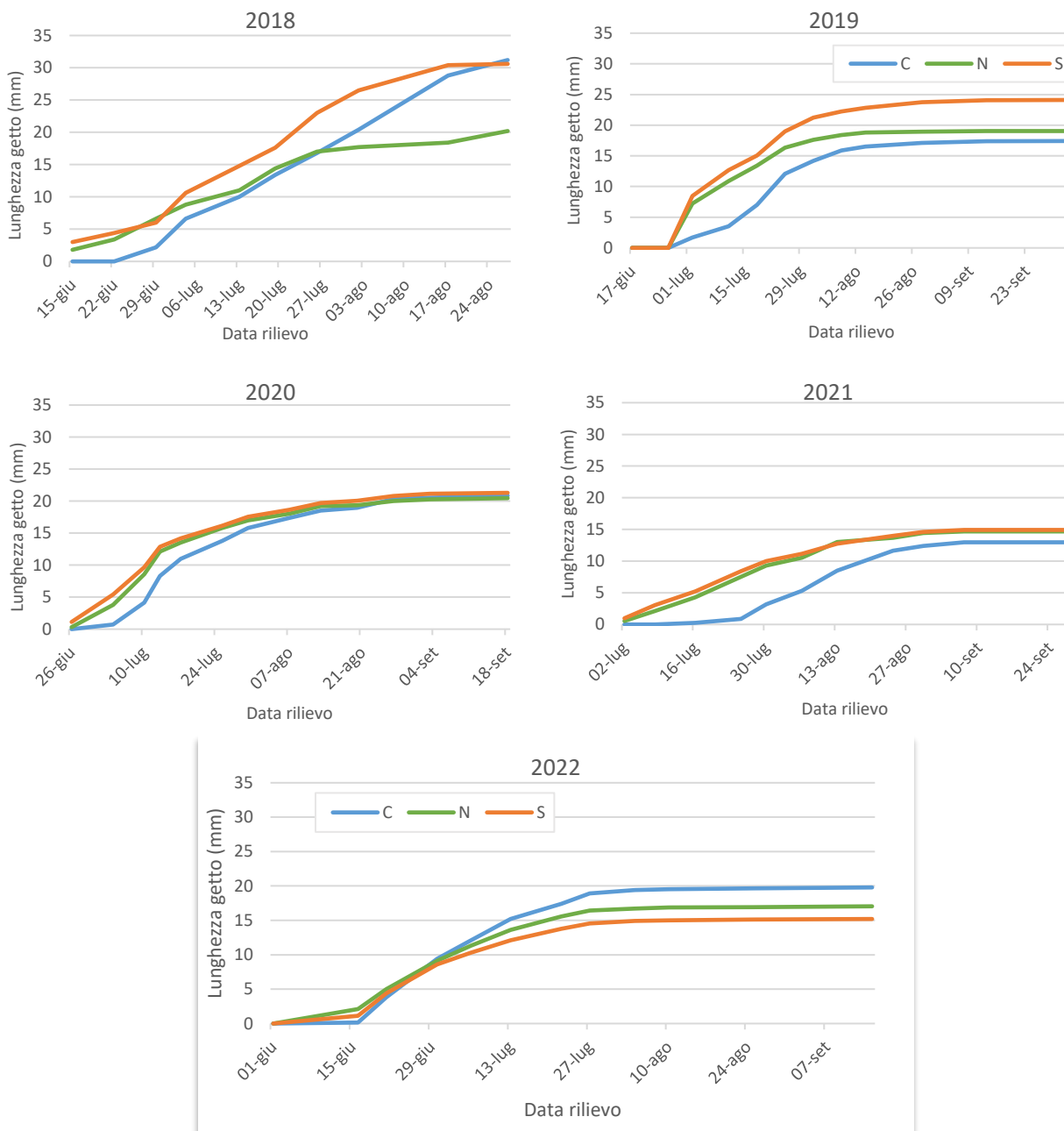


Figura 3.13 Lunghezza accrescimenti dei getti nel periodo 2018-2022, suddivisi per trattamento.

Lo scioglimento del manto nevoso, oltre a definire l'inizio e la durata della stagione vegetativa, attraverso l'acqua e i nutrienti rilasciati, può influenzare l'umidità del suolo e lo stato dei nutrienti fino all'estate successiva (Wipf & Rixen, 2010). Inoltre, Zeng e Jia (2013) hanno riscontrato forti correlazioni tra fenologia e tempistica della copertura nevosa.

In linea con quanto riportato per le fasi di apertura delle gemme anche in questo caso è possibile distinguere come le piante soggette al trattamento *C* inizino l'accrescimento in ritardo (circa 10 giorni). Questo fenomeno può essere confermato dallo studio di Pellizzari et al. (2014), in cui si evidenzia come la persistenza della neve possa avere un effetto negativo sull'accrescimento secondario. Tali effetti si realizzano sia attraverso un ritardo nell'avvio sia con un rallentamento nelle prime fasi della stagione vegetativa, riducendo così il periodo di attività cambiale. Questo potrebbe essere principalmente legato all'effetto fisico della copertura nevosa che filtra la radiazione solare bloccando la fotosintesi, piuttosto che alla riduzione contestuale della temperatura del suolo (Pellizzari et al., 2014).

Indipendentemente dal tipo di trattamento, si osserva un tasso di crescita inizialmente più rapido che, dopo alcune settimane, lentamente diminuisce per poi stabilizzarsi verso metà settembre alla fine della stagione vegetativa. Differenze più marcate tra i diversi trattamenti si sono riscontrate nel 2018 e 2019, probabilmente per una risposta iniziale degli individui alle nuove condizioni ambientali imposte dall'esperimento anche se non si deve scordare che tali risultati potrebbero essere parzialmente fuorvianti a causa del ridotto numero campionario che li contraddistingue.

Nell'annata 2022 è presente una particolarità rispetto agli anni precedenti. La lunghezza degli accrescimenti è stata maggiore per gli individui *C* rispetto alle piante *N* e *S* a partire da fine giugno. Nelle misurazioni pregresse la lunghezza media dei getti per le piante *C* si era sempre attestata su valori inferiori rispetto alle piante *N*, mentre le *S* evidenziavano gli accrescimenti più elevati. È interessante constatare come nel corso degli anni questo divario sembra sia in diminuzione.

La figura 3.14 mette in relazione i valori di crescita dei getti primari in tutti e cinque gli anni di sperimentazione. In riferimento alle serie dati 2019-2020-2021 è possibile osservare attorno al *DoY* 240 (28 agosto) un netto rallentamento nello sviluppo. Sebbene i rilievi del 2018 si siano conclusi con circa tre settimane di anticipo rispetto agli altri anni, è ragionevole supporre che le piante avessero già terminato l'accrescimento primario. Nel 2022 si è riscontrato un anticipo di tale rallentamento che infatti, si attesta intorno al *DoY* 220 (8 agosto).

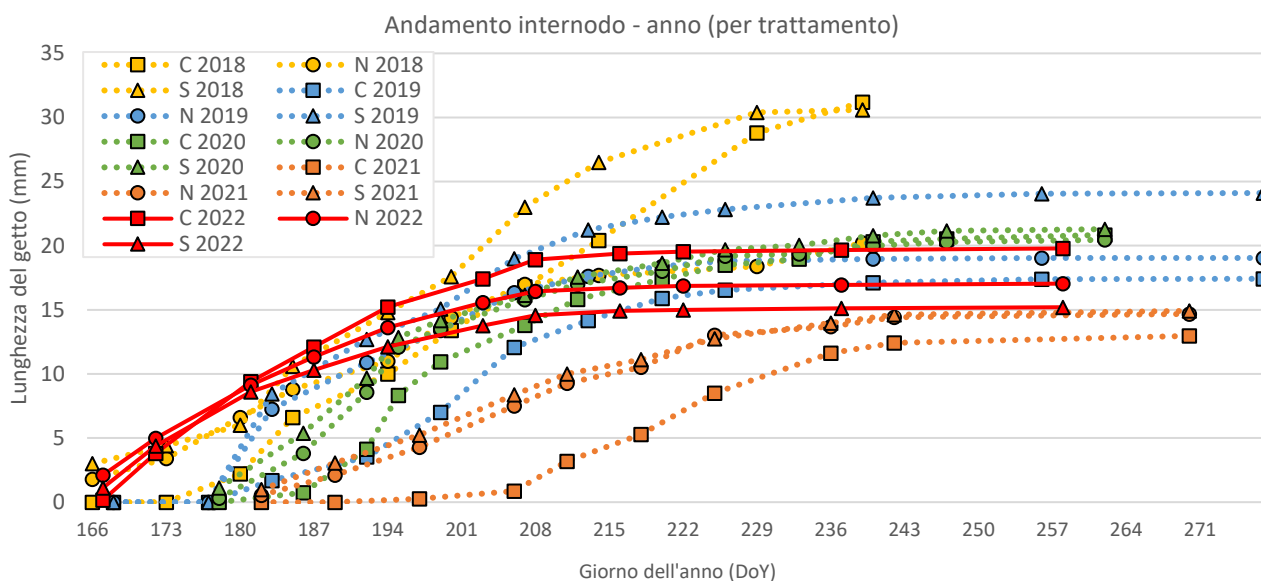


Figura 3.14 Riepilogo delle lunghezze medie del getto annuale per le diverse forme di trattamento. Periodo 2018-2022.

Ad ulteriore conferma di quanto appena detto in figura 3.15 vengono rappresentati i giorni dell'anno i cui si sono sviluppati i getti apicali in base ai differenti trattamenti.

Nelle piante a trattamento C il tempo necessario a raggiungere la distensione massima risulta più breve di 4 giorni. In media il periodo di distensione si protrae per 70 giorni nelle piante coperte contro i 74 delle piante controllo e i 77 delle piante scoperte. La durata del periodo di allungamento del getto apicale si attesta su una media di 74 giorni contro i 70 precedenti.

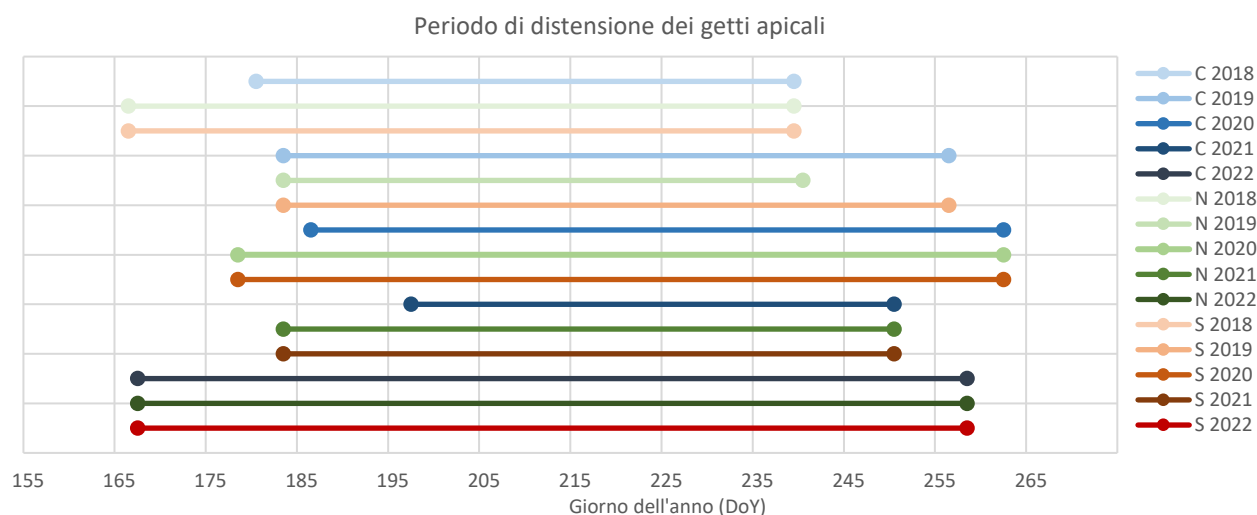


Figura 3.15 Distribuzione degli accrescimenti suddivisi in base ai trattamenti. Periodo 2018-2022.

La tabella 2 fornisce una panoramica sui dati di lunghezza media (Med), massima (Max) e deviazione standard degli internodi a fine anno, nei cinque anni di sperimentazione.

Anno	2018			2019			2020			2021			2022		
Pianta	Med	DEV.ST	Max	Med	DEV.ST	Max	Med	DEV.ST	Max	Med	DEV.ST	Max	Med	DEV.ST	Max
1C	44		44	22	14.53	48	23	8.81	43	15	8.77	37	19	9.23	45
2C	22		22	15	6.12	22	20	7.76	32	13	6.45	29	27	10.17	44
3C	37		37	17	5.47	25	23	10.04	44	12	7.09	22	18	9.66	42
4C	31		31	13	3.41	18	14	4.44	24	7	4.04	14	13	4.15	19
5C	22		22	20	10.02	41	24	10.71	43	16	8.78	35	23	11.39	52
1N	20		20	19	5.07	26	21	8.23	35	19	7.10	31	17	11.91	51
2N	25		25	30	17.12	60	25	14.47	61	23	10.67	45	23	14.28	73
3N	21		21	15	5.17	22	17	7.46	28	9	4.66	17	15	4.57	23
4N	12		12	11	2.11	16	14	5.79	28	12	4.49	20	12	6.14	28
5N	23		23	20	7.41	34	24	14.81	52	11	8.93	39	19	13.62	57
1S	64		64	45	40.73	129	32	25.94	115	22	17.29	68	15	5.62	24
2S	19		19	23	10.38	45	27	17.31	60	17	11.67	42	19	17.59	70
3S	40		40	23	6.40	32	23	10.21	49	21	6.25	32	20	9.23	41
4S	17		17	13	4.82	25	12	4.68	21	7	5.24	21	12	2.43	17
5S	13		13	16	6.47	28	13	5.49	24	9	5.01	19	11	4.34	21
C	31	9.58	44	17	9.12	48	21	9.22	44	13	7.75	37	20	10.25	52
N	20	4.97	37	19	10.73	60	20	11.34	61	15	9.04	45	17	11.27	73
S	31	21.41	37	24	21.60	129	21	16.52	115	15	11.71	68	15	10.07	70
tot	27	13.84	64	20	15.05	129	21	12.69	115	14	9.64	68	17	10.67	73

Tabella 2. Valori medi di accrescimento, deviazione standard e valori massimi registrati sui singoli individui. Periodo 2018-2022

Nella figura 3.16 sono visibili i risultati dell'andamento della crescita per ogni tipo di trattamento per tutti gli anni dell'esperimento (2018-2022). I valori sono ottenuti utilizzando i valori medi di lunghezza del getto (in mm) di ognuno dei tre trattamenti. Si può notare che ci sono anni in cui la differenza tra i trattamenti è maggiore e altri in cui sono abbastanza simili ma la tendenza, come precedentemente riferito, sembrerebbe quella di una convergenza tra gli individui coperti, scoperti e di controllo. La lunghezza del getto, infatti, non sembrerebbe essere soggetta a variazioni significative in considerazione delle differenze di permanenza del manto nevoso ottenute dagli interventi di manipolazione in questi ultimi anni. La durata prolungata della copertura nevosa, quindi, non sembra in grado di influenzare la lunghezza finale dei nuovi germogli negli individui C, tranne che nei primi due anni. Ciò potrebbe essere giustificato dal fatto che una maggiore copertura nevosa fornisce un migliore isolamento e quindi aumenta le temperature e favorisce la vita microbica sotto la neve, con conseguente aumento dell'apporto di nutrienti per gli arbusti all'inizio del periodo di crescita dell'anno successivo (Hallinger et al., 2010; Wahren et al., 2005; Wipf et al., 2009; Wipf & Rixen, 2010). L'entità di questa influenza può dipendere dall'equilibrio tra gli effetti negativi (danni alle radici) e positivi (maggiore disponibilità di nutrienti) (Wipf et al., 2009). Al contrario, si possono essere casi in cui la quantità di neve diventa eccessiva e il vantaggio di un migliore isolamento è superato dallo svantaggio della riduzione del periodo di vegetazione (Hallinger et al., 2010).

In relazione al trattamento S è chiaro un decremento della lunghezza dei getti nel corso degli anni di sperimentazione, evidenziando addirittura un superamento da parte degli individui C ed N nell'anno 2022. La tendenza di C ed N invece sembrerebbe rimanere invariata.

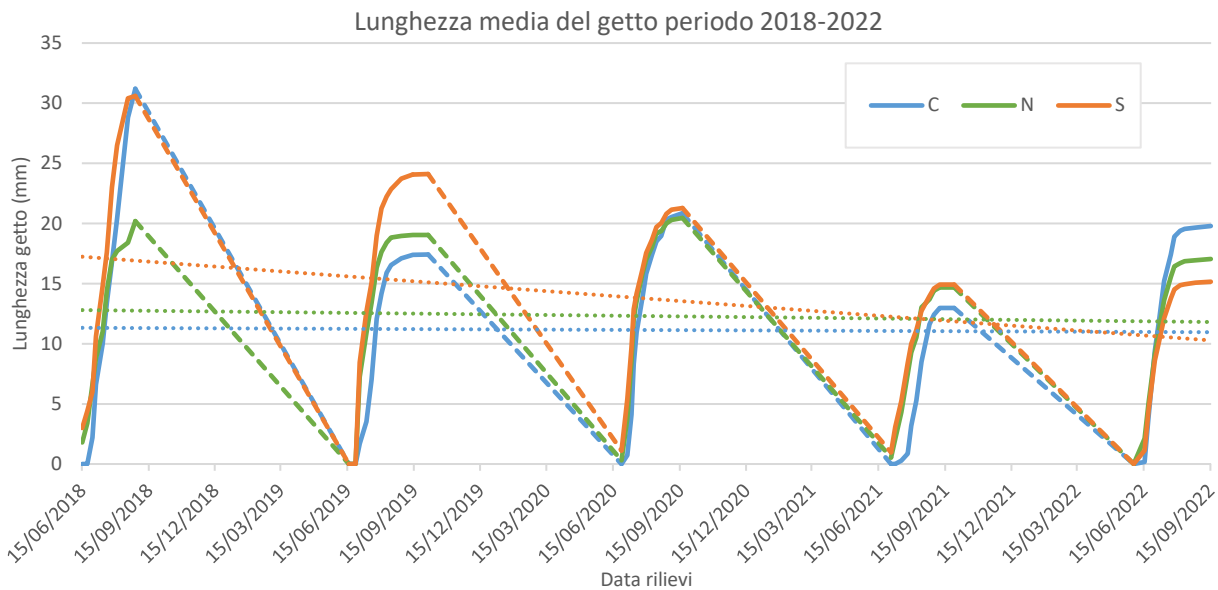


Figura 3.16 Allungamento dei getti durante tutti gli anni dell'esperimento, suddivisi per trattamento.

La figura 3.17 mostra quale trattamento ha avuto le prestazioni più elevate in termini di crescita massima alla fine di ogni stagione (lunghezza massima mediata tra i trattamenti). Si può apprezzare anche qui la diminuzione delle differenze tra i trattamenti e come il 2022 rappresenti una particolarità per l'inversione della tendenza all'accrescimento di C e S. La convergenza nei valori di accrescimento primario tra i tre diversi trattamenti potrebbe essere il risultato di una acclimatazione delle piante alle nuove condizioni ambientali nelle quali si trovano a crescere. In generale, infatti, va considerato che le specie di *Juniperus* sono solitamente molto resistenti alle condizioni di siccità e si adattano ad ambienti stressanti (Hazubská-Przybył, 2019), a condizioni di povertà di nutrienti e tollerano il gelo (Thomas et al., 2007).

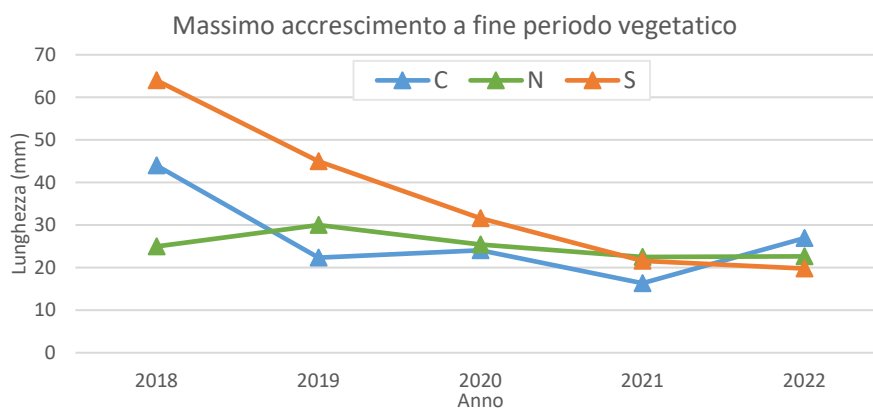


Figura 3.17 Valori massimi di lunghezza alla fine del periodo vegetativo

Le risposte decrescenti degli individui S potrebbero essere causate dal protrarsi degli effetti negativi dovuti all'esposizione al gelo tardivo nel corso dei cinque anni di sperimentazione che potrebbero aver creato danni non compensati dal prolungamento della stagione vegetativa.

Nella successiva parte sono presenti cinque istogrammi che permettono di avere una visione sulle distribuzioni percentuali delle lunghezze dei getti a fine anno. Per ogni classe (5 mm) viene determinato il contributo dei diversi trattamenti (*figura 3.18*).

Le distribuzioni sono generalmente simili tra i diversi anni e i diversi trattamenti con una distribuzione asimmetrica che evidenzia una lunga coda verso destra. Anche il 2022 si allinea rispetto a quando descritto mentre la classe più rappresentata risulta essere quella di 10-15 mm.

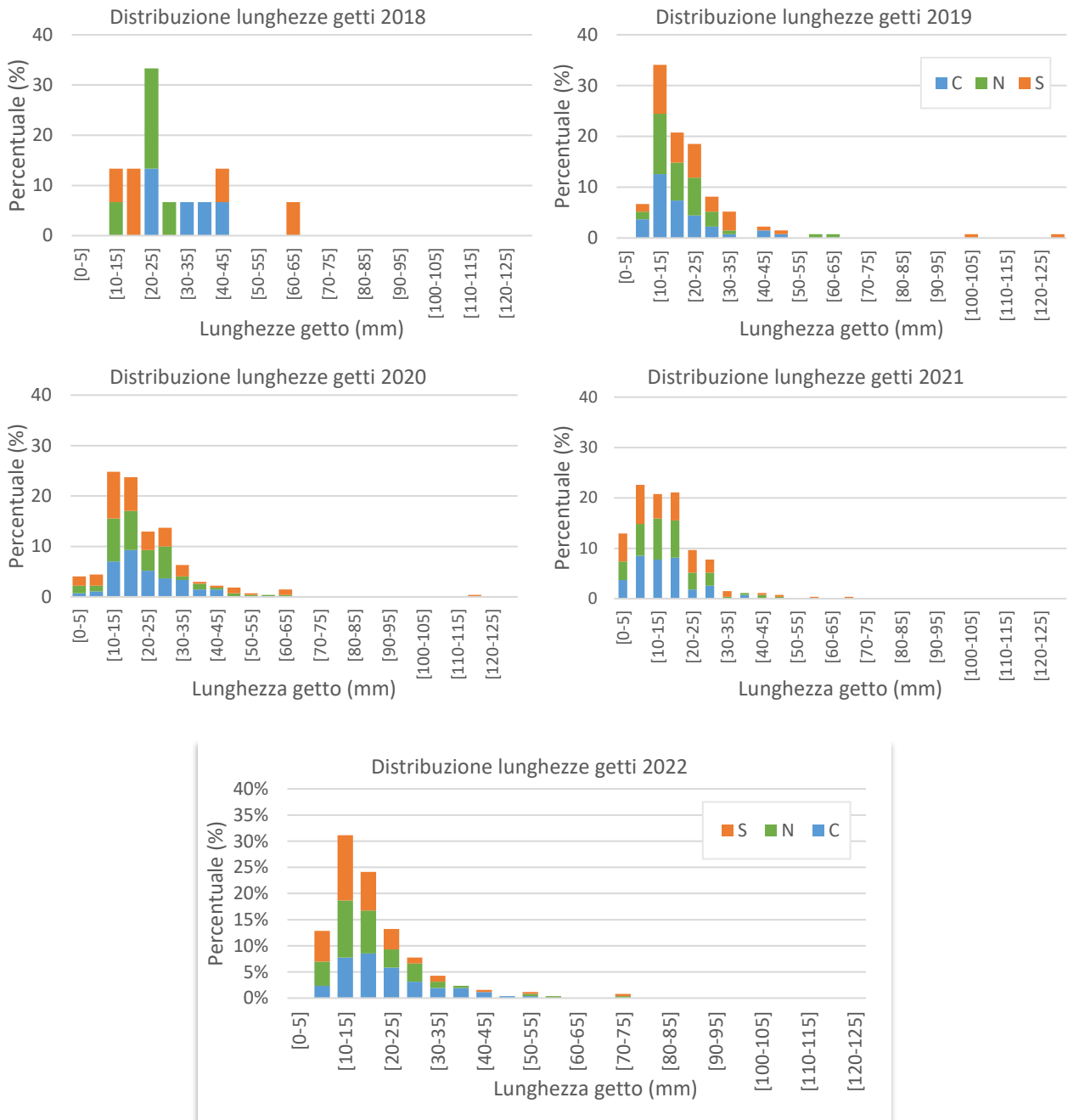


Figura 3.18 Distribuzione percentuale delle lunghezze dei getti apicali a fine anno. Periodo 2018-2022.

La figura 3.19 mostra l'andamento nella differenza di crescita delle piante coperte C e scoperte S in relazione alle piante controllo (N).

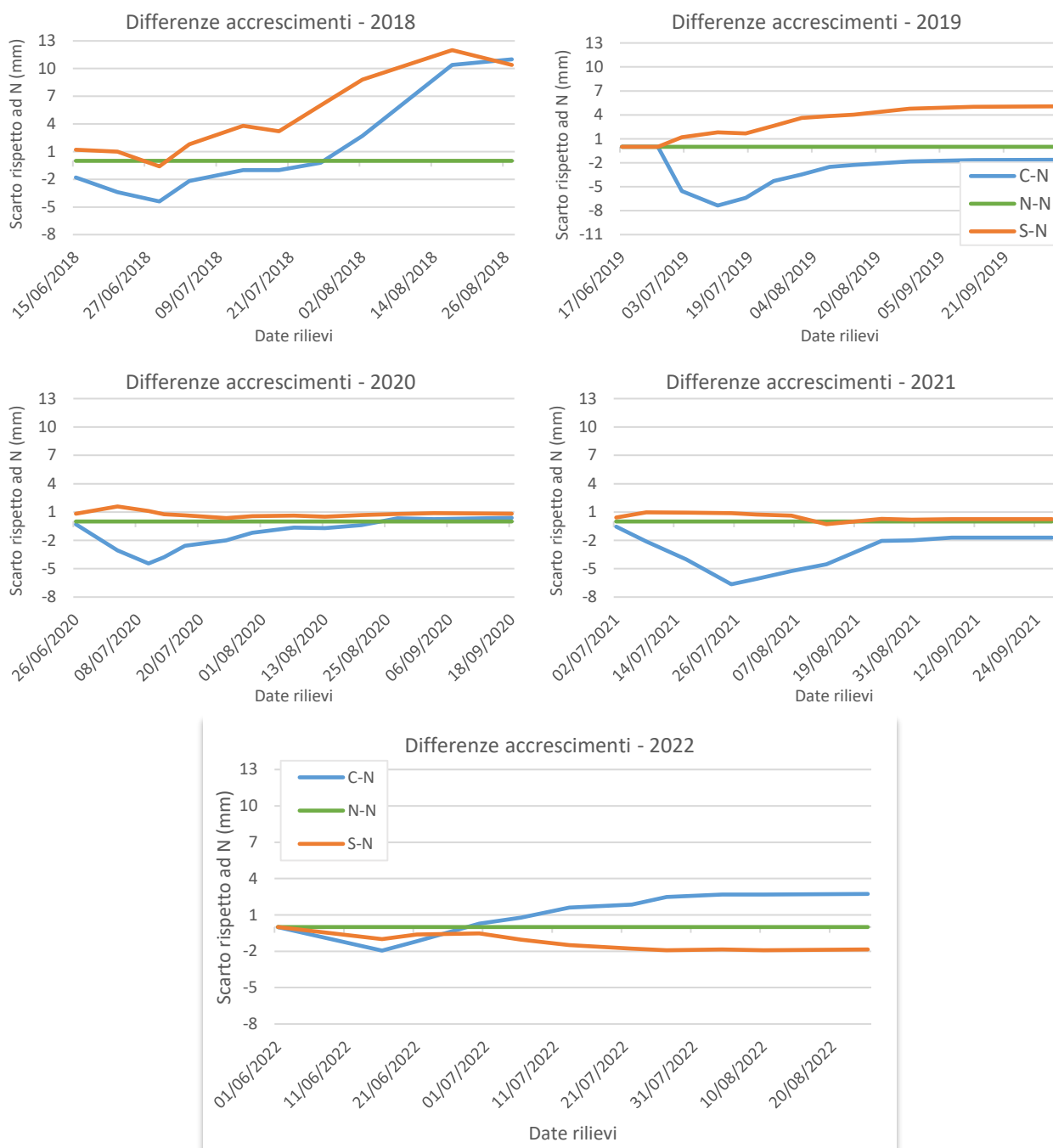


Figura 3.19 Differenze negli accrescimenti tra i vari trattamenti in relazione al controllo N. Periodo 2018-2022.

Nei 5 anni di sperimentazione la differenza maggiore la si osserva nel trattamento C, con valori che negli anni 2019 e 2021 raggiungono -7 mm. La differenza tende a ridursi con il progredire della stagione, e negli anni 2018, 2020 e 2022 la differenza C-N restituisce valori positivi. In particolare, nell'anno 2022, il gruppo C raggiunge i valori registrati dal gruppo N già intorno ai primi giorni del mese di luglio anticipando di ben un mese il dato che più vi si avvicina (2018).

Per quanto riguarda la differenza tra le piante S e N, si può notare come gli individui scoperti presentino una lunghezza del getto superiore rispetto agli altri trattamenti solo nei quattro anni precedenti al 2022. In quest'ultimo, infatti, si raggiungono -2 mm a fine stagione e lo scarto tra C e S a fine stagione arriva circa a 5 mm. Il divario con le piante N negli anni 2018, 2019 e 2022 nel corso della stagione vegetativa tende ad aumentare, mentre nel 2020 e 2021 si riduce progressivamente. In termini di valore assoluto la differenza di S-N assume valori decrescenti fino all'anno 2021. Nel 2022 la tendenza però cambia assumendo valore negativo.

Il grafico a radar (*figura 3.20*) riassume l'entità degli accrescimenti dei getti registrati a fine stagione per i vari trattamenti nei vari anni (2018-2022). Da questa rappresentazione emerge come la variabilità in termini assoluti nelle misure dipenda principalmente dall'anno piuttosto che dal trattamento applicato alle piante.

Entità accrescimenti per trattamento nel periodo 2018-2022

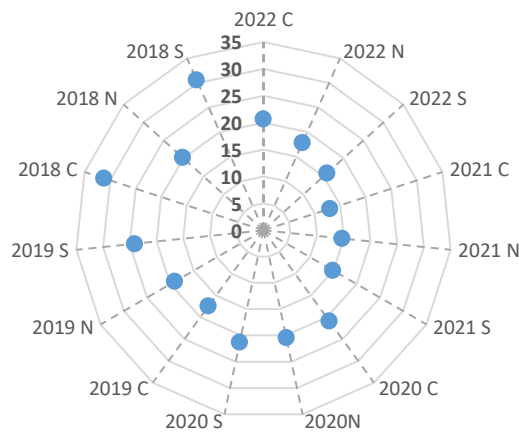


Figura 3.20 Lunghezza (mm) dei getti apicali misurata a fine stagione nel periodo 2018-2022 in base al trattamento.

3.3 Analisi statistiche

La tabella 3 mostra i risultati dei test di analisi di varianza ad un fattore eseguiti dividendo il campione per trattamento e per anno. L'analisi fornisce un test dell'ipotesi che gli individui e le relative misurazioni di tutti i gruppi appartengano alla stessa popolazione, e che le difformità osservate tra i gruppi siano dovute solo alla casualità.

Analisi varianza - Lunghezza getto (fine stagione)					
Trattamento			Anno		
<i>gdl</i>	Valore di significatività	<i>F crit</i>	<i>gdl</i>	Valore di significatività	<i>F crit</i>
2-957	0.8312	3.0051	4-955	4.294E-12	2.3812

Tabella 3. Risultati dell'analisi della varianza ad un fattore. Dati in considerazione della lunghezza del getto a fine stagione suddivisi per trattamento e per anno.

I risultati sull'analisi della varianza tra i gruppi distinti per trattamento presenta un valore di significatività tale per cui è possibile accettare che il diverso trattamento non influisca sulla lunghezza finale del getto. Eseguendo il test sui dati raggruppati in base all'anno di rilievo, si ottiene un valore di significatività inferiore al valore α imposto (livello di significatività fissato: $\alpha=0.05$). Per questo motivo non si può escludere che l'anno vada a influenzare la diversità nelle serie dati e che quindi le misure siano diverse in relazione alla loro collocazione cronologica.

Al fine di trovare i gruppi di dati in cui questa differenza è più rilevante si è deciso di utilizzare il test t a due campioni assumendo uguale varianza (tabella 4), calcolato considerando la lunghezza di ciascun germoglio a fine stagione. Si può notare che l'unico risultato statisticamente significativo (in rosso) è la diversa crescita degli individui C e S nel 2022; abbiamo anche altri tre risultati: C_N nel 2018, C_S nel 2019 e C_N nel 2022, che sono quasi significativi e ci permettono di affermare in generale che in C_N e C_S sia apprezzabile, a fine stagione, una tendenza alla significatività. Ripetendo lo stesso test a metà stagione vegetativa (circa 30/07) otteniamo ulteriori valori significativi anche in altre annate e differenze. Possiamo affermare che i trattamenti C e S hanno influito sulla crescita dei germogli nel primo periodo della stagione vegetativa. Quindi vi è una tendenza alla differenza anche se non sempre significativa. Tra le piante scoperte e i controlli, invece, non si apprezza significatività.

Test t: due campioni assumendo uguale varianza				
Fine stagione		P(T<=t) a due code		
Anno	Osservazioni	C_N	S_N	C_S
2018	5	<u>0.0520</u>	0.321	0.956
2019	45	0.4415	0.1623	<u>0.0589</u>
2020	90	0.8009	0.6936	0.8239
2021	90	0.2032	0.9435	0.247
2022	90	<u>0.0892</u>	0.2099	0.0021

Test t: due campioni assumendo uguale varianza				
Metà stagione		P(T<=t) two-tail		
Anno	Osservazioni	C_N	S_N	C_S
2018	5	0.5126	0.3886	0.5573
2019	45	<u>0.0525</u>	0.1625	0.0036
2020	90	0.3503	0.7181	0.2214
2021	90	2.98E-13	0.5157	1.90E-11
2022	90	<u>0.0965</u>	0.1722	0.0016

Tabella 4. Risultati dei test t sulla crescita dei diversi trattamenti ad inizio stagione (destra) e a fine stagione (sinistra). Periodo 2018-2022.

3.4 Sperimentazione nell'anno 2023

Anche il 2023 ha visto il prosieguo all'interno dello stesso sito sperimentale delle medesime analisi fenologiche e anatomiche (sviluppo delle gemme e accrescimenti primari), condotte nel 2022 e negli anni precedenti. Alla luce dei risultati ottenuti nel 2023 (Forner, 2023) si può confermare come quest'ultimi, in linea generale, confermino le osservazioni portate avanti all'interno di questo elaborato di tesi, anche se sono emerse alcune differenze. Si può apprezzare, ad esempio, come le lunghezze massime raggiunte dai getti a fine stagione siano simili (circa 20 mm). Si evidenzia, altresì, un'importante differenza per quanto riguarda le piante sottoposte a trattamento C. Nello specifico nel 2022 risultano essere le uniche ad aver superato i valori di *S* ed *N* su sei anni di sperimentazione mentre nel 2023, tutti e tre i trattamenti evidenziano valori simili tornando così all'andamento precedentemente riscontrato nelle annate 2019-2020-2021.

In considerazione di quanto appena detto, va ricordato come il 2023 sia stato uno degli anni più caldi mai registrati, con temperature che si sono mantenute relativamente miti fino alla fine di ottobre. Andando a spodestare i record precedenti del 2022. Tuttavia, queste condizioni non sembrano aver promosso il tasso o la quantità di crescita così come è emerso per l'anno oggetto di questo studio. Questo ci fa comprendere come le risposte che il ginepro al variare delle condizioni climatiche, soprattutto in un'ottica di ulteriore riscaldamento, non siano ancora chiare. Emerge, quindi, la necessità di continuare tali misurazioni negli anni successivi per cercare di meglio comprendere tali risposte.

Un risultato interessante riguarda i germogli degli individui C che, negli ultimi due anni, sembrano adattarsi alle nuove condizioni imposte dal trattamento e raggiungere la fase di sviluppo 4 contemporaneamente agli individui S e N. Si riscontra, quindi, una graduale diminuzione delle differenze tra i trattamenti indice di un possibile processo di acclimatazione.

Infine, nei risultati riportati precedentemente si è osservato come a fine maggio 2022, secondo i dati di temperatura, si è verificato un evento di gelo tardivo, con una temperatura minima dell'aria pari a - 2.05 °C. Questo evento ha probabilmente causato la formazione di un anello da gelo, registrato per quell'anno, soprattutto nelle piante S. Grazie ai campioni prelevati nel 2023 su tutti gli individui è stato possibile dimostrare la formazione di un anello di gelo in 7 rami su 10 nelle piante S, 5 su 10 in quelle N e solo 1 su 10 in quelle C. Ciò confermerebbe che la copertura nevosa può proteggere le piante dalle gelate tardive, mentre la sua assenza, con l'inizio anticipato della stagione vegetativa, potrebbe portare a un maggior rischio di danni.

4 Conclusioni

Studi recenti hanno dimostrato che, oltre alla temperatura estiva, le precipitazioni invernali possono giocare un ruolo cruciale sulla crescita degli arbusti, aprendo nuovi interrogativi sull'associazione tra neve e dinamica di molte specie vegetali (Pellizzari, Pividori e Carrer 2014; Hallinger, Manthey e Wilmking 2010; Martin et al. 2017; Carrer et al. 2019; Pandey et al. 2020).

Nell'ambito di questo studio si è cercato di valutare l'effetto della permanenza della copertura nevosa sulle diverse fasi fenologiche, in particolare sviluppo delle gemme e accrescimenti primari, in *Juniperus communis* L. (ginepro comune), cercando di comprendere i fattori che influenzano le risposte e le dinamiche fenologiche e confrontando i risultati ottenuti con i precedenti anni di sperimentazione. I valori di fine stagione ottenuti nel 2022, a cinque anni dall'inizio della sperimentazione, mostrano come ci siano alcune differenze nei risultati ottenuti, anche se non rilevanti, rispetto agli anni precedenti (2018-2019-2020-2021).

Le precipitazioni registrate hanno permesso di identificare il 2022 come l'anno più siccitoso mai registrato dal 2018, determinando di conseguenza una netta diminuzione del manto nevoso nell'inverno 2021-2022. La diversa quantità di precipitazioni registrate nei diversi anni però non sembra avere un'influenza diretta sull'accrescimento primario.

L'andamento peculiare delle temperature a fine maggio 2022 ha verosimilmente causato dei danni provocati dal gelo tardivo, soprattutto per quanto riguarda le piante del gruppo S. Grazie anche ai monitoraggi proseguiti nell'anno successivo (2023) si può ipotizzare che la crescita inferiore riscontrata nelle piante scoperte sia dovuta proprio a questo drastico abbassamento delle temperature all'inizio della stagione vegetativa.

Unterholzner et al. (2022) hanno studiato gli effetti della durata della copertura nevosa sull'accrescimento primario e sui tratti fogliari del ginepro comune nello stesso sito, da cui si evince, che lo scioglimento anticipato del manto nevoso ha favorito l'allungamento dei germogli e aumentato la densità stomatica. Tuttavia, le piante sottoposte a una copertura nevosa prolungata sembravano compensare il periodo di crescita più breve. Questo rispecchia i risultati ottenuti ma, a differenza degli altri anni, nell'annata 2022 le piante sottoposte ad una maggiore durata della copertura nevosa sono cresciute di più rispetto quelle S ed N. Va riportato come la velocità di recupero delle piante sottoposte ad un maggiore permanenza del manto nevoso sia stata molto rapida, raggiungendo già al 20° giorno dal primo rilievo, valori paragonabili allo stesso stadio di sviluppo della gemma degli altri trattamenti e impiegando lo stesso numero di giorni di quelle scoperte (S) per raggiungere il massimo stadio di crescita.

Grazie a tale velocità e ad ulteriori condizioni favorevoli gli individui C hanno superato, per la prima volta in cinque anni, la lunghezza massima del getto a fine stagione rispetto agli altri due gruppi. Man mano che gli anni di sperimentazione si susseguono, l'andamento generale sembra portare i trattamenti ai quali sono state

sottoposte le piante a convergere rapidamente verso valori di lunghezza finali simili agli individui di controllo (*N*). Può essere confermata così l'elevata plasticità di crescita del ginepro comune (Tumajer et al., 2021; Unterholzner et al., 2022).

Qualunque tentativo di allungare o ridurre ulteriormente la copertura nevosa si rifletterebbe principalmente sulla lunghezza del periodo di sviluppo e sulla successione temporale delle diverse fasi fenologiche piuttosto che sulla lunghezza stessa dei getti. Emerge infatti come i valori della lunghezza finale del getto siano soprattutto connessi alle diverse condizioni annuali e non al trattamento. Si conferma quindi, quanto riportato da alcuni studi, come l'influenza delle precipitazioni invernali sulle prestazioni degli arbusti possa risultare molto variabile in relazione alle condizioni sito-specifiche e all'interazione di diversi effetti: la copertura nevosa può fornire, infatti, protezione contro il gelo e le perdite di nutrienti del suolo e garantire la disponibilità idrica ma, allo stesso tempo, quando è abbondante, può accorciare la stagione di crescita, ostacolando la crescita o alterando le dinamiche fenologiche (Hallinger, Manthey e Wilmking 2010; Rixen, Schwoerer e Wipf 2010; Francon et al. 2017; Carrer et al. 2019; Gao et al. 2021).

Lo stesso esperimento eseguito in un'altra stazione differente da Passo Giau rappresenterebbe un ulteriore spunto per approfondire le dinamiche d'interesse in considerazione del fatto che nell'area si registrano precipitazioni annuali abbondanti e nello specifico, il sito sperimentale si caratterizza per la presenza di abbondante acqua al suolo (rivolo nelle vicinanze). Molti ginepri, infatti, si insediano su substrati rocciosi e suoli sabbiosi poco profondi, che possono intensificare il deficit idrico, quando presente (Pellizzari et al., 2014).

Negli esperimenti di manipolazione del manto nevoso esiste il rischio di effetti collaterali indesiderati, come la compattazione della neve o la variazione del livello di luce che penetra nel manto nevoso. Inoltre, il lavoro deve essere eseguito a ridosso dello scioglimento naturale della neve, che varia di anno in anno e non può essere previsto con largo anticipo, oltre al fatto che queste tecniche sono generalmente ad alta intensità di manodopera (Wipf & Rixen, 2010). In considerazione di ciò, sarebbe stato interessante allargare lo studio ad ulteriori individui presenti all'esterno del sito, in modo da definire meglio qual è l'effetto reale dell'intervento antropico. In previsione futura si può agire proprio in questa direzione, ampliando la maglia degli individui presi in esame e di conseguenza la numerosità campionaria.

5 Bibliografia

5.1 Articoli scientifici, manuali e report

- Adams R.P. 2014 *Juniperus of the world: The Genus Juniperus*, 4th Edition, 1 Enescu, C. M., Houston Durrant, T., Caudullo, G., de Rigo, D., 2016. **Juniperus communis in Europe: distribution, habitat, usage and threats**. In: San-Miguel-Ayanz, J., de Rigo, D., Caudullo, G., Houston Durrant, T., Mauri, A. (Eds.), *European Atlas of Forest Tree Species*. Publ. Off. EU, Luxembourg, pp. e01d2de+
- Alexander, J. M., Chalmandrier, L., Lenoir, J., Burgess, T. I., Essl, F., Haider, S., Kueffer, C., McDougall, K., Milbau, A., Nuñez, M. A., Pauchard, A., Rabitsch, W., Rew, L. J., Sanders, N. J., & Pellissier, L. (2018). Lags in the response of mountain plant communities to climate change. In *Global Change Biology* (Vol. 24, Issue 2). <https://doi.org/10.1111/gcb.13976>
- Beniston, M., Keller, F., Koffi, B., & Goyette, S. (2003). Estimates of snow accumulation and volume in the Swiss Alps under changing climatic conditions. *Theoretical and Applied Climatology*, 76(3–4), 125–140. <https://doi.org/10.1007/s00704-003-0016-5>
- Bosellini, A. (1989). *La storia geologica delle Dolomiti*.
- Cannone, N., Sgorbati, S., Guglielmin, M. (2007). Unexpected impacts of climate change on alpine vegetation. *Frontiers in Ecology and the Environment*.
- Carlson, B. Z., Corona, M. C., Dentant, C., Bonet, R., Thuiller, W., & Choler, P. (2017). Observed long-term greening of alpine vegetation - A case study in the French Alps. *Environmental Research Letters*, 12(11). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa84bd>
- Carrer, M., Unterholzner, L. & Castagneri, D. Wood anatomical traits highlight complex temperature influence on *Pinus cembra* at high elevation in the Eastern Alps. *Int J Biometeorol* 62, 1745–1753 (2018). <https://doi.org/10.1007/s00484-018-1577-4>
- Carrer, M., Pellizzari, E., Prendin, A. L., Pividori, M., & Brunetti, M. (2019). Winter precipitation - not summer temperature - is still the main driver for Alpine shrub growth. *Science of the Total Environment*, 682. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.05.152>
- Caudullo, Giovanni; Welk, Erik; San-Miguel-Ayanz, Jesús (2023), "Chorological data for the main European woody species", Mendeley Data, V17, doi: 10.17632/hr5h2hcg4.17
- Choler, P. (2015). Growth response of temperate mountain grasslands to inter-annual variations in snow cover duration. *Biogeosciences*, 3885–3897.
- Crowley, T. J. (2000). Causes of climate change over the past 1000 years. *Science*, 289(5477). <https://doi.org/10.1126/science.289.5477.270>
- Fornier, F. (2023). Effects of six years snowpack manipulation on growth and phenology of common juniper (*Juniperus communis* L.) at high elevation. Department of Land, Environment, Agriculture and Forestry. University of Padova.
- Gobiet, A., Kotlarski, S., Beniston, M., Heinrich, G., Rajczak, J., & Stoffel, M. (2014). 21st century climate change in the European Alps-A review. *Science of the Total Environment*, 493, 1138–1151. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.07.050>
- Gritsch, A., Dirnbock, T., Dullinger, S. (2016). Recent changes in alpine vegetation differ among plant communities. *Journal of Vegetation Science*, 1177-1186.
- Grossoni P. Bruschi P. Bussotti F. Selvi F. 2018 *Trattato di botanica forestale*, Parte generale e gimnosperme 1, 312
- Hallinger, M., Manthey, M., & 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). <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2010.03223.x>

- Hazubska-Przybył, T. (2019). Propagation of Juniper species by plant tissue culture: A mini-review. In *Forests* (Vol. 10, Issue 11). <https://doi.org/10.3390/f10111028>
- Holtmeier, F. (2009). Mountain Timberlines. Ecology, Patchiness, and Dynamics. Dordrecht: Springer. doi: 10.1007/978-1-4020-9705-8
- 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.
- IPCC Special Report on Ocean and Cryosphere in a Changing Climate (SROCC)
- IPCC. (2022). Sesto rapporto di valutazione dell'IPCC (AR6): Climate Change 2022 - Impacts, Adaptation and Vulnerability: Mitigazione dei cambiamenti climatici. In IPCC.
- Jonas, T., Rixen, C., Sturm, M., & Stoeckli, V. (2008). How alpine plant growth is linked to snow cover and climate variability. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 113(3). <https://doi.org/10.1029/2007JG000680>
- Körner C., (2012) Alpine Treelines Functional Ecology of the Global High Elevation Tree Limits, 18 doi: 10.1007/978-3-0348-0396-0
- Körner, C. (2012) Alpine Treelines. Berlin: Springer, 220. doi: 10.1007/978-3-0348-0396-0
- Margot e Roland Spohn. Guida agli alberi d'Europa, pag.252
- Martin, A. C., Jeffers, E. S., Petrokofsky, G., Myers-Smith, I., & Maclas-Fauria, M. (2017). Shrub growth and expansion in the Arctic tundra: An assessment of controlling factors using an evidence-based approach. *Environmental Research Letters*, 12(8). <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aa7989>
- Morison, J. I. L., & Morecroft, M. D. (2007). Plant Growth and Climate Change. In *Plant Growth and Climate Change*. <https://doi.org/10.1002/9780470988695>
- Peel M., Finlayson B., McMahon T. (2007). Updated World Map of the Koppen-Geiger Climate Classification. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*. 4. 10.5194/hess-11-1633-2007.
- Pellizzari E, Camarero JJ, Gazol A, Sangüesa-Barreda G, Carrer M. Wood anatomy and carbon-isotope discrimination support long-term hydraulic deterioration as a major cause of drought-induced dieback. *Glob Chang Biol*. 2016 Jun;22(6):2125-37. doi: 10.1111/gcb.13227. Epub 2016 Mar 7. PMID: 26790660.
- Pellizzari, E., Camarero, J. J., Gazol, A., Granda, E., Shetti, R., Wilmking, M., ... & Carrer, M. (2017). Diverging shrub and tree growth from the polar to the mediterranean biomes across the european continent. *Global Change Biology*, 23(8), 3169-3180. <https://doi.org/10.1111/gcb.13577>
- Peters, R., Darling, J. (1985). The Greenhouse Effect and Nature Reserves. *BioScience*, vol. 35, *The Biological Diversity Crisis*, 707-717.
- Rixen, C., Schwoerer, C., & 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. <https://doi.org/10.1111/j.1751-8369.2010.00155.x>
- Tumajer, J., Buras, A., Camarero, J. J., Carrer, M., Shetti, R., Wilmking, M., Altman, J., Sangüesa-Barreda, G., & 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). <https://doi.org/10.1111/geb.13377>
- Thomas, P. A., El-Barghathi, M., & Polwart, A. (2007). Biological Flora of the British Isles: *Juniperus communis* L. In *Journal of Ecology* (Vol. 95, Issue 6). <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2007.01308.x>
- Umberto Boni, Gianfranco Patri, Le erbe. Medicinali aromatiche cosmetiche, Fabbri Editori, Milano 1980, vol. 1
- Unterholzner, L., Prendin, A. L., Dibona, R., Menardi, R., Casolo, V., Gargiulo, S., Boscutti, F., & Carrer, M. (2022). Transient Effects of Snow Cover Duration on Primary Growth and Leaf Traits in a Tundra Shrub. *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.822901>

- Vittoz, P., Cherix, D., Gonseth, Y., Lubini, V., Maggini, R., Zbinden, N., & Zumbach, S. (2013). Climate change impacts on biodiversity in Switzerland: A review. *Journal for Nature Conservation*, 21(3), 154–162. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2012.12.002>
- Wahren, C. H. A., Walker, M. D., & Bret-Harte, M. S. (2005). Vegetation responses in Alaskan arctic tundra after 8 years of a summer warming and winter snow manipulation experiment. *Global Change Biology*, 11(4). <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.00927.x>
- Wipf, S., & Rixen, C. (2010). A review of snow manipulation experiments in Arctic and alpine tundra ecosystems. *Polar Research*, 29(1), 95–109. <https://doi.org/10.1111/j.1751-8369.2010.00153.x>
- Wipf, S., Stoeckli, V., & Bebi, P. (2009). Winter climate change in alpine tundra: Plant responses to changes in snow depth and snowmelt timing. *Climatic Change*, 94(1–2). <https://doi.org/10.1007/s10584-009-9546-x>
- Xu, Y., Ramanathan, V., & Washington, W. M. (2015). Observed high-altitude warming and snow cover retreat over Tibet and the Himalayas enhanced by black carbon aerosols. *Atmospheric Chemistry and Physics Discussions*, 15(13), 19079–19109. <https://doi.org/10.5194/acpd-15-19079-2015>
- Zeng, H., & Jia, G. (2013). Impacts of snow cover on vegetation phenology in the arctic from satellite data. *Advances in Atmospheric Sciences*, 30(5). <https://doi.org/10.1007/s00376-012-2173-x>

5.2 Siti web

<https://climate.copernicus.eu/esotc/2022>

<https://dataspace.copernicus.eu/browser/>

<https://forest.jrc.ec.europa.eu/en/european-atlas/atlas-data-and-metadata/>

<https://ipccitalia.cmcc.it/>

<https://worldview.earthdata.nasa.gov/>

https://www.arpa.veneto.it/arpavinforma/pubblicazioni?b_start=120

<https://www.arpa.veneto.it/temi-ambientali/agrometeo/approfondimenti-agrometeo/atlante-agroclimatico-veneto-temperature>

<https://www.arpa.veneto.it/temi-ambientali/neve/dati/stazioni-automatiche>

<https://www.euforgen.org/species/juniperus-communis/>

https://www.ipcc.ch/report/ar6/syr/downloads/report/IPCC_AR6_SYR_LongerReport.pdf

<https://www.regione.veneto.it/web/agricoltura-e-foreste/dettaglio-news?articleId=3087064>