



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA  
Dipartimento di Territorio e Sistemi Agro-Forestali  
Corso di laurea in Tecnologie Forestali e Ambientali

Analisi dendroecologica su abete bianco (*Abies alba*)  
e abete rosso (*Picea abies*) in Alta Valsugana

Relatore  
Daniele Castagneri

Laureando  
Matteo Eccher

Matricola n.  
2001569

ANNO ACCADEMICO 2022/2023



## ABSTRACT

Le foreste erogano servizi ecosistemici fondamentali per l'uomo. I cambiamenti climatici in atto rendono i periodi di siccità sempre più estremi e frequenti determinando condizioni di stress delle foreste che non sono più in grado di fornire questi servizi provocando danni alla società sia dal punto di vista economico che ambientale. Inoltre, specie particolarmente sensibili alla siccità potrebbero vedere ridotto il proprio areale di distribuzione fino a scomparire. La perdita di biodiversità rende gli ecosistemi naturali meno stabili e più suscettibili ad eventi estremi con conseguente riduzione della capacità produttiva e del contrasto ai fenomeni climatici. Tra le specie che caratterizzano i popolamenti forestali delle Alpi troviamo l'abete rosso (*Picea abies*) e l'abete bianco (*Abies alba*).

Lo studio si occupa di analizzare la risposta delle due specie ai periodi di siccità, attraverso il confronto degli incrementi annuali delle piante ottenuti dall'analisi delle carote di legno con le variazioni climatiche della zona. L'area di studio è quella della Valsugana in cui sono state realizzate due aree di saggio, una nel comune di Caldonazzo (TN) e una nel comune di Levico Terme (TN). Entrambe le aree si trovano ad un'altitudine compresa fra i 900 e i 1300 m s.l.m. In ogni area sono state prelevate 40 carote di legno (20 per ogni specie) ad un'altezza di 1,30 m da terra utilizzando il succhiello di Pressler. La misurazione dell'ampiezza degli anelli è stata eseguita al microscopio con l'ausilio del software TSAP-Win. Le serie di ogni pianta e area sono state sottoposte a cross-dating tramite il programma Cofecha. Dopo il cross-dating le serie sono state elaborate con Arstan, per eliminare i trend di medio-lungo periodo (es. dovuti alla competizione, età, disturbi) e ottenere un andamento medio del popolamento, la cui variabilità interannuale è attribuibile all'andamento dei fattori climatici.

L'analisi della correlazione tra cronologie standardizzate e parametri climatici ha permesso di individuare quali sono le forze climatiche agenti sulle popolazioni. Gli abeti bianchi risultano influenzati dalle temperature dei primi mesi dell'anno. Nello specifico temperature elevate nel mese di febbraio potrebbero avere un effetto nello scioglimento precoce della neve e nella formazione delle gemme, favorendo l'accrescimento radiale nei mesi successivi. Infatti, singole annate molto fredde hanno compromesso l'accrescimento degli abeti bianchi durante la stagione vegetativa.

Nei popolamenti di Caldonazzo gli individui di *Picea abies* risultano sensibili alle temperature estive negli ultimi quarant'anni. L'effetto di temperature molto alte nei mesi dell'estate precedente l'accrescimento, potrebbe comportare la perdita di aghi compromettendo la capacità fotosintetica. Il popolamento di Levico Terme di *Abies alba* non risulta dipendente dalle temperature estive ma è invece correlato positivamente con le temperature massime del mese di novembre. Trattandosi di piante sempreverdi la fotosintesi è possibile anche nel periodo invernale e temperature alte nei mesi autunnali o invernali favoriscono l'accumulo di carbonio per la stagione vegetativa successiva.

In tutti i popolamenti di *Abies alba* e *Picea abies* le precipitazioni estive della stagione precedente condizionano l'accrescimento della stagione corrente. In particolare, la correlazione degli individui di *Picea abies* con le precipitazioni estive è diventata significativa solo negli ultimi quarant'anni. L'aumento della sensibilità nei confronti dei parametri climatici potrebbe essere legato al cambiamento climatico.

L'indicazione di un possibile cambiamento climatico è data dagli individui di *Picea abies* di Caldonazzo che hanno avuto un incremento della loro sensibilità nei confronti delle temperature e delle precipitazioni negli ultimi quarant'anni. Tuttavia, nel caso delle temperature la correlazione è solo marginalmente significativa mentre nel caso delle precipitazioni, sebbene la correlazione sia significativa non è un segnale sufficiente per affermare che il cambiamento climatico stia condizionando la fisiologia di questa specie.

Al fine di valutare l'impatto dei fattori climatici sull'accrescimento delle piante nel breve periodo è stata realizzata un'analisi sugli anni indicatori (pointer years). Le piante possono formare anelli di dimensione ridotta in risposta ad annate con temperature particolarmente basse o alte o ad annate molto siccitose mentre anelli di dimensione maggiore alla media vengono prodotti in anni con condizioni climatiche favorevoli. L'analisi ha confermato la vulnerabilità dell'abete rosso alle estati siccitose, esibendo un

anello di ridotta dimensione nello stesso anno o nell'anno successivo ad estati con poche piogge e alte temperature. Nei popolamenti di abete bianco anelli sottili sono stati individuati in corrispondenza di inizi di stagione vegetativa molto freddi con probabili gelate tardive, confermando la forte dipendenza dalle temperature di febbraio. E' doveroso precisare che questa analisi è puramente qualitativa, basata sui dati climatici e sul riscontro in altri articoli scientifici ma non su test statistici. Analisi più dettagliate e complesse potrebbero aumentare la significatività dei risultati riscontrati negli anni indicatori.

In conclusione, la crescita dei popolamenti analizzati sembra sia guidata dalle condizioni climatiche stagionali e dai caratteri ecologici delle due specie più che dal cambiamento climatico. La previsione di un aumento delle temperature e della severità delle siccità nel futuro potrà rendere vulnerabili le specie ai cambiamenti climatici. I risultati di questo studio possono fornire degli spunti per monitoraggi futuri e per supportare la gestione forestale in un'ottica di tutela delle foreste e dei servizi ecosistemici dai cambiamenti climatici.

## SUMMARY

Forests provide vital ecosystem services for humans. Ongoing climate change makes drought periods increasingly extreme and frequent, leading to stressful conditions in forests that are no longer able to provide these services causing damage to society both from an economic and environmental point of view. Moreover, species particularly susceptible to drought may see their range reduced to the point of disappearance. The loss of biodiversity makes natural ecosystems less stable and more susceptible to extreme events resulting in reduced productive capacity and counteracting climate phenomena. Species that characterize forest populations in the Alps include spruce (*Picea abies*) and silver fir (*Abies alba*).

The aim of this study is to analyze the response of the two species to periods of drought by comparing annual plant increments obtained from wood core analysis with the climatic variations in the area. The study area is located in Valsugana, a valley in southern Trentino, in which two assay areas have been established, one in the municipality of Caldonazzo (TN) and one in the municipality of Levico Terme (TN). Both areas are located at an altitude between 900 and 1300 m above sea level. In each area, 40 wood cores (20 for each species) were taken at an elevation of 1.30 m above the ground using Pressler gimlet. Measurement of ring width was performed under a microscope using TSAP-Win software. The data sets for each plant and area were cross-dated using the Cofecha program. After cross-dating, the data sets were processed with Arstan, to eliminate medium- to long-term trends (e.g. due to competition, age, disturbance) and to obtain an average stand trend, whose interannual variability can be attributed to trends in climatic factors.

Analysis of the correlation between standardized chronologies and climatic identified which climatic forces are acting on populations. Silver firs appear to be influenced by the temperatures in the early months of the year. Specifically, high temperatures in February could have an effect on the early snow melt and bud formation, favoring radial growth in later months. In fact, individual very cold years have impaired silver fir growth during the growing season.

In Caldonazzo populations, individuals of *Picea abies* have been found to be sensitive to summer temperatures for the past four decades. The effect of very high temperatures in the summer months preceding growth could result in the loss of needles, compromising photosynthetic capacity. The Levico Terme stand does not appear to be dependent on summer temperatures but is instead positively correlated with maximum temperatures in November. Since these are evergreen plants, photosynthesis is possible even in the winter period, and high temperatures in the fall or winter months promote carbon accumulation for the next growing season.

In all populations of *Abies alba* and *Picea abies*, summer rainfall if the previous season affects growth if the current season. In particular, the correlation of *Picea abies* individuals with summer precipitation has become significant only in the last four decades. The increased sensitivity to climate parameters could be related to climate change.

The indication of a possible climate change is given by the individuals of *Picea abies* of Caldonazzo who have had an increase in their sensitivity towards temperatures and rainfall in the last forty years. However, in the case of temperatures the correlation is only marginally significant while in the case of precipitation, although the correlation is significant it is not a sufficient signal to state that climate change is affecting the physiology of this species.

In order to evaluate the impact of climatic factors on the growth of plants in the short term, an analysis was carried out on pointer years. Plants can form rings of reduced size in response to years with particularly low or high temperatures or very dry years, while rings of larger than average size are produced in years with favorable climatic conditions. The analysis confirmed the vulnerability of spruce to dry summers, exhibiting a ring of reduced size in the same year or in the year following summers with little rainfall and high temperatures. In silver fir stands, thin rings were identified at the beginning of the very cold growing season with probable late frosts, confirming the strong dependence on February temperatures. It is important to point out that this analysis is purely qualitative, based on climate data and on feedback from other scientific articles but not on statistical tests. More detailed and tricky analyzes could increase the significance of the results found in the indicator years.

In conclusion, the growth of the analyzed populations seems to be driven by stationary climatic conditions and ecological characters of the two species more than by climate change. Predicted increased temperatures and drought severity in the future may make the species vulnerable to climate change. The results of this study may provide insights for future monitoring and to support forest management from a perspective of protecting forests and ecosystem services from climate change.

# Sommario

ABSTRACT .....	
SUMMARY .....	
1. Introduzione .....	1
1.1 La foresta e i servizi ecosistemici.....	1
1.2 Impatto della siccità sull'evoluzione delle foreste .....	1
1.3 Abete rosso e abete bianco .....	3
1.4 Obiettivo .....	3
2. Materiali e metodi .....	4
2.1 Inquadramento del sito di studio .....	4
2.1.1 Area di campionamento Levico Terme.....	5
2.1.2 Area di campionamento Caldonazzo.....	6
2.2 Rilevi in campo.....	7
2.2.1 Campionamento dendrometrico.....	7
2.2.2 Rilevi accessori.....	7
2.3 Attività in laboratorio .....	8
2.3.1 Lavorazione delle carote.....	8
2.3.2 Misurazione numero e dimensione anelli .....	8
2.3.3 Dati climatici .....	9
3. Elaborazione dei dati .....	10
3.3 Anni indicatori .....	11
3.4 Elaborazione dei dati dei rilievi accessori.....	11
4. Risultati .....	12
4.1 Indice di competizione e accrescimento .....	12
4.2 Struttura delle età .....	13
4.3 Correlazione delle cronologie standardizzate con le precipitazioni cumulate mensili .....	14
4.4 Correlazione delle cronologie standardizzate con la temperatura massima media mensile .....	16
4.5 Correlazione delle cronologie standardizzate con la temperatura minima mensile .....	18
4.6 Correlazioni con parametri climatici con annate precedenti .....	20
4.6.1 Correlazione delle cronologie standardizzate con precipitazioni dell'anno precedente .....	20
4.6.2 Correlazione delle cronologie standardizzate con le temperature massime dell'anno precedente .....	22
4.6.3 Correlazione delle cronologie standardizzate con le temperature minime mensili dell'anno precedente .....	24
4.6 Anni indicatori .....	26
4.7 Andamento dei parametri climatici nel corso del tempo.....	27
4.7.1 Andamento delle precipitazioni (1921-2022).....	27

4.7.2 Andamento della temperatura massima (1939-2022).....	28
4.7.3 Andamento della temperatura minima (1939-2022).....	29
5. Discussione .....	30
5.1 Struttura delle età e competizione.....	30
5.2 Relazioni dell'accrescimento con le variabili climatiche .....	31
5.3 Anni indicatori .....	34
5.4 Implicazioni con il cambiamento climatico .....	35
6. Conclusioni .....	38
BIBLIOGRAFIA .....	40





# 1. Introduzione

## 1.1 La foresta e i servizi ecosistemici

Le foreste coprono il 32% della superficie europea ([Hanewinkel et al. 2013](#)) e contribuiscono a fornire numerosi servizi ecosistemici. Per servizi ecosistemici si intendono quelle condizioni e quei processi, forniti dagli ecosistemi (e quindi anche dalle foreste) e dalle specie che li compongono, che contribuiscono a sostenere la vita dell'uomo ([Daily 1997](#)); fra questi si possono ricordare l'approvvigionamento di materie prime, la regolazione del ciclo dei nutrienti e dell'acqua e infine la mitigazione e adattamento al cambiamento climatico e agli eventi estremi. Il cambiamento climatico rende le foreste sempre più suscettibili ai fattori biotici e abiotici con conseguente riduzione della loro funzionalità. Questo determina la degradazione delle foreste e la perdita dei servizi ecosistemici connessi con impatti a cascata a breve e lungo termine sulla società. In particolare, le comunità locali, fortemente dipendenti dai servizi ecosistemici per il loro sostentamento, sono quelle che risentono maggiormente della degradazione ed eventuale scomparsa delle foreste. Inoltre, la perdita di servizi ecosistemici incide sulla protezione del suolo dove la mancanza di una copertura stabile e totale aumenta l'erosione derivante dalla pioggia battente, riduce la coesione fra gli strati di suolo e quindi aumenta il rischio di frane e di colate detritiche, queste ultime fortemente dannose per i centri abitati.

Un altro servizio ecosistemico importante è la mitigazione dei cambiamenti climatici. Le foreste sono un'importante sink di carbonio e quindi in grado di assorbire anidride carbonica (CO<sub>2</sub>) e riemettere ossigeno (O<sub>2</sub>). Quando le foreste vengono distrutte dagli incendi, oltre a non erogare più tutti i vantaggi di cui l'umanità beneficia, contribuiscono a immettere nell'atmosfera ulteriore anidride carbonica e ad amplificare l'effetto iperserra diventando così source di carbonio ([Mitchard 2018](#)).

La forte dipendenza dalle foreste obbliga l'uomo a interrompere le attività che danneggiano le foreste e a mettere in atto azioni di conservazione delle foreste e di riduzione della suscettibilità al cambiamento climatico. Questo con l'obiettivo di mantenere le foreste in grado di fornire i servizi ecosistemici fondamentali per l'uomo.

## 1.2 Impatto della siccità sull'evoluzione delle foreste

La distribuzione attuale delle foreste è legata a parametri climatici come temperatura e precipitazioni. Una variazione del clima può portare a modificare fortemente gli areali di distribuzione delle specie fino a comprometterne la presenza sulla Terra portandole all'estinzione.

La previsione per il futuro è che per il 2040 la temperatura globale della Terra aumenterà di 1,5 °C ([IPPC et al. 2022](#)). Tra i vari effetti dell'incremento di temperatura ci sono l'aumento dell'intensità e della frequenza dei periodi di siccità. L'anno 2022 rappresenta un'anticipazione delle siccità dei prossimi anni. In questo anno la mancanza delle precipitazioni atlantiche ha portato complessivamente ad una situazione di anomalia pluviometrica negativa per l'Italia. Inoltre, anomalie positive della temperatura hanno ridotto l'apporto di neve sulle Alpi aggravando ulteriormente l'emergenza di siccità in Italia. Dopo un lungo periodo di stato di allerta, alla fine dell'estate 2022 l'emergenza appariva parzialmente superata ([Bonaldo et al. 2022](#)). Tuttavia, ad inizio 2023 la mancanza di precipitazioni idriche e nevose significative vede i bacini alpini ben al di sotto del loro livello di riferimento, con quindi il rischio di una nuova siccità anche per l'estate 2023.

La pericolosità dei periodi di siccità è rappresentata dal fatto che si verificano condizioni molto limitanti per la sopravvivenza delle piante dato che la mancanza di acqua per un periodo

prolungato provoca nelle piante il blocco di tutti i processi metabolici. L'intensificazione degli eventi siccitosi sta portando ad un aumento della mortalità delle piante ([IPPC et al. 2022](#)) su scala globale con la conseguente perdita di superficie forestale e dei servizi connessi. Specie molto esigenti in termini di acqua sono quindi fortemente minacciate e dovranno riuscire a adattarsi a questo nuovo clima o vedranno ridursi il loro areale. Fra queste specie troviamo il faggio (*Fagus sylvatica*), i pini (*Pinus spp.*) e l'abete rosso (*Picea abies*). Quest'ultimo in particolare sembra essere una specie che ridurrà fortemente il suo areale arrivando per il 2100 ad essere limitato a parte della Svezia e alle quote più elevate delle Alpi ([Hanewinkel, et al. 2013](#)). D'altra parte, specie termofile come le querce (*Quercus spp.*) potrebbero salire di quota andando a colonizzare territori attualmente occupati da specie microterme.

Gli effetti delle siccità porteranno a notevoli cambiamenti in termini di produttività, di struttura e di composizione di interi ecosistemi. Bisogna considerare che alcune specie attualmente presenti possano non riuscire ad adattarsi al nuovo clima, e quindi andranno dapprima a diminuire la loro presenza per poi scomparire. La perdita della biodiversità rappresenta un fenomeno che sta avvenendo su scala globale e che potrebbe interessare anche le Alpi con conseguenze molto importanti. La biodiversità, infatti, supporta la resistenza e la resilienza degli ecosistemi evitando disturbi e assicurando la continua erogazione dei servizi ecosistemici, inoltre contribuisce anche alla mitigazione dei cambiamenti climatici e al mantenimento di una produzione legnosa costante ([del Rio et al. 2017](#)). La riduzione del numero di specie renderà gli ecosistemi forestali molto più fragili e sensibili agli eventi di siccità portando ad una riduzione della loro funzionalità e a conseguenze importanti anche sulla nostra società.

Le conseguenze della riduzione delle precipitazioni e dell'aumento degli eventi siccitosi possono essere misurate sia in termini ecologici che economici. Infatti, i cambiamenti nella distribuzione delle specie forestali porteranno notevoli conseguenze economiche. È previsto che per il 2100 ci sarà un deprezzamento medio dei terreni forestali europei del 34% legato essenzialmente al declino delle specie ad alto valore economico, prima fra tutte l'abete rosso (*Picea abies*) ([Hanewinkel et al. 2013](#)). Fra le conseguenze più importanti ci sono le perdite di reddito per i proprietari forestali ma anche la riduzione della materia prima per l'industria del legno e per l'alimentazione delle industrie a biomasse.

Se da una parte l'aumento delle siccità porterà a conseguenze negative è anche vero che nei prossimi anni l'aumento dell'anidride carbonica e delle temperature potrebbe favorire la crescita delle piante e l'allungamento del periodo vegetativo. Questa ipotesi ha maggiore validità per le quote più alte delle Alpi dove attualmente lo sviluppo delle piante è fortemente limitato da temperature rigide e il periodo vegetativo è ridotto solo a pochi mesi. Da uno studio condotto su foreste europee ([Hanewinkel et al. 2013](#)) è stato evidenziato come gli effetti positivi dell'aumento delle temperature verranno però annullati in futuro dall'aumento degli eventi estremi, fra i quali l'aumento delle siccità, dell'epidemie di insetti e delle tempeste. È quindi plausibile che nel futuro lo spostamento delle specie forestali e l'aumento degli eventi estremi andranno ad intaccare la stabilità degli attuali ecosistemi forestali modificandone composizione, struttura e biodiversità.

### 1.3 Abete rosso e abete bianco

L'abete rosso (*Picea abies* (L.) Karst.) e l'abete bianco (*Abies alba* Mill.) sono due tra le specie più importanti in ambito europeo e alpino in termini di distribuzione, di importanza ecologica ed economica.

Queste, infatti, sono caratterizzate da un'elevata produttività e da un legno di elevata qualità, molto richiesto sul mercato per vari utilizzi, inoltre presentano il grosso vantaggio di poter sostituire materiali ad alta intensità energetica come possono essere l'acciaio e il calcestruzzo, permettendo un notevole risparmio di energia ([Stangler et al. 2022](#)).

L'abete rosso è una specie largamente diffusa nell'arco alpino e di notevole importanza commerciale. È una specie microterma ed esigente in termini idrici e per queste motivazioni si prevede una diminuzione della sua diffusione a causa del cambiamento climatico in atto. Particolarmente vulnerabili sono le piante introdotte in zone al di fuori del loro areale potenziale ([Hartl-Meier et al. 2014](#)), non solo a causa della siccità ma anche per quanto riguarda le fitopatie. L'abete bianco è anch'essa una specie molto importante nella gestione forestale, spesso indicata come alternativa all'abete rosso in quanto potrebbe addirittura trarre beneficio dall'aumento delle temperature ([Stangler et al. 2022](#)).

Recenti studi hanno dimostrato che l'abete bianco è una specie resistente nei confronti delle siccità e che, in condizioni di lieve siccità, ha manifestato un incremento della crescita essenzialmente legato all'aumento delle temperature contestuale alla mancanza di precipitazioni. Al contrario, l'abete rosso si dimostra molto sensibile nei confronti di lievi siccità, con conseguente riduzione della crescita. In casi di siccità forti entrambe le specie evidenziano una riduzione della crescita, che risulta però molto più pronunciata nell'abete rosso ([Bottero et al. 2021](#)).

### 1.4 Obiettivo

Nel presente studio si vuole confrontare se esiste una correlazione fra la dimensione degli anelli di accrescimento e l'andamento climatico ma anche verificare quanto i periodi siccitosi abbiano inciso sulla dimensione degli anelli. Si vuole inoltre confrontare l'eventuale diversa suscettibilità alla siccità di *Picea abies* e *Abies alba*.

Lo studio della suscettibilità alla siccità delle specie forestali rappresenta un elemento di conoscenza importante per compiere delle corrette scelte nella composizione forestale, favorendo specie meno suscettibili alla siccità.

## 2. Materiali e metodi

### 2.1 Inquadramento del sito di studio

Il sito di studio è localizzato nelle Alpi Orientali più precisamente nella provincia autonoma di Trento. Sono presenti due aree di saggio entrambe localizzate in Valsugana. Una ricade nel comune di Caldonazzo (TN) in località Spiazzo Alto, mentre l'altra nel comune di Levico Terme (TN) in località Pe de Fronte.

Il sito di studio è delimitato a Ovest dai laghi di Caldonazzo e Levico, a Est dal proseguimento della Valsugana che termina in Veneto, a Nord dalla Catena del Lagorai e a Sud dall'Altopiano di Vezzena.

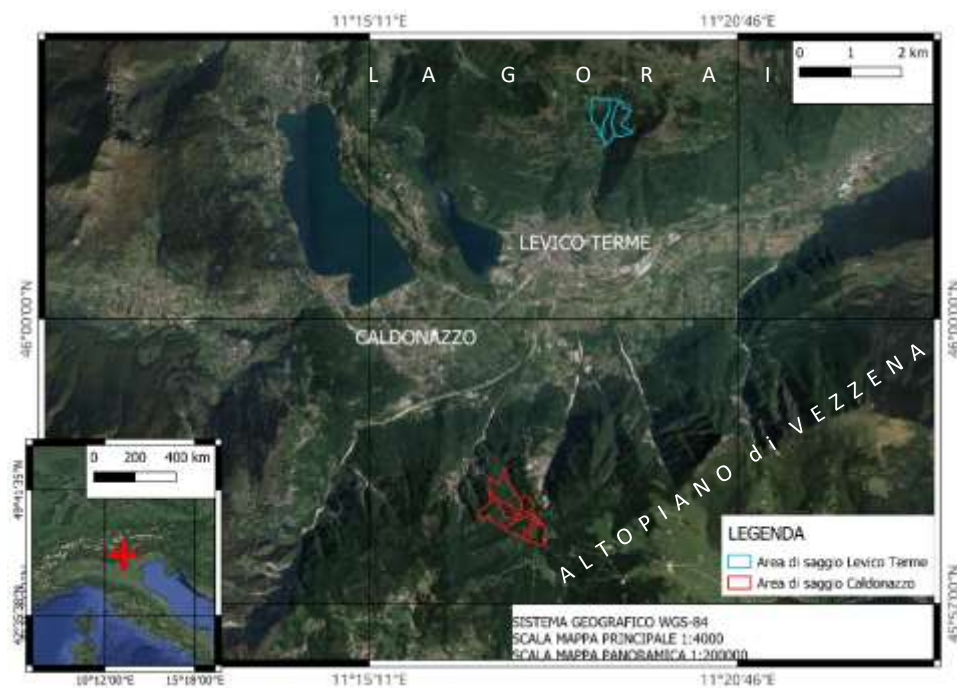


Figura 1 Mappa del sito di studio. In blu le particelle interessate dal campionamento di Levico Terme e in rosso quella interessate dal campionamento di Caldonazzo

Il clima che caratterizza le aree di studio è di tipo prealpino a regime pluviometrico equinoziale con due massimi, rispettivamente in primavera e in autunno. La piovosità rimane consistente anche durante l'estate mentre in inverno si riduce notevolmente (Tab. 1). Le precipitazioni nevose sono presenti ogni anno e il manto nevoso spesso permane fino a marzo inoltrato ([ECOS et al. 2020](#)).

Le temperature massime si raggiungono nel periodo estivo con agosto che rappresenta il mese più caldo.

## Diagramma Termo-Pluviometrico

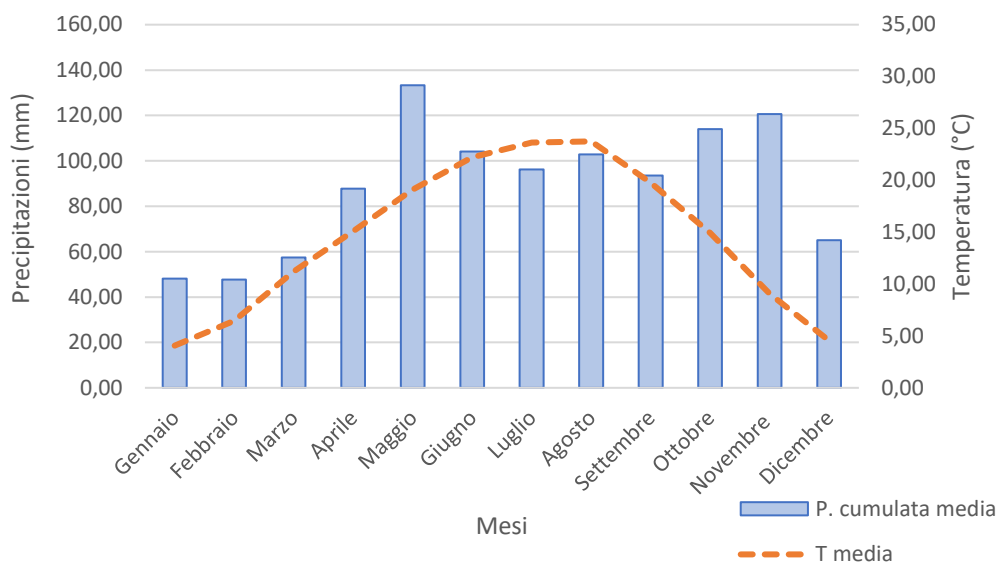


Tabella 1 Diagramma termo-pluviometrico con dati raccolti dalla stazione meteo di Levico Terme, altitudine 502 m s.l.m., 46.0106 11.3051

### 2.1.1 Area di campionamento Levico Terme

L'area di campionamento di Levico Terme si sviluppa sulle particelle 10, 6 e 5 del "Piano di Gestione Forestale Aziendale dei Beni Silvo-Pastorali del comune di Levico Terme" e copre complessivamente una superficie di 46,9 ha (Fig. 2).

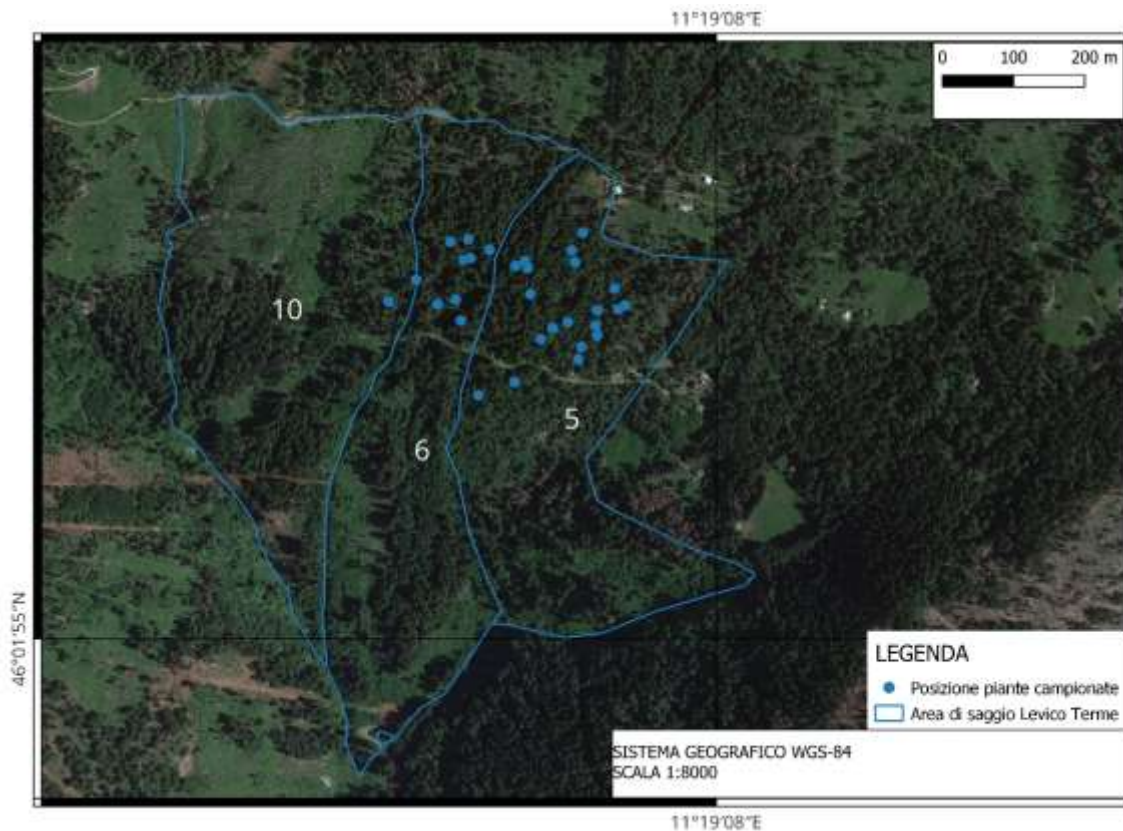


Figura 2 Panoramica dell'area di campionamento di Levico Terme con le particelle forestali 10,6 e 5

Il territorio è fortemente inclinato con pendenze che raggiungono anche i 40°, esposto a Sud-Ovest e va da una quota minima di 900 m s.l.m. ad un'altitudine massima di 1300 m s.l.m. Nonostante la pendenza elevate non si evidenziano affioramenti rocciosi e fenomeni erosivi importanti.

Il tipo forestale reale è l'abeteto silvicolo misto ad abete rosso, con sporadica partecipazione di larice e faggio, quest'ultimo in lenta affermazione nel sottobosco. La struttura è quella multiplana, con nuclei di rinnovazione diffusi in maniera sparsa su tutta l'area, e gruppi stramaturi posizionati nella parte bassa. Nella particella dieci abete bianco e abete rosso tendono però a formare una struttura tipicamente monoplana. La provvigione media delle particelle è di 510 m<sup>3</sup>/ha (ECOS et al. 2020).

La porzione Nord-Ovest è stata colpita dalla tempesta Vaia nell'autunno del 2018 determinando la rimozione quasi totale del soprassuolo. Attualmente è occupata da singoli individui rimasti isolati, arbusti e giovani individui.

### 2.1.2 Area di campionamento Caldonazzo

L'area di Caldonazzo è composta da quattro particelle (4, 5, 6 e 35) appartenenti al "Piano di Gestione Forestale Aziendale dei Beni Silvo-Pastorali del comune di Caldonazzo" e copre una superficie totale 85,2 ha (Fig. 3).

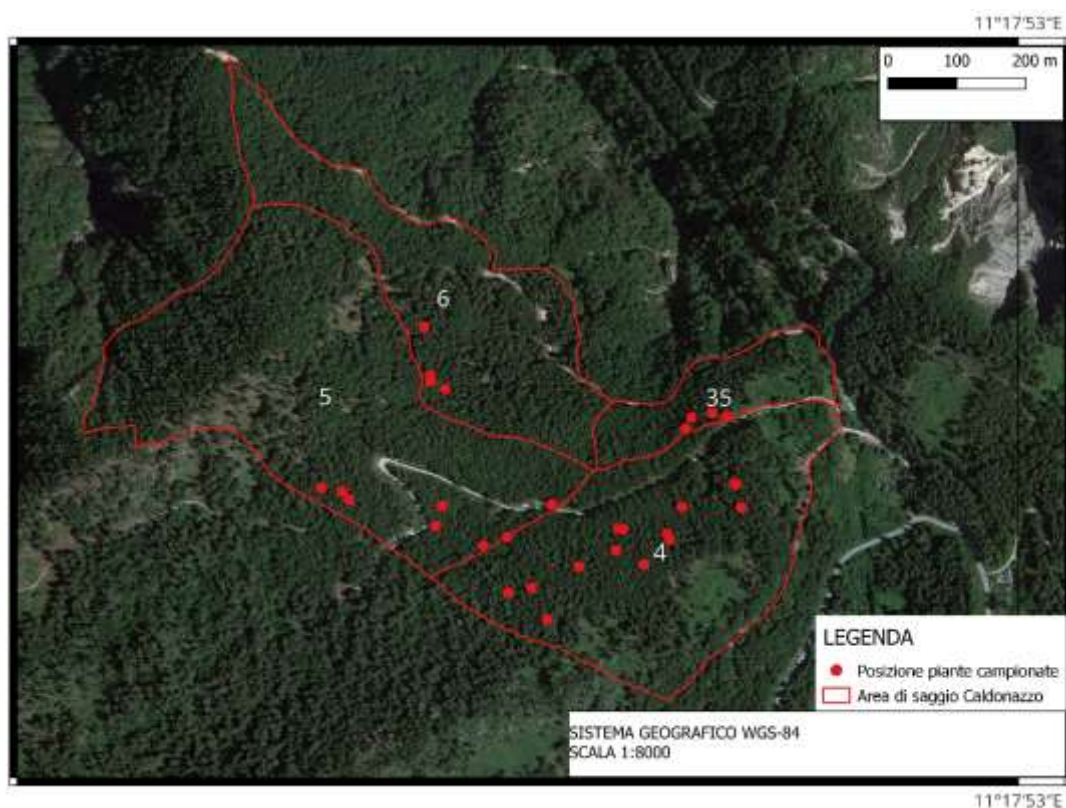


Figura 3 Panoramica dell'area di saggio di Caldonazzo con particelle 4, 5, 6 e 35

Il territorio è esposto a Nord-Est ed è compreso in una fascia altitudinale che va dai 1000 ai 1300 m s.l.m. Anche in quest'area di saggio la pendenza rimane elevata con picchi di 30°.

Nelle particelle 4 e 5 il terreno risulta essere molto sassoso con presenza di grossi massi che emergono dal suolo. Le specie maggiormente presenti sono abete bianco, abete rosso e faggio che formano popolamenti misti monoplani con scarsa presenza di rinnovazione.

La provvigione media dell'area è di 325 m<sup>3</sup>/ha.

## 2.2 Rilevi in campo

I rilievi in campo, condotti nella primavera del 2023, includono il prelievo delle carote da abeti adulti e altre misurazioni accessorie come dettagliato di seguito.

### 2.2.1 Campionamento dendrometrico

Per ogni area di campionamento sono state prelevate 20 carote per specie (abete rosso e bianco). Per la selezione delle piante idonee ad essere carotate sono stati utilizzati dei criteri precedentemente concordati. In primo luogo, la pianta doveva essere viva, con mancanza di patologie o danni evidenti e con diametro superiore ai 40 cm. Quest'ultima attenzione è stata importante per poter avere piante almeno di età di 50 anni. Un altro aspetto da considerare sono i disturbi di natura abiotica (es. schianti da vento) e antropica (es. tagli) che potrebbero influire sulla crescita delle piante mascherando l'eventuale impatto del clima e delle siccità. Per questo motivo sono state scartate piante troppo isolate e zone in cui sono stati eseguiti diradamenti recentemente, i cui effetti erano ancora visibili.

Individuata la pianta l'estrazione è avvenuta tramite l'utilizzo del succhiello di Pressler eseguendo il foro di entrata ad un'altezza di 1,30 m da terra. Il campione prelevato è stato posizionato su un supporto in legno e fissato tramite del nastro adesivo in carta. Ogni campione è stato catalogato secondo un codice di sette cifre: due relative alla località (CA per Caldonazzo e LE per Levico), tre indicanti il numero progressivo e due relative alla specie (PA per *Picea abies* e AA per *Abies alba*). Ad esempio, la prima carota estratta a Levico è stata catalogata come LE001PA.

Ad ogni prelievo è stato disinfettato il carotatore con un passaggio di amuchina al fine di evitare la trasmissione di malattie fra piante diverse.

### 2.2.2 Rilievi accessori

Oltre all'estrazione della carota, per ogni pianta, sono stati eseguiti dei rilievi accessori.

E' stato misurato il diametro dell'albero carotato. Sono poi stati misurati i diametri e le distanze dall'individuo campionato delle piante incluse in un'area circolare di raggio di 8 m dall'individuo campionato. Questi dati sono stati raccolti al fine di determinare l'indice di competizione per ogni pianta campionata.

Le distanze topografiche sono state misurate tramite un distanziometro a laser mentre per il diametro è stato utilizzato il cavalletto dendrometrico.

Il distanziometro che è stato usato anche per il rilievo della pendenza del terreno. L'entità della pendenza è importante perché correlata negativamente con la disponibilità di suolo e di nutrienti e può quindi influenzare l'entità della crescita delle piante ([Tsui et al. 2004](#)).

Infine, per alcune piante è stata misurata l'altezza al fine di ricostruire la curva ipsometrica e confrontare le altezze fra i diversi siti.



## 2.3 Attività in laboratorio

Dopo i rilievi in campo, in laboratorio si è proseguito preparando le carote per renderle idonee per la misurazione degli anelli.

### 2.3.1 Lavorazione delle carote

Quando le carote vengono estratte gli anelli sono difficilmente visibili specialmente se molto piccoli. Per questo motivo le carote sono state incollate ai supporti e con una levigatrice sono stati rimossi i primi millimetri per rendere la superficie levigata, al fine di rendere visibili gli anelli (Fig.4). In totale sono stati eseguiti tre passaggi con carta abrasiva di granulometria progressivamente più fine: un primo passaggio con granulometria P90, poi un secondo passaggio con una da P150 e infine un ultimo passaggio con granulometria P320.



*Figura 4 Confronto fra due campioni: non levigato sopra e levigato sotto*

### 2.3.2 Misurazione numero e dimensione anelli

L'ampiezza degli anelli è stata misurata tramite lo strumento ANIOL e il software TSAP-Win. Attraverso l'aiuto di uno stereoscopio per visualizzare meglio il termine dell'anello, sono state misurate le carote levigate in laboratorio partendo dall'anello più vicino alla corteccia (corrispondente all'anno 2022), con una risoluzione pari a 1/100 di millimetro. Con una manovella ogni carota è stata fatta scorrere sul tavolo dello stereoscopio da inizio anello fino al punto in cui, tramite lo stereoscopio, viene individuata la fine dell'anello. A questo punto azionando un pulsante il software TSAP-Win calcola lo spostamento della carota sul tavolo registrando l'ampiezza dell'anello. Un'accortezza importante è stata quella di mantenere la linea del mirino parallela agli anelli in modo da effettuare una corretta misura. Per questo motivo ogni qual volta l'orientamento degli anelli cambiava è stato necessario modificare la posizione della carota sul tavolo in modo da rendere gli anelli paralleli all'obiettivo.

Per ogni pianta è stata quindi creata una serie datata di misure di ampiezza degli anelli denominata serie elementare ([Nola 1992](#))

Queste sono state raggruppate per area di saggio e poi per specie ottenendo quindi 4 quattro file diversi in formato Tucson.

### 2.3.3 Dati climatici

I dati climatici utilizzati per le elaborazioni successive sono stati reperiti dalla stazione di Meteo Trentino situata a Levico Terme ([Meteo Trentino stazione di Levico Terme T0010](#)). In particolare, sono stati utilizzati i dati delle temperature massime e minime medie mensili disponibili dal 1939 e i dati di precipitazione cumulata mensile disponibili dal 1921.

### 3. Elaborazione dei dati

#### 3.1 Verifica delle misure e cross-dating

La verifica dei dati viene fatta innanzitutto graficamente, sovrapponendo le curve delle diverse serie elementari e verificando che queste siano sincrone.

È stato poi utilizzato il software Cofecha ([Holmes 1983](#)) che ha permesso di individuare eventuali asincronismi nelle serie elementari. Le carote asincrone sono state rimisurate e, se sono stati individuati errori dovuti ad anelli mancanti o a conteggio errato sono stati corretti rendendo sincrone le carote. Quando l'asincronia non è imputabile ad errori come mancanza di anelli o conteggio errato, significa che quella pianta ha avuto un accrescimento anomalo rispetto alla media della zona. Poiché in questo studio si intende verificare la correlazione fra accrescimento e clima delle due specie e non indagare le eventuali condizioni microstazionali che hanno determinato l'andamento anomalo di singole piante, le serie elementari aventi un andamento asincrono rispetto alla media sono state eliminate.

L'analisi di cross dating è stata eseguita per ognuno dei quattro file Tucson.

Tuttavia, nell'area di Levico Terme per gli individui di *Picea abies* non è stato possibile individuare un andamento sincrono per le serie elementari e quindi non sono stati sottoposti alle correlazioni con i parametri climatici ma solo all'analisi dell'indice di competizione.

#### 3.2 Elaborazione dei dati di accrescimento e correlazioni con i parametri climatici

Le età delle piante ottenute dal conteggio del numero di anelli delle carote sono state utilizzate per realizzare la curva di distribuzione delle età con Excel.

Per quanto riguarda le serie elementari, sottoposte a cross-dating, sono state elaborate con il software Arstan. È un programma che permette di standardizzare le serie elementari e applicando una robusta stima della funzione media, di eliminare gli effetti di medio lungo-periodo derivanti dall'età degli alberi, dalla competizione e dai disturbi antropici sugli accrescimenti dei popolamenti. Si ottiene quindi un andamento medio dell'intero popolamento, ossia la cronologia standardizzata. Nel software è possibile selezionare varie funzioni da applicare alle serie elementari che restituiscono risultati diversi. Nel caso oggetto di studio quella utilizzata è la "spline" con un'ampiezza di vent'anni.

La variabilità della cronologia standardizzata può essere descritta dal coefficiente di sensibilità media che individua la variazione media fra due anelli successivi ([Nola 1992](#)). Le cronologie standardizzate risultano quindi prive dei trend di medio-lungo periodo e pertanto la variabilità interannuale può essere associata alla variabilità interannuale del clima.

Per queste caratteristiche le cronologie standardizzate vengono utilizzate per confrontare i parametri climatici nel medio-lungo periodo (80-100 anni).

Per verificare l'esistenza di correlazioni fra le cronologie standardizzate e i dati climatici come le precipitazioni, le temperature massime e minime è stato utilizzato l'indice di correlazione di Pearson ( $r$ ). Nello specifico le correlazioni sono state eseguite fra accrescimento annuale delle cronologie standardizzate e le variabili climatiche riferite ai singoli mesi, al fine di verificare quale periodo dell'anno incidesse maggiormente sull'accrescimento. I mesi con correlazioni maggiori sono stati uniti tramite la media dei singoli mesi al fine di realizzare un'altra correlazione per evidenziare un'eventuale dipendenza dell'accrescimento da un periodo più ampio di un singolo mese. Le stesse correlazioni sono state eseguite fra accrescimenti e variabili climatiche ma dell'anno precedente rispetto a quello dell'accrescimento. In questo modo è stato possibile valutare se esistesse un'influenza dell'andamento climatico dell'anno sull'accrescimento dell'anno successivo.

### 3.3 Anni indicatori

L'analisi della dipendenza dai fattori climatici può essere svolta nel lungo periodo attraverso le correlazioni come indicato nel paragrafo 3.2. ma un approccio differente può essere anche quello di valutare l'influenza degli eventi climatici estremi sugli accrescimenti. Le piante rispondono ad eventi climatici estremi (pointer year) in breve tempo esibendo all'interno delle cronologie standardizzate un anello con dimensione superiore o inferiore alla media. Nello specifico anelli di dimensione ridotta vengono prodotti come risposta ad annate con temperature particolarmente basse o alte o ad annate molto siccitose ([Kelly et al. 2002](#)) mentre anelli di dimensione maggiore alla media vengono prodotti dalle piante in anni con condizioni favorevoli allo sviluppo. Questi anelli che presentano dimensioni superiori o inferiori alla media vengono denominati indicatori. Al fine di individuare queste annate sono state calcolate media e deviazione standard dei tre popolamenti: *Picea abies* e *Abies alba* su Caldonazzo e *Abies alba* su Levico. Gli anni indicatori vengono indicati come tali se sono superiori o inferiori alla soglia data dalla somma o differenza della media con due volte la deviazione standard ([Begović et al. 2020](#)). Nel presente elaborato, il focus è lo studio di quelle annate particolarmente critiche per le piante e quindi sono state prese in considerazione solo annate in cui l'accrescimento è stato inferiore alla differenza di media e due volte la deviazione standard.

### 3.4 Elaborazione dei dati dei rilievi accessori

I dati ottenuti dai rilievi accessori sono stati utilizzati per determinare l'indice di competizione di Hegyi secondo la seguente formula:

$$C_i = \sum_j \frac{d_j/d_i}{(R_{ij} + 1)}$$

L'indice di competizione di Hegyi ( $C_i$ ) è pari alla somma dei singoli contributi delle piante entro il raggio di 8 m, dove  $d_j$  è il diametro del competitore misurato ad 1,30 m,  $d_i$  è il diametro della pianta carotata e  $R_{ij}$  la distanza fra il competitore e la pianta carotata.

Questo indice esprime il grado di competizione a cui la pianta è sottoposta in funzione del diametro e della distanza dei competitori ([Garcia et al. 2020](#)). Quindi più il valore è alto più la pianta subisce la competizione degli individui circostanti. L'indice di competizione è stato utilizzato nella correlazione con l'accrescimento medio delle piante negli ultimi dieci anni per verificare se la competizione sia un fattore che indice sull'accrescimento delle piante. Il programma utilizzato è sempre Excel.

## 4. Risultati

### 4.1 Indice di competizione e accrescimento

La correlazione fra l'indice di competizione e l'accrescimento medio negli ultimi 10 anni è stata eseguita per ogni area di campionamento e per ogni specie (Fig. 5).

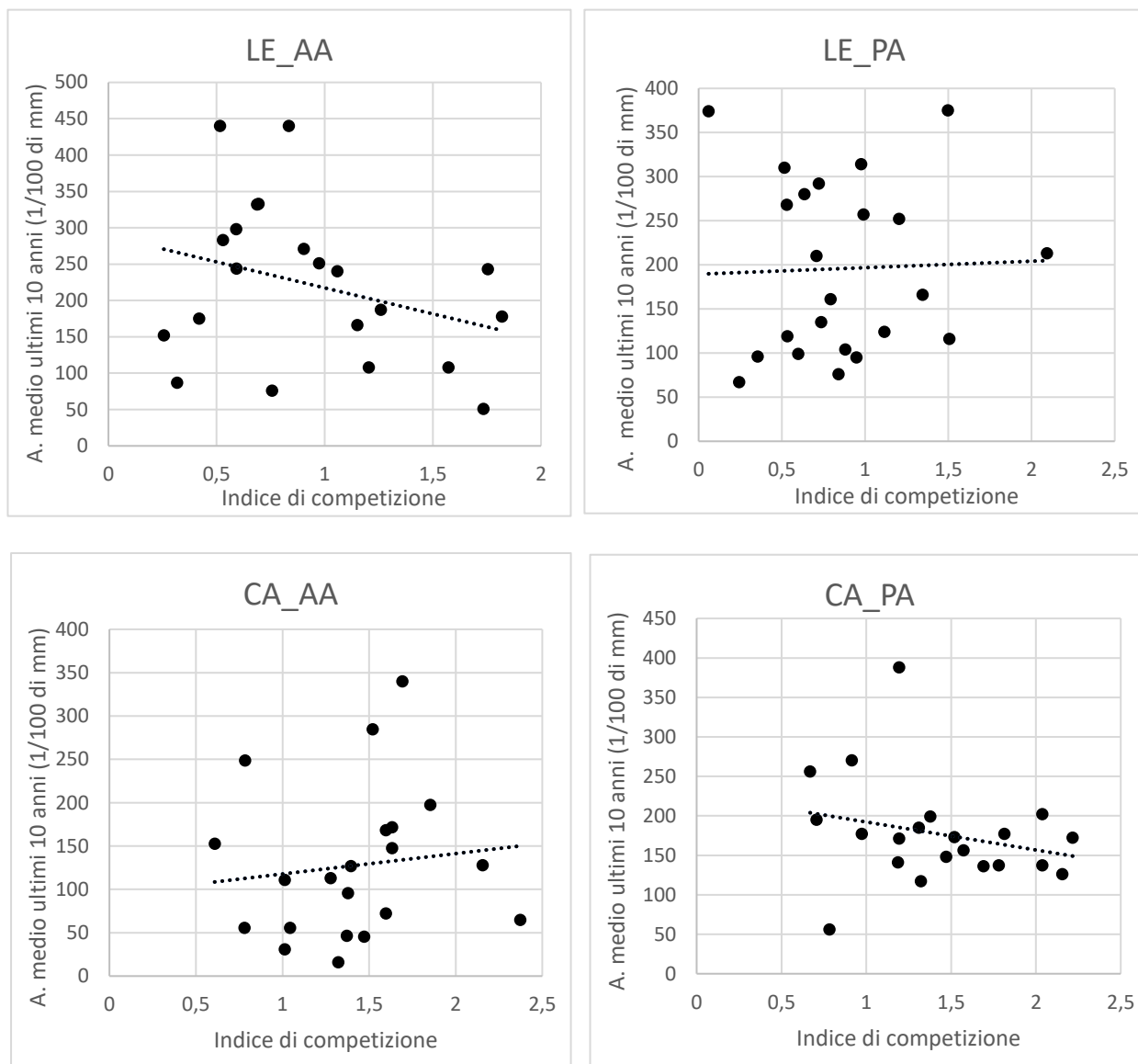


Figura 5 Grafici delle correlazioni fra accrescimento medio e indice di competizione. In alto le due aree di campionamento di Levico Terme di *Abies alba* (LE\_AA) e di *Picea abies* (LE\_PA). In basso le due aree di campionamento di Caldonazzo di *Abies alba* (CA\_AA) e *Picea abies* (CA\_PA).

Campione	I. C. (r)
LE_AA	-0,312
LE_PA	0,034
CA_AA	0,120
CA_PA	-0,250

Tabella 1 Indice di correlazione  $r$  di Pearson per i diversi campioni.

Gli indici di correlazione ( $r$ ) in nessuno dei diversi campioni hanno superato la soglia della significatività e quindi evidenziano come non esista una correlazione significativa fra l'accrescimento medio degli ultimi 10 anni e l'indice di competizione (Tab. 1).

## 4.2 Struttura delle età

La struttura delle età è stata rappresentata per ogni area di campionamento suddividendo nella due specie: *Picea abies* (PA) e *Abies alba* (AA) (Fig. 6-7). Per verificare l'eventuale somiglianza esistente nell'età media delle due specie sono stati eseguiti dei test t

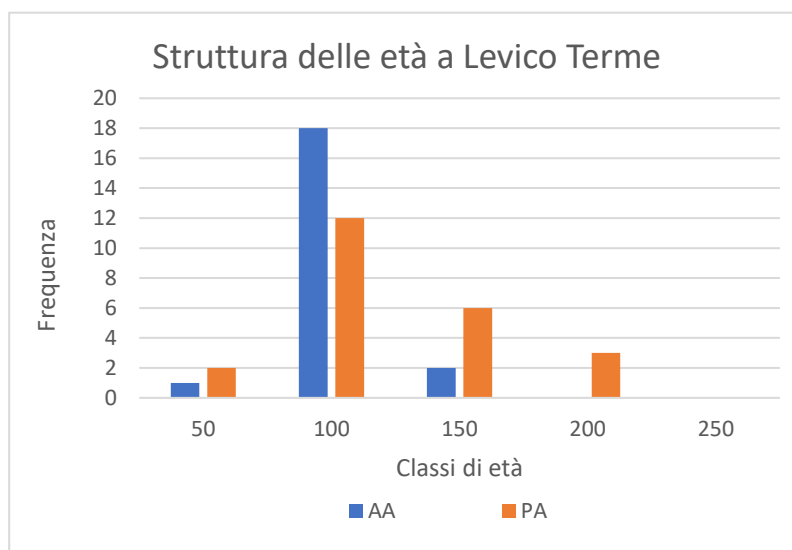


Figura 6 Struttura delle classi di età nell'area di campionamento di Levico Terme. In arancione le piante di *Picea abies* (PA) e in blu le piante di *Abies alba* (AA)

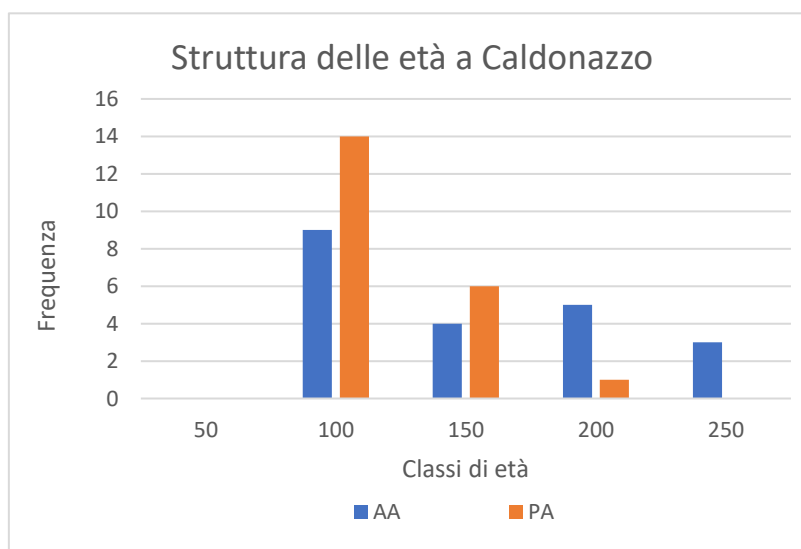


Figura 7 Struttura delle classi di età nell'area di campionamento di Caldonazzo. In arancione le piante di *Picea abies* (PA) e in blu le piante di *Abies alba* (AA)

Il risultato del test t eseguito sui campioni di *Abies alba* indica che le medie fra i due popolamenti risultano essere diverse. Nel caso dei campioni di *Picea abies*, i popolamenti di Caldonazzo e Levico Terme hanno un'età media simile (Tab.2). In effetti anche a livello grafico (Fig. 6-7) le colonne arancioni rappresentanti i due campioni di *Picea abies* risultano avere una distribuzione delle frequenze delle classi di età molto simile.

AA Caldonazzo-Levico Terme		PA Caldonazzo-Levico Terme	
TEST.T	0,009	TEST.T	0,966
	p<0,05		p>0,05

Tabella 2 Confronto tramite test della somiglianza dell'età media dei campioni di *Picea abies* e di *Abies alba*

Nel confronto fra specie della stessa area di campionamento è emerso come nell'area di Caldonazzo le specie di *Abies alba* e *Picea abies* risultano avere un'età media diversa (p<0,05) mentre nell'area di Levico Terme le due specie risultano avere età media simile (p>0,05) (Tab.3).

Caldonazzo PA-AA		Levico Terme PA-AA	
TEST.T	0,043	TEST.T	0,407
	p<0,05		p>0,05

Tabella 3 Confronto tramite test.t della somiglianza dell'età media dei campioni di *Picea abies* e *Abies alba* della stessa area di campionamento

### 4.3 Correlazione delle cronologie standardizzate con le precipitazioni cumulate mensili

La correlazione è stata eseguita fra le cronologie standardizzate dei diversi campioni e le precipitazioni cumulate mensili, lungo due periodi: uno dal 1921 al 2022 e uno per valutare l'andamento negli ultimi quarant'anni dal 1982 al 2022.

Partendo dal periodo 1921-2022, nell'area di Caldonazzo, esiste una correlazione negativa significativa con le precipitazioni di marzo per la cronologia standardizzata di *Abies alba* (Tab.4), mentre sono marginalmente significative le correlazioni con le precipitazioni in luglio e settembre per la cronologia di *Picea abies* (Tab.5). Per quanto riguarda la cronologia di *Abies alba* di Levico Terme sono significative le correlazioni con le precipitazioni nei mesi di giugno e agosto.

Nel periodo 1982-2022, nella cronologia standardizzata di *Abies alba* di Caldonazzo è risultata significativa la correlazione con le precipitazioni nel mese di novembre e marginalmente significativa la correlazione con l'intervallo di mesi che va da settembre a novembre (Tab.4). Nella cronologia di *Picea abies* di Caldonazzo è significativa la correlazione positiva con il mese di novembre e negativa con il mese di dicembre. Risulta essere significativa anche la correlazione con l'intervallo di mesi settembre-novembre (Tab.5). Le correlazioni significative sono invece completamente assenti nella cronologia di *Abies alba* di Levico Terme per il periodo 1982-2022 e quindi non risulta essere dipendente da nessun mese (Tab.6).

		CA_AA												
		gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic	
I. C. (r)	1921-2022	-0,0259	-0,1285		**0,2074	0,0674	-0,1130	0,0545	0,0319	-0,0863	0,0910	-0,0977	0,1523	0,0184
I. C. (r)	1982-2022	-0,0781	-0,1697		-0,1891	0,0548	-0,2221	0,0694	-0,0007	-0,1834	0,2371	-0,1499	**0,3560	0,1154
I. C. (r)		set-nov	feb-mag	set-nov e feb-mag										
I. C. (r)	1921-2022	0,0866	-0,1676		0,0085									
I. C. (r)	1982-2022	*0,2949	-0,2141		0,1714									

Tabella 4 Correlazioni con le precipitazioni mensili cumulate per la cronologia standardizzata di Abies alba di Caldanzazo (CA\_AA) lungo due periodi (1921-2022 e 1982-2022).  
Livelli di significatività: "\*" 0,1, "\*\*\*" 0,05

		CA_PA												
		gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic	
I. C. (r)	1921-2022	0,0201	0,0693		-0,0015	0,0130	-0,1385	-0,1021	*0,1995	0,0908	*0,1968	-0,0176	0,0965	-0,1366
I. C. (r)	1982-2022	0,1199	0,1953		-0,0552	0,1300	-0,1268	-0,2141	0,1189	0,0014	0,2524	-0,0392	**0,3401	**0,4289
I. C. (r)		set-nov	feb-mag	set-nov e feb-mag										
I. C. (r)	1921-2022	0,1426	-0,0375		0,0279									
I. C. (r)	1982-2022	**0,3455	0,0534		0,1688									

Tabella 5 Correlazioni con le precipitazioni mensili cumulate per la cronologia standardizzata di Picea abies di Caldanzazo (CA\_PA) lungo due periodi (1921-2022 e 1982-2022).  
Livelli di significatività: "\*" 0,1, "\*\*\*" 0,05

		LE_AA												
		gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic	
I. C. (r)	1921-2022	0,1591	0,0081		-0,0389	-0,0440	0,1164	**0,2302	0,1383	**0,231	0,0118	-0,1584	0,1178	-0,0130
I. C. (r)	1982-2022	0,1754	-0,0155		-0,1344	-0,1584	0,0353	0,0975	0,2264	-0,1968	0,1858	-0,1964	0,1138	0,0396
I. C. (r)		set-nov	feb-mag	set-nov e feb-mag										
I. C. (r)	1921-2022	-0,0076	0,0323		0,0718									
I. C. (r)	1982-2022	0,0546	-0,0964		0,0349									

Tabella 6 Correlazioni con le precipitazioni mensili cumulate per la cronologia standardizzata di Abies alba di Levico Terme (LE\_AA) lungo due periodi (1921-2022 e 1982-2022).  
Livelli di significatività: "\*" 0,1, "\*\*\*" 0,05



#### 4.4 Correlazione delle cronologie standardizzate con la temperatura massima media mensile

La correlazione è stata eseguita fra le cronologie standardizzate dei campioni e le temperature massime medie mensili. È stata eseguita su due periodi: dal 1939 al 2022 e dal 1982 al 2022.

Partendo dal periodo 1939-2022, per quanto riguarda la cronologia di *Abies alba* di Caldonazzo sono risultate significative le correlazioni con le temperature massime di febbraio, marzo e con l'intervallo di tempo di gennaio-aprile. È invece marginalmente significativa la correlazione con il mese di gennaio (Tab. 7).

Anche nella cronologia di *Abies alba* di Levico Terme la correlazione con il periodo di gennaio-aprile è significativa come lo sono anche con i mesi di gennaio e febbraio (Tab.8).

Nel caso della cronologia standardizzata di *Picea abies* di Caldonazzo non esistono correlazioni significative con le temperature massime di nessun mese (Tab.9).

Nel periodo 1982-2022, per la cronologia di *Abies alba* di Caldonazzo sono significative le correlazioni con i mesi di febbraio, marzo e con l'intervallo di tempo gennaio-aprile (Tab. 7).

Per la cronologia di *Picea abies* risulta marginalmente significativa la correlazione con il mese di marzo (Tab. 8).

Infine, per la cronologia di *Abies alba* di Levico Terme risulta marginalmente significativa la correlazione con il mese di marzo (Tab. 9).

		CA_AA											
		gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic
I. C. (r)	1939-2022	*0,1798	**0,2364	**0,2198	0,0380	-0,0643	-0,0795	-0,0386	-0,0432	-0,1546	-0,0087	-0,0375	-0,0285
I. C. (r)	1982-2022	0,2533	**0,3868	**0,5075	0,2045	0,0335	-0,0125	0,0347	0,1219	-0,1879	0,0188	-0,121	-0,0052
		gen-apr											
I. C. (r)	1939-2022	**0,2271											
I. C. (r)	1982-2022	**0,4672											

Tabella 7 Correlazioni con le temperature massime mensili per la cronologia standardizzata di Abies alba di Caldonazzo (CA\_AA) lungo due periodi (1939-2022 e 1982-2022).  
Livelli di significatività: "\*" 0,1, "\*\*\*" 0,05

		CA_PA											
		gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic
I. C. (r)	1939-2022	-0,0095	0,0339	0,0851	-0,0928	0,0261	0,0140	-0,0850	-0,0162	-0,0331	-0,0537	-0,0124	-0,0017
I. C. (r)	1982-2022	-0,0163	-0,0151	*0,2860	-0,0579	0,0552	0,2062	0,0263	0,0921	0,1100	0,0063	-0,109	0,1283
		gen-apr											
I. C. (r)	1939-2022	0,0150											
I. C. (r)	1982-2022	0,0784											

Tabella 8 Correlazioni con le temperature massime mensili per la cronologia standardizzata di Picea abies di Caldonazzo (CA\_PA) lungo due periodi (1939-2022 e 1982-2022).  
Livelli di significatività: "\*" 0,1, "\*\*\*" 0,05

		LE_AA											
		gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic
I. C. (r)	1939-2022	**0,2186	**0,2592	0,1557	0,0346	-0,0802	-0,0697	0,0006	0,0007	-0,0622	0,0562	0,0368	0,0378
I. C. (r)	1982-2022	0,1353	0,1540	*0,289	-0,0126	-0,0927	-0,1498	0,1023	0,0300	-0,0694	0,1364	0,095	-0,0413
		gen-Apr											
I. C. (r)	1939-2022	**0,2210											
I. C. (r)	1982-2022	0,2015											

Tabella 9 Correlazioni con le temperature massime mensili per la cronologia standardizzata di Abies alba di Levico Terme (LE\_AA) lungo due periodi (1939-2022 e 1982-2022).  
Livelli di significatività: "\*" 0,1, "\*\*\*" 0,05

#### 4.5 Correlazione delle cronologie standardizzate con la temperatura minima mensile

La correlazione delle cronologie standardizzate è avvenuta con la temperatura minima media mensile. Anche in questo caso la correlazione è stata eseguita su due intervalli di tempo differenti: 1939-2022 e 1982-2022.

Nel periodo 1939-2022, la cronologia standardizzata di *Abies alba* è correlata in maniera significativa con le temperature minime di marzo e con l'intervallo di mesi che va da gennaio a marzo. Presenta una correlazione debole anche con le temperature minime di gennaio (Tab.10). La cronologia di *Picea abies* di Caldonazzo non presenta nessuna correlazione significativa con le temperature minime mensili (Tab. 11).

Infine, per quanto riguarda la cronologia di *Abies alba* di Levico Terme esiste una correlazione significativa con le temperature minime nel mese di gennaio e con il periodo di gennaio-marzo. Esiste una correlazione anche con le temperature minime per il periodo che va da settembre a marzo, dove le temperature minime di settembre a dicembre sono riferite all'anno precedente (Tab.12).

Per l'intervallo di tempo che va dal 1982 al 2022, la cronologia standardizzata di *Abies alba* di Caldonazzo è correlata in maniera significativa con le temperature minime di marzo e con l'intervallo di tempo di gennaio-marzo. Esiste una correlazione con il mese di gennaio e con il periodo di settembre-marzo, anche se risulta essere poco significativa (Tab.10).

Nella cronologia standardizzata di *Picea abies* di Caldonazzo e in quella di *Abies alba* di Levico Terme non ci sono delle correlazioni significative con le temperature minime mensili (Tab. 11-12).

		CA_AA											
		gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic
I. C. (r)	1939-2022	*0,1778	0,1536	**0,2430	-0,0557	0,0514	0,0873	-0,0541	-0,0626	-0,1488	-0,1071	-0,0169	0,0992
I. C. (r)	1982-2022	0,1712	*0,2859	**0,3903	-0,0310	0,0727	0,2062	-0,0339	0,0267	-0,1468	*-0,2686	-0,024	0,1378
		set-mar	gen-mar										
I. C. (r)	1939-2022	0,1493	**0,2607										
I. C. (r)	1982-2022	*0,2899	**0,3324										

Tabella 10 Correlazioni con le temperature minime mensili per la cronologia standardizzata di Abies alba di Caldonazzo (CA\_AA) lungo due periodi (1939-2022 e 1982-2022).

Livelli di significatività: "\*" 0.1, "\*\*" 0.05

		CA_PA											
		gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic
I. C. (r)	1939-2022	0,0127	-0,1009	0,0086	-0,1591	0,0194	-0,0777	-0,0819	-0,0335	0,0605	0,0008	0,0383	-0,0048
I. C. (r)	1982-2022	-0,0954	-0,0062	0,1313	-0,0481	0,0830	0,0697	0,0546	0,0438	0,0954	-0,0306	0,100	-0,0461
		set-mar	gen-mar										
I. C. (r)	1939-2022	-0,0440	-0,0328										
I. C. (r)	1982-2022	-0,0400	0,0076										

Tabella 11 Correlazioni con le temperature minime mensili per la cronologia standardizzata di Picea abies di Caldonazzo (CA\_PA) lungo due periodi (1939-2022 e 1982-2022).

Livelli di significatività: "\*" 0.1, "\*\*" 0.05

		LE_AA											
		gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic
I. C. (r)	1939-2022	**0,3134	0,1196	0,1342	-0,0903	-0,0353	0,0682	0,0925	0,0221	-0,1355	-0,1306	-0,0479	0,0337
I. C. (r)	1982-2022	0,2279	0,1211	0,1739	-0,1580	-0,0189	0,0417	0,2010	0,0082	-0,0977	-0,1123	0,057	0,1391
		set-mar	gen-mar										
I. C. (r)	1939-2022	**0,2158	**0,2298										
I. C. (r)	1982-2022	0,2563	0,2043										

Tabella 12 Correlazioni con le temperature minime mensili per la cronologia standardizzata di Abies alba di Levico Terme (LE\_AA) lungo due periodi (1939-2022 e 1982-2022).

Livelli di significatività: "\*" 0.1, "\*\*" 0.05

#### 4.6 Correlazioni con parametri climatici con annate precedenti

L'accrescimento annuale della pianta non è influenzato solamente dall'andamento dei parametri climatici dell'anno ma anche dalle condizioni climatiche dell'anno precedente. Per questo motivo sono state eseguite delle correlazioni fra l'accrescimento annuale e i parametri climatici dell'anno precedente l'accrescimento.

##### 4.6.1 Correlazione delle cronologie standardizzate con precipitazioni dell'anno precedente

La correlazione è stata eseguita fra le cronologie standardizzate e le precipitazioni medie mensili di anni precedenti l'accrescimento.

La correlazione è stata eseguita lungo due periodi: 1921-2022 e 1982-2022.

Per quanto riguarda la cronologia standardizzata di *Abies alba* di Caldonazzo l'unica correlazione significativa è quella con le precipitazioni di agosto nel periodo 1921-2022 (Tab.13).

Anche per *Picea abies* di Caldonazzo è presente la sola correlazione significativa di giugno ma nel periodo 1982-2022 (Tab. 14).

Nella cronologia di *Abies alba* di Levico Terme sono significative le correlazioni con il mese di luglio in entrambi gli intervalli di tempo (Tab. 15).

		CA_AA											
		gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic
I. C. (r)	1921-2022	-0,0476	0,0808	-0,0373	-0,0199	0,0545	-0,0271	0,0647	**0,2245	-0,0384	0,0770	-0,0153	0,0462
I. C. (r)	1982-2022	-0,0540	0,0710	0,2027	-0,0708	0,0721	0,1188	0,0243	0,1905	-0,1131	0,1786	-0,058	-0,0673
	giu-ago												
I. C. (r)	1921-2022	0,1567											
I. C. (r)	1982-2022	0,1850											

Tabella 13 Correlazioni con le precipitazioni medi mensili dell'anno precedente l'accrescimento per la cronologia standardizzata di Abies alba di Caldono (CA\_AA) lungo due periodi (1921-2022 e 1982-2022).  
Livelli di significatività: "\*" 0.1, "\*\*\*" 0.05

		CA_PA											
		gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic
I. C. (r)	1921-2022	0,0847	0,1167	0,1537	-0,0728	-0,0109	0,1339	-0,1325	0,0989	-0,0445	0,0093	-0,1098	0,0614
I. C. (r)	1982-2022	0,1692	0,1459	0,2449	-0,0743	-0,0868	**0,3479	-0,2024	0,0790	-0,0069	0,1801	-0,089	-0,0735
	giu-ago												
I. C. (r)	1921-2022	0,0545											
I. C. (r)	1982-2022	0,0985											

Tabella 14 Correlazioni con le precipitazioni medi mensili dell'anno precedente l'accrescimento per la cronologia standardizzata di Picea abies di Caldono (PA\_AA) lungo due periodi (1921-2022 e 1982-2022).  
Livelli di significatività: "\*" 0.1, "\*\*\*" 0.05

		LE_AA											
		gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic
I. C. (r)	1921-2022	0,0571	0,0827	0,0812	0,0083	0,1421	0,1305	**0,2193	0,0795	0,0938	0,0705	-0,1068	0,1314
I. C. (r)	1982-2022	-0,0044	-0,0196	0,1834	-0,1411	0,2067	0,1042	**0,3160	0,1202	0,1913	0,2209	-0,141	0,1320
	giu-ago												
I. C. (r)	1921-2022	**0,2286											
I. C. (r)	1982-2022	**0,3098											

Tabella 15 Correlazioni con le precipitazioni medi mensili dell'anno precedente l'accrescimento per la cronologia standardizzata di Abies alba di Levico Terme (LE\_AA) lungo due periodi (1921-2022 e 1982-2022).  
Livelli di significatività: "\*" 0.1, "\*\*\*" 0.05

#### 4.6.2 Correlazione delle cronologie standardizzate con le temperature massime dell'anno precedente

La correlazione è stata eseguita fra le cronologie standardizzate e le temperature massime dell'anno precedente l'accrescimento.

Nell'intervallo di tempo 1939-2022 l'unica correlazione marginalmente significativa è quella fra la cronologia di *Picea abies* di Caldonazzo e le temperature massime del mese di agosto (Tab.16). Nel periodo 1982-2022 ci sono invece più correlazioni: le più significative fra aprile e *Abies alba* di Caldonazzo (Tab. 16) e fra maggio e *Picea abies* di Caldonazzo (Tab. 17). Sono invece marginalmente significative le correlazioni di *Picea abies* di Caldonazzo con le temperature di luglio (Tab. 16) e di *Abies alba* di Levico Terme con le temperature di novembre (Tab. 18).

		CA_AA											
		gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic
I. C. (r)	1939-2022	0,0021	0,0079	-0,0778	0,0948	0,0419	0,0473	-0,0031	*-0,1908	-0,1525	-0,0111	0,0154	0,0016
I. C. (r)	1982-2022	0,1065	-0,0049	-0,2030	**0,3177	-0,0212	0,0378	-0,1517	-0,1691	-0,0947	-0,0916	0,071	0,1481

Tabella 16 Correlazioni con le temperature medie massime mensili dell'anno precedente l'accrescimento per la cronologia standardizzata di *Abies alba* di Caldonazzo (CA\_AA) lungo due periodi (1939-2022 e 1982-2022).  
Livelli di significatività: "\*" 0.1, "\*\*\*" 0.05

		CA_PA											
		gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic
I. C. (r)	1939-2022	-0,0207	0,1584	-0,0875	0,0978	0,1165	0,0486	0,0100	-0,0243	-0,0749	0,0065	-0,0506	-0,0598
I. C. (r)	1982-2022	0,0482	0,2075	-0,0489	0,2385	**0,3739	0,0253	*-0,2650	0,0983	-0,1368	-0,0069	0,027	0,0577

Tabella 17 Correlazioni con le temperature medie massime mensili dell'anno precedente l'accrescimento per la cronologia standardizzata di *Picea abies* di Caldonazzo (CA\_PA) lungo due periodi (1939-2022 e 1982-2022).  
Livelli di significatività: "\*" 0.1, "\*\*\*" 0.05

		LE_AA											
		gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic
I. C. (r)	1939-2022	0,0747	0,0886	0,0667	0,0213	0,0108	-0,0609	-0,0777	-0,0866	-0,0819	-0,0148	0,1427	0,1006
I. C. (r)	1982-2022	0,0983	0,0083	-0,0563	0,0399	-0,1097	-0,1431	-0,1644	-0,0005	-0,0503	-0,1168	*0,2874	-0,0758

Tabella 18 Correlazioni con le temperature medie massime mensili dell'anno precedente l'accrescimento per la cronologia standardizzata di *Abies alba* di Levico Terme (LE\_AA) lungo due periodi (1939-2022 e 1982-2022).  
Livelli di significatività: "\*" 0.1, "\*\*\*" 0.05



#### 4.6.3 Correlazione delle cronologie standardizzate con le temperature minime mensili dell'anno precedente

La seguente correlazione è stata eseguita fra le cronologie standardizzate e le temperature minime mensili dell'anno precedente l'accrescimento.

In questo caso c'è una forte relazione fra gli abeti bianchi perché sia nell'area di campionamento di Caldonazzo che in quella Levico esistono delle correlazioni significative con il mese di gennaio. Nello specifico la cronologia di Caldonazzo è correlata solo con il periodo 1939-2022 (Tab. 19) mentre la cronologia di Levico Terme è correlata significativamente con entrambi gli intervalli di tempo (Tab. 21).

Il popolamento di *Picea abies* di Caldonazzo è correlato invece con le temperature minime di maggio; in maniera significativa per il periodo 1982-2022 e marginalmente per il periodo 1939-2022 (Tab. 20).

		CA_AA											
		gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic
I. C. (r)	1939-2022	0,0710	0,0415	0,0688	0,1348	0,1530	0,1449	-0,0544	-0,1291	-0,0433	0,0802	0,0941	0,1485
I. C. (r)	1982-2022	**0,3465	0,2220	0,1444	0,2320	0,1510	0,0881	-0,1787	0,0379	-0,0267	0,1134	0,173	0,1324

Tabella 19 Correlazioni con le temperature medie minime mensili dell'anno precedente l'accrescimento per la cronologia standardizzata di *Abies alba* di Caldona (CA\_AA) lungo due periodi (1939-2022 e 1982-2022).  
Livelli di significatività: "\*" 0.1, "\*\*\*" 0.05

		CA_PA											
		gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic
I. C. (r)	1939-2022	0,0666	0,0899	0,0949	0,0092	*0,1845	0,0004	-0,1206	-0,0796	-0,0731	-0,0247	0,0217	-0,0500
I. C. (r)	1982-2022	0,2156	0,2203	0,0699	0,1524	**0,3262	0,0034	-0,2125	0,0449	-0,1510	-0,0192	-0,040	-0,0053

Tabella 20 Correlazioni con le temperature medie minime mensili dell'anno precedente l'accrescimento per la cronologia standardizzata di *Picea abies* di Caldona (CA\_PA) lungo due periodi (1939-2022 e 1982-2022).  
Livelli di significatività: "\*" 0.1, "\*\*\*" 0.05

		LE_AA											
		gen	feb	mar	apr	mag	giu	lug	ago	set	ott	nov	dic
I. C. (r)	1939-2022	**0,2167	0,0138	0,0017	-0,0869	-0,0802	0,0186	-0,1416	-0,0388	0,0310	-0,0380	0,1301	0,1737
I. C. (r)	1982-2022	**0,3432	0,1324	0,0803	0,0424	-0,0290	0,0265	-0,0658	0,1838	0,1242	0,1544	0,258	0,0899

Tabella 21 Correlazioni con le temperature medie minime mensili dell'anno precedente l'accrescimento per la cronologia standardizzata di *Abies alba* di Levico Terme (LE\_PA) lungo due periodi (1939-2022 e 1982-2022).  
Livelli di significatività: "\*" 0.1, "\*\*\*" 0.05

#### 4.6 Anni indicatori

L'individuazione degli anni indicatori permette di verificare se l'accrescimento anomalo dell'anno è legato ad un'anomalia delle variabili climatiche. Nello specifico si è valutato se gli anelli sottili sono stati prodotti come risposta ad un periodo con temperature estreme o precipitazioni scarse. L'identificazione degli anelli sottili è avvenuta tramite formattazione condizionata su Excel di quelle annate, nelle cronologie standardizzate, che presentano un valore inferiore alla differenza fra media e deviazione standard.

Le annate critiche per *Abies alba* di Caldonazzo sono 1963, 1999 e 2013 (Fig. 8). Nel caso di *Picea abies* di Caldonazzo le annate con accrescimento minore rispetto alla media sono 1928, 1945, 1963, 1992 e 2020 (Fig. 9). Infine, per quanto riguarda *Abies alba* di Levico Terme gli anni indicatori sono 1921, 1922, 1963, 1986, e 2017 (Fig. 10).

L'unico anno nel quale tutti i popolamenti hanno mostrato una riduzione nell'accrescimento è il 1963.

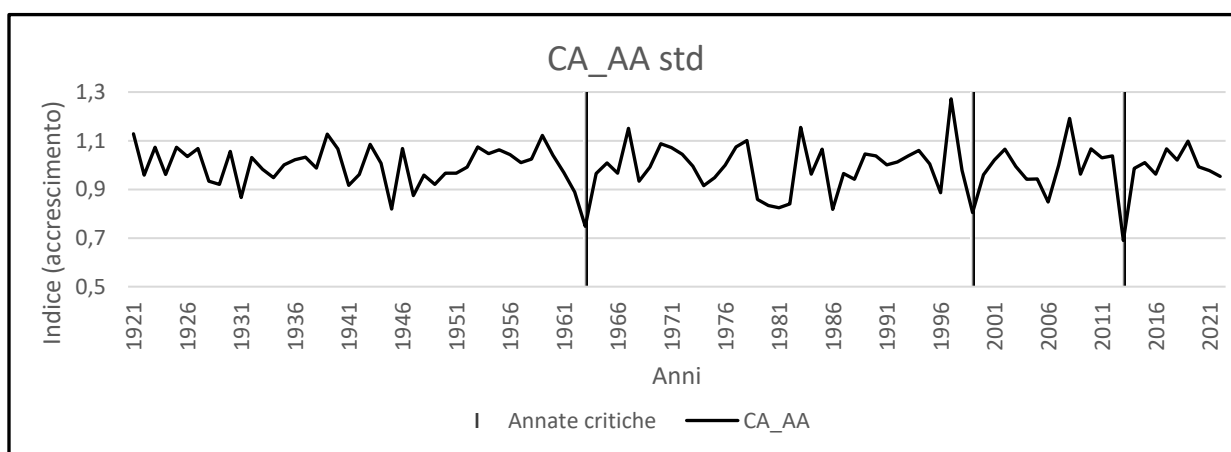


Figura 8 Andamento dell'accrescimento annuale della cronologia standardizzata di *Abies alba* di Caldonazzo (CA\_AA). In grigio sono indicata le annate che hanno un valore di accrescimento inferiore alla differenza fra media e due volte la deviazione standard

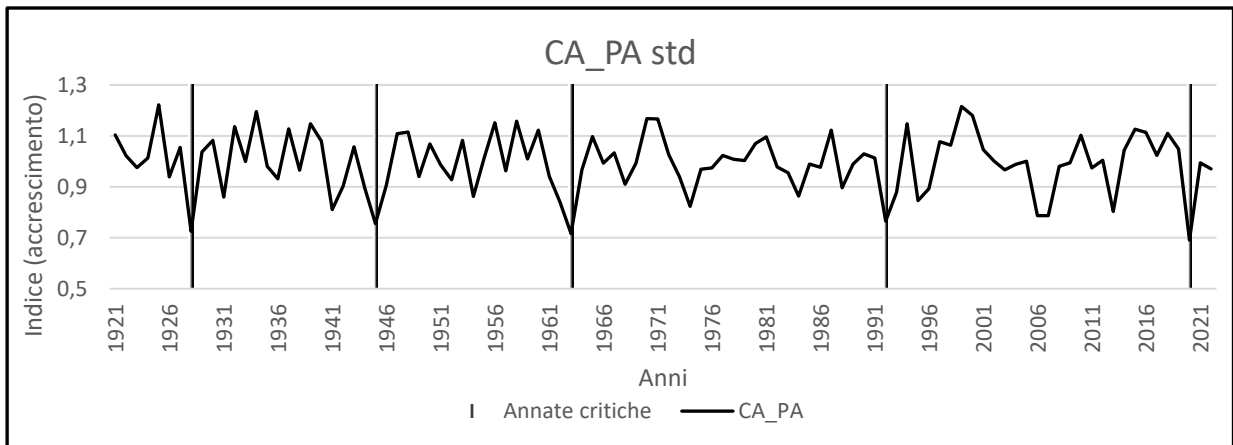


Figura 9 Andamento nell'accrescimento annuale della cronologia standardizzata di *Picea abies* di Caldonazzo (CA\_PA). In grigio sono indicate le annate che hanno un valore di accrescimento inferiore alla differenza fra media e due volte la deviazione standard

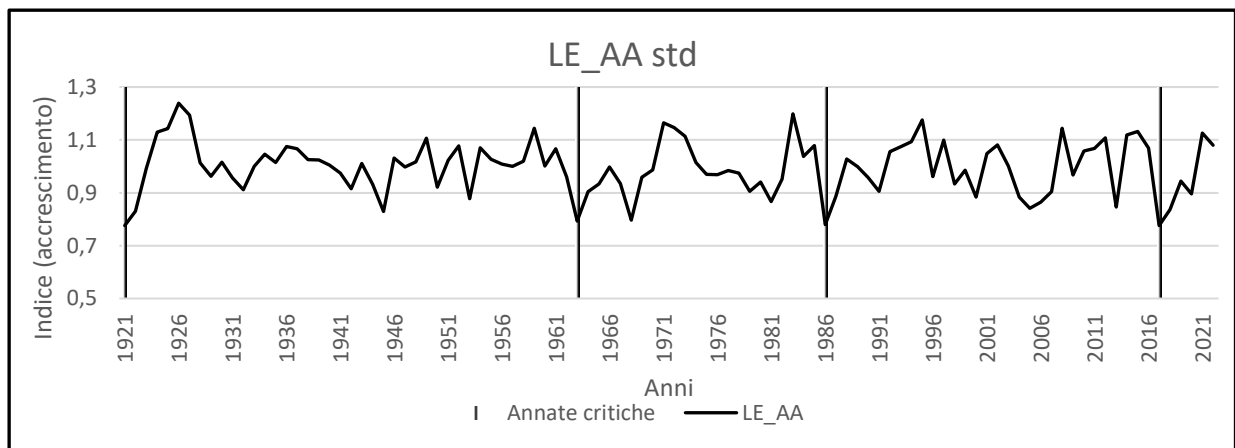


Figura 10 Andamento dell'accrescimento annuale della cronologia standardizzata di *Abies alba* di Levico Terme (LE\_AA). In grigio sono indicate le annate che hanno un valore di accrescimento inferiore alla differenza fra media e due volte la deviazione standard

#### 4.7 Andamento dei parametri climatici nel corso del tempo

L'andamento dei parametri climatici nel corso del tempo permette di valutare l'impatto che il cambiamento climatico sta avendo nelle zone di Levico Terme e di Caldonazzo. L'intervallo di tempo utilizzato è quello per cui i dati sono disponibili: per le precipitazioni i dati vanno dal 1921 al 2022 mentre per le temperature massime e minime vanno dal 1939 al 2023.

Anche in questo caso il dato annuale non è dato da tutti i mesi ma solo da quelli che hanno evidenziato delle correlazioni con la crescita delle piante nei paragrafi 4.3, 4.4 e 4.5. Questo significa che i dati annuali di precipitazione saranno dati dalla media delle precipitazioni cumulate fra settembre e novembre, i dati di temperatura minima dalla media delle temperature medie minime dei fra gennaio e marzo e i dati di temperatura massima dalla media delle temperature medie massime fra gennaio e aprile.

##### 4.7.1 Andamento delle precipitazioni (1921-2022)

L'andamento delle precipitazioni fra settembre e novembre dal 1921 al 2022 è rimasto sostanzialmente costante nel tempo. L'indice di correlazione è inferiore alla soglia e pertanto la correlazione con il tempo non è significativa (Fig. 9).

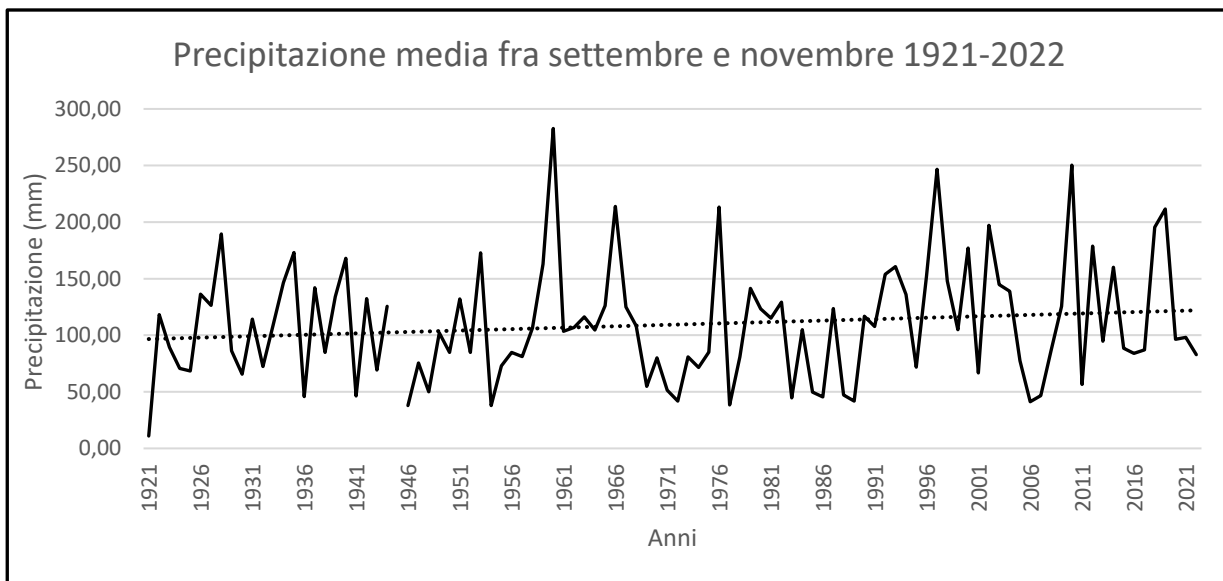


Figura 11 Andamento delle precipitazioni fra settembre e novembre dal 1921 al 2022 con indice di correlazione (r).  
Livelli di significatività: "\*" 0.1, "\*\*\*" 0.05

#### 4.7.2 Andamento della temperatura massima (1939-2022)

L'andamento della temperatura massima fra gennaio e aprile dal 1939 al 2022 è sicuramente crescente. Nello specifico la crescita è iniziata intorno agli anni '80 ed è continuata fino al 2022. L'indice di correlazione significativo conferma la tendenza della temperatura massima ad aumentare nel tempo. Discorso simile anche per la temperatura massima media di luglio-agosto, ma che si differenzia per il fatto che l'aumento è avvenuto in maniera lineare dalla fine degli anni '30.

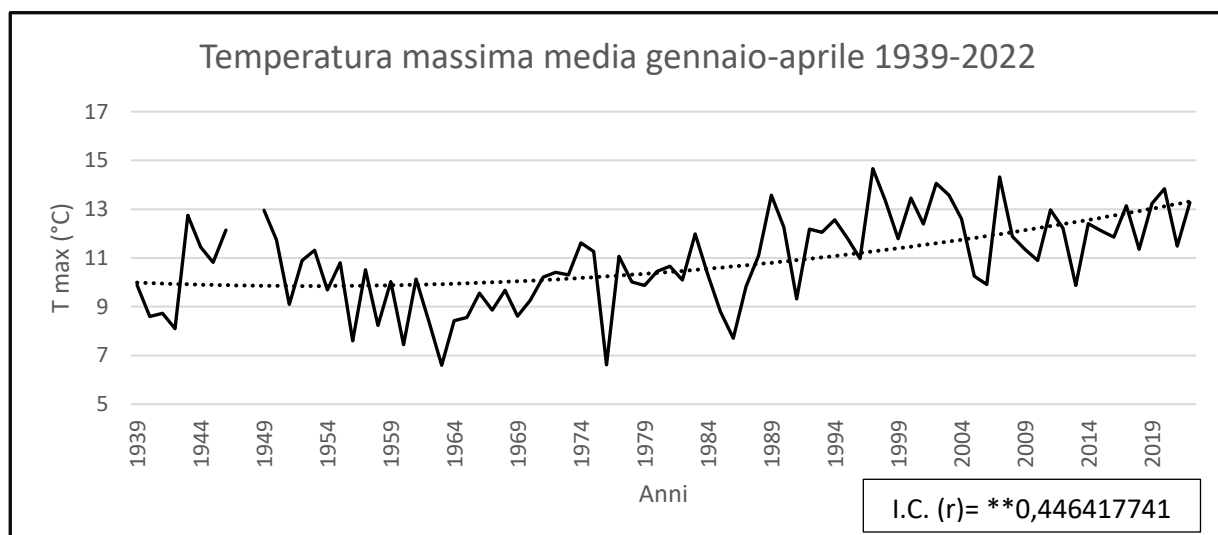


Figura 12 Andamento della temperatura massima fra gennaio e aprile dal 1939 al 2022 con indice di correlazione (r).  
Livelli di significatività: "\*" 0.1, "\*\*\*" 0.05

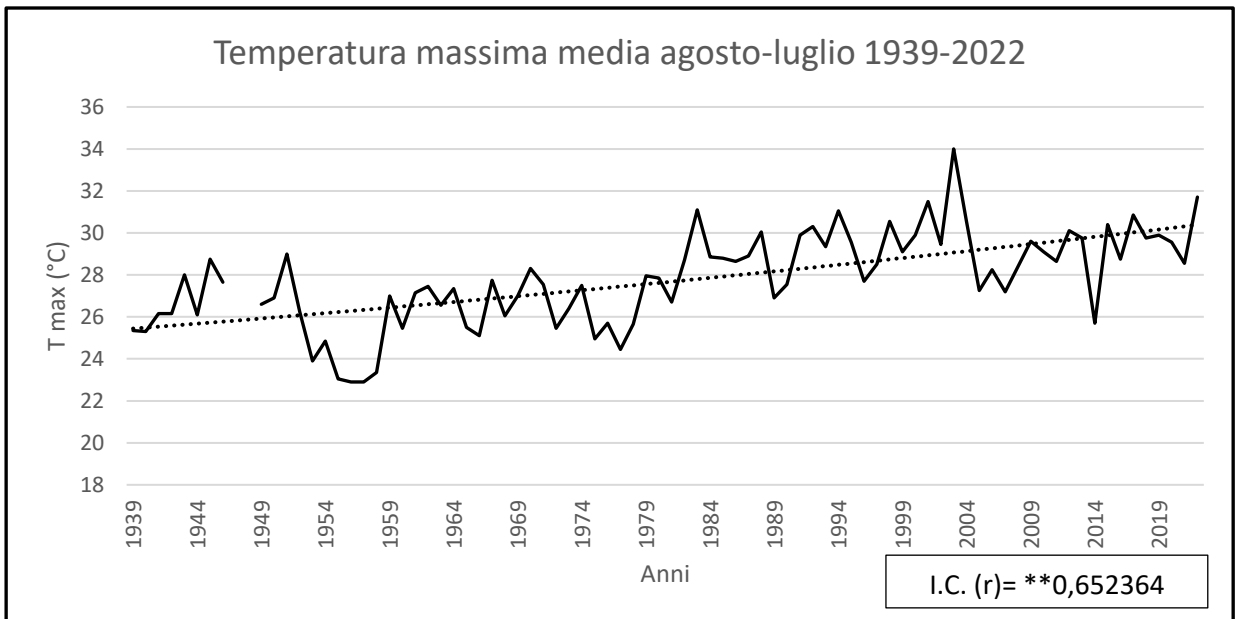


Figura 13 Andamento della temperatura massima fra luglio e agosto dal 1939 al 2022 con indice di correlazione (r).  
Livelli di significatività: "\*" 0.1, "\*\*\*" 0.05

#### 4.7.3 Andamento della temperatura minima (1939-2022)

L'andamento della temperatura minima fra gennaio e aprile dal 1939 al 2022 è crescente seguendo uno sviluppo simile a quello visto per la temperatura massima. La tendenza è confermata dall'indice di correlazione che essendo sopra soglia è significativo (Fig. 11).

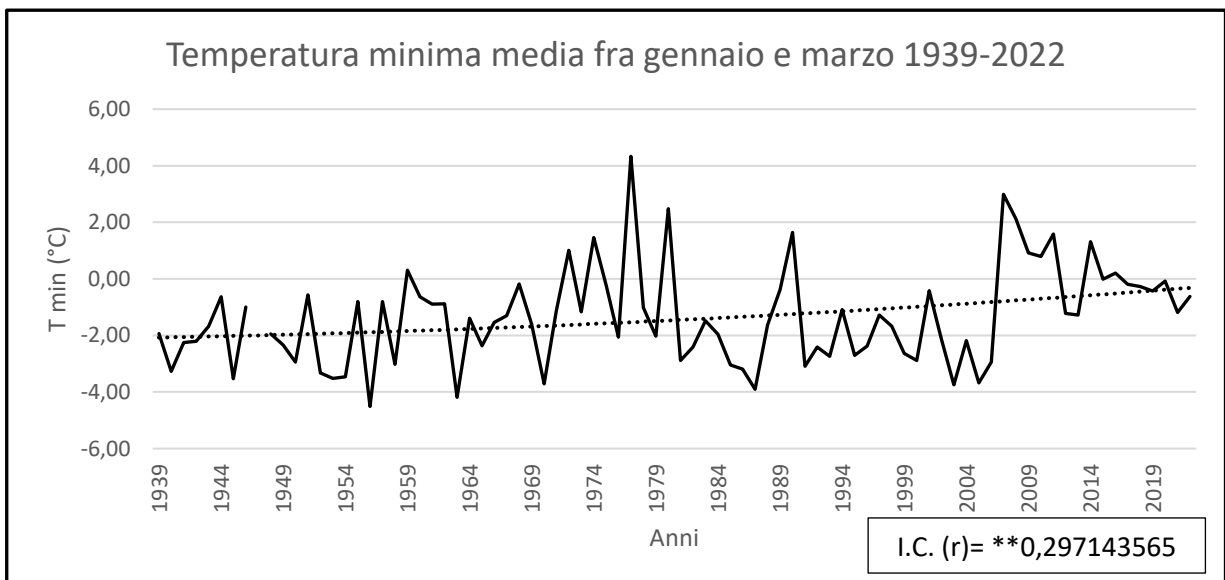


Figura 14 Andamento della temperatura minima fra gennaio e marzo dal 1939 al 2022 con indice di correlazione (r).  
Livelli di significatività: "\*" 0.1, "\*\*\*" 0.05

## 5. Discussione

### 5.1 Struttura delle età e competizione

L'elevata densità all'interno di un popolamento comporta un'efficiente intercettazione delle piogge da parte delle chiome con conseguente evaporazione dell'acqua prima di raggiungere il suolo, riducendo così la disponibilità idrica nel suolo. L'elevato numero di piante su una superficie si riflette anche nel sottosuolo: è infatti stato studiato che la competizione per le risorse idriche aumenta linearmente con il numero di individui presenti ([Molina et al. 2011](#)). Infine, la competizione contribuisce a rendere le piante più suscettibili alle siccità influenzandone la conduttanza stomatica e il tasso fotosintetico. Il controllo della densità con adeguati diradamenti può essere una strategia adeguata a limitare il deperimento delle piante causato dalle siccità ([Moreno et al. 2007](#)). Nelle aree dove la densità di piante è molto elevata, la competizione contribuisce da una parte a limitare la disponibilità idrica e dall'altra altera i processi fisiologici delle piante, contribuendo quindi come fattore fondamentale nel determinare la riduzione nell'accrescimento delle piante e la produzione di anelli sottili. La competizione è un elemento che, quindi, può mascherare l'effetto del clima. L'analisi dell'influenza della competizione in questo studio è stata analizzata solamente negli ultimi dieci anni perché negli anni precedenti diametri e distanze erano completamente diverse e non è possibile determinarle.

In questo intervallo di tempo è possibile affermare che in nessuno dei quattro popolamenti la competizione è un fattore che può aver influenzato l'accrescimento delle piante (Tab. 1). Se però questo vale per gli ultimi dieci anni, non è possibile affermare con certezza che la competizione non abbia contribuito a condizionare l'accrescimento nel resto degli anni delle cronologie. Bisogna anche considerare che l'effetto di un diradamento porta ad un'immediata risposta delle piante con generazione di anelli di maggiore dimensione già nei due anni successivi l'intervento. L'effetto di un intervento tipicamente svanisce entro i 10 anni riportando l'ampiezza degli anelli alla loro dimensione pre-diradamento ([Mörling et al. 2001](#)). Con la standardizzazione delle serie cronologiche queste brusche variazioni nell'ampiezza degli anelli vengono smussati e inoltre, l'utilizzo della funzione spline permette di eliminare i trend di medio-lungo periodo dovuti alla competizione. In conclusione, la densità delle piante può certamente aver influito sull'andamento delle cronologie, soprattutto nei decenni passati, ma probabilmente sono altri i fattori che hanno maggiormente contribuito alla variazione interannuale delle cronologie.

Per quanto riguarda la struttura delle età delle due aree di campionamento bisogna sottolineare che la decisione di escludere dal campionamento piante con diametro inferiore ai 40 cm non consente di avere una panoramica completa sulla distribuzione delle età e perciò le considerazioni verranno fatte sulla base della parte di popolazione campionata.

Nel popolamento di Caldonazzo troviamo un divario nell'età delle due specie. Gli individui di *Abies alba* presentano infatti un'età media maggiore rispetto agli individui di *Picea abies* (Tab. 3) e questo è testimoniato anche dal fatto che ci sono ben tre individui di *Abies alba* appartenenti alla classe del 250. Questa distribuzione delle classi di età nei popolamenti misti di abete rosso e bianco è tipica della zona nelle Alpi ed è legata alle usanze della tradizione selvicolturale: l'abete rosso avendo un valore economico e tecnologico superiore quando raggiungeva il diametro di recidibilità veniva tagliato mentre l'abete bianco, considerato come meno pregiato, veniva lasciato ad invecchiamento indefinito. Questa può essere una spiegazione nella struttura di Caldonazzo, ma la mancanza di documenti e fonti storiche, non permette di confermare l'ipotesi. Nel campione di Levico gli individui di *Picea abies* presentano un'età media simile a quella degli individui di *Abies alba* (Tab. 3), ma anche simile a quelli della stessa specie di Caldonazzo (Tab. 2). In quest'area di campionamento abbiamo quindi due popolamenti che si equivalgono sotto il

profilo della struttura delle età; struttura che è simile anche a quella di *Picea abies* a Caldonazzo. Il popolamento di *Abies alba* di Caldonazzo risulta così diverso dagli altri e si caratterizza per un'età maggiore. Essendo le piante mediamente più vecchie tendono ad occupare uno spazio ben delimitato e spesso dominante in senso verticale, per cui l'effetto di un diradamento può essere meno accentuato rispetto alle cronologie degli altri popolamenti.

Tuttavia, il temperamento dell'abete bianco nei confronti della luce consente a questa specie di vivere anche in situazione di ombra ([Dinca et al. 2022](#)) per decenni con accrescimenti contenuti, per poi incrementarli repentinamente quando, per la morte o la rimozione dei competitori, venga ridotta la pressione di competizione. È quindi possibile che alcune delle piante di *Abies alba* che sono state carotate, possano aver risposto con aumenti repentini del tasso di accrescimento (allo stesso modo degli altri popolamenti più giovani) ad eventuali diradamenti. Anche in questa circostanza la standardizzazione delle cronologie consente di rimuovere l'effetto dell'età diversa delle piante, limando le eventuali diverse risposte dei popolamenti.

## 5.2 Relazioni dell'accrescimento con le variabili climatiche

Le aree di campionamento ricadono all'interno del clima prealpino, nel quale dominano condizioni mesiche con quindi precipitazioni abbastanza elevate (la media è di 1048 mm all'anno) e temperature che non sono estreme né in estate né in inverno: la temperatura media massima è di 27,6 °C e viene raggiunta nel mese di agosto mentre la temperatura media minima è di 7,1° C e viene raggiunta a gennaio. La temperatura media annua (presso la stazione di Levico, a 502 m s.l.m.) è di 14,5 °C.

Nonostante le condizioni climatiche non siano estreme, considerando i soli parametri di temperatura media e precipitazioni annue entrambe le specie si trovano al limite del loro areale potenziale ([De Rigo et al. 2016](#)). Questo implica che un ulteriore aumento delle temperature e delle siccità potrebbe rendere vulnerabili le piante al cambiamento climatico.

Per una valutazione completa è necessario valutare le correlazioni con precipitazioni e temperature.

Partendo dalle precipitazioni mensili, le correlazioni più significative sono quelle con il mese di novembre, in particolare negli individui di Caldonazzo (Tab. 4 e 5), mentre negli individui di Levico Terme (Tab. 6) non si evidenziano correlazioni con le precipitazioni. Anche se il dato dal punto di vista statistico è significativo diventa difficile pensare che le precipitazioni nel mese di novembre possano avere ripercussioni sulla dimensione dell'anello dell'anno, il cui sviluppo termina a fine estate. Esiste una correlazione marginalmente significativa nell'intervallo di tempo 1921-2022 della cronologia di *Picea abies* di Caldonazzo con giugno e luglio. Questa correlazione è riportata anche in altri studi ([Carrer et al. 2012](#), [Bottero et al. 2021](#) e [Begović et al. 2020](#)) ma in questo caso, vista la bassa significatività del dato non è possibile affermare con certezza che le precipitazioni estive influenzino l'accrescimento dell'abete rosso.

Quello che emerge dalle analisi è che entrambe le specie risultano molto più sensibili alle precipitazioni della stagione precedente rispetto a quelle della stagione dell'accrescimento: sia in *Picea abies* di Caldonazzo che in *Abies alba* di Caldonazzo e di Levico Terme esiste una correlazione positiva con le precipitazioni di giugno-agosto dell'estate precedente l'accrescimento (Tab. 13, 14 e 15). Una motivazione nel ritardo nella risposta delle piante può essere dovuta all'accumulo di C e all'allungamento delle radici, due processi favoriti da estati piovose e che influenzano notevolmente l'accrescimento dell'anello nella stagione successiva ([Carrer et al. 2012](#)). Esistono delle discrepanze nei due periodi 1921-2022 e 1982-2022: in *Abies alba* di Caldonazzo la correlazione è significativa solamente dal 1921 al 2022 e limitatamente al mese di agosto, in *Picea abies* la correlazione è significativa solo nel mese di giugno negli ultimi



quarant'anni e in *Abies alba* di Levico Terme la correlazione è significativa nel mese di luglio in entrambi i periodi. Gli individui di abete rosso mostrano un incremento, negli ultimi quarant'anni, della dipendenza nei confronti delle precipitazioni nel mese di agosto. Questa variazione nella sensibilità nei confronti delle precipitazioni non dipende da variazioni nella piovosità mensile che è rimasta sostanzialmente costante nel tempo (Fig. 11). Un calo delle precipitazioni estive negli ultimi quarant'anni avrebbe probabilmente reso più sensibile l'abete rosso ai periodi di forte mancanza di precipitazioni spiegando l'aumento della significatività della correlazione. Una delle ipotesi è che l'aumento delle temperature può aver determinato un incremento della richiesta idrica dell'abete rosso, risultando quindi, più sensibile alla variazione delle precipitazioni nei diversi anni.

L'unico popolamento che presenta correlazioni significative lungo entrambi i periodi è quello di *Abies alba* di Levico Terme e quindi fra i tre popolamenti risulta essere quello più vulnerabile alla siccità estiva. Anche se l'abete bianco viene individuata come specie meno sensibile alle siccità rispetto all'abete rosso ([Bottero et al. 2021](#)) è possibile che l'esposizione a Sud renda i periodi siccitosi più gravi a Levico Terme rispetto a Caldonazzo. Questa maggiore suscettibilità dei siti esposti a Sud è stata verificata anche da [Rolland et al. 2000](#). La conferma di questa tendenza si potrebbe avere disponendo della cronologia di *Picea abies* di Levico Terme, purtroppo scartata al momento dell'elaborazione per la difficoltà nel trovare un andamento sincrono delle serie elementari.

Le correlazioni significative con le temperature massime sono individuabili nei primi mesi dell'anno. Valutando le correlazioni, entrambi i popolamenti di *Abies alba* risultano sensibili nei confronti delle temperature massime del primo trimestre dell'anno con leggere differenze: a Caldonazzo le correlazioni sono significative per febbraio e marzo dal 1939 al 2022 e dal 1982 al 2022, mentre a Levico Terme le correlazioni sono significative per gennaio e febbraio dal 1939 al 2022 ma non lo sono per il periodo 1982-2022 (Tab 7-9). L'effetto positivo delle temperature del mese di febbraio sull'accrescimento degli anelli negli abeti bianchi è stato riscontrato in altri studi eseguiti sulle Alpi ([Carrer et al. 2012](#)), ma anche sui Pirenei ([Macias et al. 2006](#)) e sulle Alpi Dinariche ([Begović et al. 2020](#)). Le temperature elevate nel mese di febbraio consentono un rapido scioglimento della neve favorendo il riscaldamento del suolo e determinando un precoce inizio della stagione vegetativa ([Macias et al. 2006](#)), con effetto positivo sulla formazione delle gemme ([Sutinen et al. 2012](#)) e conseguente maggiore disponibilità di risorse per la pianta che può produrre anelli di spessore maggiore.

Per quanto riguarda *Picea abies* di Caldonazzo l'unica correlazione marginalmente significativa è quella con il mese di marzo nel periodo 1982-2022 (Tab. 8). Oltre ad essere un'indicazione poco significativa è una correlazione che non si trova in altri studi e per cui risulta difficile legarla ad eventuali fenomeni climatici.

Risulta interessante anche il ruolo delle condizioni climatiche in tarda estate-autunno sulla crescita nella stagione vegetativa successiva. Per *Abies alba* e *Picea abies* di Caldonazzo le alte temperature nei mesi di luglio-agosto sembrano ripercuotersi in un minor accrescimento nella stagione successiva. Una delle possibili risposte ecologiche a questo fenomeno è stata data [Pouttu et al. 2000](#) e poi citata in molti altri studi ([Weber et al. 2007](#), [Lebourgeois et al. 2009](#)). Il numero e la dimensione degli aghi che vengono prodotti, influenza il potenziale fotosintetico della pianta nella stagione vegetativa corrente ma anche nelle successive dato che gli aghi permangono vitali e funzionali anche per 6-7 anni ([Lebourgeois et al. 2009](#)) sulla pianta. Questo significa che un'eventuale siccità (correlata nella maggior parte dei casi con temperature massime molto alte) mesi estivi può comportare la perdita di aghi con conseguente riduzione nella capacità fotosintetica della pianta e produzione di anelli sottili ([Pouttu et al. 2000](#)). La sensibilità nei

confronti delle temperature di luglio-agosto nell'abete bianco copre l'intero periodo 1922-2022 ma non gli ultimi quarant'anni mentre, nella cronologia dell'abete rosso, la correlazione è diventata significativa solo negli ultimi quarant'anni (Tab. 16-17). L'aumento delle temperature fra luglio e agosto potrebbe essere uno dei motivi che potrebbe spiegare perché la crescita dell'abete rosso è passata da essere indifferente ad essere sensibile alle temperature massime di questi due mesi (Fig. 13). Estati sempre più calde che si avvicendano porterebbero portare conseguenze, come la riduzione della capacità fotosintetica non solo l'anno successivo, ma anche negli anni seguenti, generando negli individui di *Picea abies* una situazione complessiva di stress. Se da una parte il fenomeno è riportato in diversi articoli ed inoltre i dati climatici confermerebbero questo andamento, in questo studio non è possibile affermare in maniera certa che le temperature del mese di agosto precedente siano un fattore limitante lo sviluppo di *Picea abies* e di *Abies alba* di Caldonazzo perché in entrambi i casi le correlazioni sono solo marginalmente significative ( $p < 0,1$ ). Certamente l'insieme di questi indizi stimola a proseguire il monitoraggio della sensibilità delle due conifere nei confronti delle temperature estive alla ricerca di risultati significativi dal punto di vista statistico.

*Abies alba* di Levico Terme si discosta dai popolamenti di Caldonazzo, con l'unica correlazione con la stagione precedente nel mese di novembre (Tab. 18). Siccome la fotosintesi nelle specie sempreverdi è possibile anche durante l'inverno, le alte temperature nei mesi invernali permettono l'accumulo di carboidrati che verranno immagazzinati e potranno essere utilizzati nella stagione vegetativa successiva. Inoltre, inverni caldi riducono l'insorgenza di fenomeni di embolismo (Cochard et al. 2001) e come spiegato, nelle correlazioni con febbraio-marzo, permettono anche di accelerare lo scioglimento della neve, se già presente, e il riscaldamento del suolo promuovendo lo sviluppo delle micorrize (Lebourgeois et al. 2009). Anche in questo caso, i valori di correlazione sono però solo marginalmente significativi ( $p < 0,1$ ), non consentendo di affermare con certezza che esista una relazione fra le temperature di novembre e la crescita nella stagione successiva.

Le temperature minime sembrano influenzare l'accrescimento allo stesso modo delle temperature massime, ma con leggere differenze fra i popolamenti. In entrambi gli *Abies alba* sia di Caldonazzo che di Levico Terme, alte temperature nel primo trimestre dell'anno hanno effetti positivi sugli accrescimenti. Nello specifico, le temperature minime mostrano una minore significatività rispetto alle temperature massime: nel caso di *Abies alba* di Caldonazzo le correlazioni sono significative solo con il mese di marzo (Tab. 19), mentre nel caso di Levico Terme abbiamo una sola correlazione significativa con il mese di gennaio (Tab. 21). Nel caso di *Picea abies* di Caldonazzo non sono presenti correlazioni significative (Tab. 20).

Valutando anche l'influenza della stagione precedente sull'accrescimento annuale si evince che l'unica correlazione significativa è ancora quella con il mese di novembre della cronologia di *Abies alba* di Levico Terme (Tab. 21) già riscontrata nelle temperature massime. Le altre correlazioni, come quella che lega l'accrescimento annuale con la temperatura minima di gennaio della stagione precedente nel caso del popolamento di *Abies alba* di Caldonazzo o con la temperatura minima di maggio nel caso di *Picea abies* di Caldonazzo, sono significative dal punto di vista statistico ma complesse da interpretare, infatti, le temperature di maggio e ancora di più di gennaio difficilmente possono avere ripercussioni sulla stagione vegetativa successiva.

### 5.3 Anni indicatori

Avendo analizzato nel lungo periodo quali sono i mesi nei quali le variabili climatiche condizionano maggiormente l'accrescimento, in questo paragrafo si intendono analizzare le cause climatiche che possano spiegare picchi negativi nelle cronologie standardizzate.

Nella seguente tabella sono riportate per ogni specie le annate in cui gli accrescimenti sono stati inferiori a due volte la deviazione standard (Tab. 22).

Ancora una volta i fattori climatici che sembrano controllare l'accrescimento nella zona sono essenzialmente due: le precipitazioni estive sia dell'anno precedente che di quello corrente e le temperature ad inizio anno. La mancanza di precipitazioni estive (soprattutto dell'anno precedente) sembra essere il principale fattore che limita l'accrescimento dell'abete rosso; infatti, sia nel 1945, 1992 e 2020 la siccità estiva ha determinato un crollo nella cronologia standardizzata. Questa dipendenza dalle precipitazioni è già stata individuata nel capitolo precedente e veniva associata anche all'abete bianco di Caldonazzo, la cui correlazione tuttavia non era significativa negli ultimi quarant'anni. Probabilmente questo cambiamento nella sensibilità alla siccità estiva negli ultimi quarant'anni può spiegare perché l'abete bianco non abbia avuto un crollo della cronologia nel 1992 e nel 2020 (Fig. 8 e Tab. 22). Abete bianco che invece in entrambi i siti è risultato sensibile al freddo di inizio anno in particolare nel mese di febbraio: nel 1986 e nel 2017 solo su Levico Terme, nel 1999 solo a Caldonazzo e nel 2013 in entrambi i siti. Anche questa tendenza era stata individuata nel paragrafo precedente. Seppur ci siano delle differenze nella dipendenza dei fattori climatici, quando entrambe le condizioni (siccità estiva e inverno freddo) si combinano, tutte e tre le cronologie hanno prodotto un anello sottile. A testimonianza del fatto che successioni di annate difficili provocano riduzione negli accrescimenti in tutte le cronologie. L'unico caso è quello del 1963 in cui la siccità del 1962 e il lungo inverno hanno provocato una riduzione nell'accrescimento in tutte e tre le cronologie.

Rimane il fatto che l'analisi è di tipo qualitativa, quindi non basata su test statistici che possano confermare queste ipotesi. Inoltre, bisogna evidenziare che si sono stati dei periodi molto siccitosi come quello fra il 2003 e il 2006 in cui i popolamenti non hanno avuto delle riduzioni negli accrescimenti così importanti come ci si aspettava dai dati climatici. Periodo siccitoso che viene spesso indicato come uno dei più importanti a livello europeo e citato in molti studi ([Bottero et al. 2021](#), [Spinoni et al. 2015](#)).

È quindi plausibile pensare che non sia solo il clima a controllare l'andamento stagionale degli anelli ma anche altri fenomeni esterni o interni allo stesso popolamento che permettono alle piante in alcuni casi, di disassociarsi dall'andamento climatico dell'anno.

ANNO	CA AA	CA PA	LE AA	Motivazioni
1921	X			Possibile periodo siccitoso nella stagione vegetativa precedente ( <a href="#">Neuwirth et al. 2006</a> ). Non confermabile per mancanza di dati di temperatura e precipitazione prima del 1921.
1928		X		<a href="#">Dittmar et al. 2005</a> ha individuato una gelata tardiva nel maggio del 1927 e del 1928. Nei dati di temperatura e precipitazione non si riscontrano relazioni con la riduzione nella crescita.
1945		X		Il 1945 è stato un anno siccitoso da aprile fino a settembre, escluso il mese di luglio dove le precipitazioni sono risultate appena sopra la media.*
1963	X	X	X	L'estate del 1962 è stata caratterizzata da una forte siccità con mancanza di precipitazioni nei mesi di luglio ed agosto. Inoltre, l'inverno 1962-1963 è stato tra i più freddi e lunghi del ventesimo secolo ( <a href="#">Begović et al. 2020</a> ) con le temperature minime e massime che sono state al di sotto della media da dicembre 1962 ad aprile del 1963.
1986			X	I mesi di febbraio ed aprile furono molto piovosi ma contestualmente molto freddi. Probabilmente questo freddo nel primo quadrimestre ha ritardato l'apertura delle gemme dell'anno, accorciando la stagione vegetativa ( <a href="#">Rolland et al. 2000</a> ).
1992		X		Il picco negativo compare a seguito di due estati, 1990 e 1991, che sono state molto siccitose, con temperature massime e minime superiori alla media (1939-2022) ( <a href="#">Bigler et al. 2006</a> ).
1999	X			Inverno del 1998-1999 freddo e lungo con le temperature che sono tornate sopra la media solo da maggio. Questo freddo può aver contribuito a generare gelate tardive ( <a href="#">Begović et al. 2020</a> ).
2013	X			L'estate del 2012 è stata calda e siccitosa ed è stata seguita da un febbraio del 2013 molto freddo.
2017			X	Possibile effetto negativo della gelata tardiva del 2016 ( <a href="#">Meteo Trentino et al. 2016</a> ).
2020		X		L'estate del 2019 è stata molto calda con il mese di giugno molto secco ( <a href="#">Piazza 2019</a> ).

Tabella 22 Anni indicatori caratterizzati da accrescimenti inferiori a due volte la deviazione standard e probabili motivazioni dal punto di vista climatico. Le "x" indicano quali popolamenti hanno riscontrato un crollo nella cronologia standardizzata.

#### 5.4 Implicazioni con il cambiamento climatico

Il cambiamento climatico in atto sta portando e porterà ad un aumento delle temperature e periodi siccitosi sempre più frequenti. Sebbene in molti studi gli effetti sulla vegetazione siano già visibili, nel presente studio l'impatto del cambiamento climatico non sembra, per il momento, aver influito sulla crescita delle due conifere studiate: *Picea abies* e *Abies alba*. Attualmente i fattori che controllano la crescita delle due specie sono le precipitazioni dell'estate precedente e le temperature ad inizio anno. La sensibilità nei confronti delle precipitazioni nel caso di *Abies alba* di Levico Terme è rimasta invariata nel corso del tempo a testimonianza del fatto che il cambiamento climatico non abbia più di tanto influito sulla fisiologia della specie. La forte dipendenza nei confronti delle precipitazioni è probabilmente dovuta più all'esposizione a Sud

che ha al cambiamento climatico. Un allarme del possibile effetto dei cambiamenti climatici è invece individuabile all'interno della cronologia di *Picea abies* di Caldonazzo dove la correlazione con le precipitazioni di giugno è diventata significativa solo negli ultimi quarant'anni. L'andamento delle precipitazioni pressoché costante nel tempo non giustifica il passaggio della correlazione da non significativa per tutto il periodo (1939-2022) a significativa negli ultimi quarant'anni. [IPPC et al. 2022](#) ha dimostrato come fra i vari effetti dei cambiamenti climatici ci sia l'aumento della severità dei periodi siccitosi ed in molti studi la resistenza e la resilienza da parte degli abeti rossi nei confronti delle siccità si è dimostrata molto scarsa ([Bottero et al. 2021](#), [Stangler et al. 2022](#)). Una delle motivazioni che può spiegare questa maggiore sensibilità nei confronti delle precipitazioni dei mesi estivi, è l'intensificazione e l'aumento della severità delle siccità. In effetti nelle siccità del 1992 e del 2020 la specie che ha evidenziato un crollo nella cronologia è *Picea abies*. La significatività della correlazione potrebbe non essere dovuta quindi ad una tendenza decrescente delle precipitazioni estive ma a singole estati siccitose che se si verificano sempre più frequentemente e con intensità maggiori tali da portare a crolli improvvisi nelle cronologie di *Picea abies*.

L'accrescimento degli individui di *Abies alba* sembra sia, invece, dipendente soprattutto dalle temperature invernali che spesso hanno generato delle gelate tardive a cui gli individui hanno risposto con produzione di un anello sottile (Tab. 22). Con il cambiamento climatico è possibile che l'aumento delle temperature nei mesi invernali portino ad un precoce inizio della stagione vegetativa migliorando la crescita dell'abete bianco in entrambi i siti. L'abete bianco per questo vantaggio che potrebbe ottenere dall'incremento delle temperature invernali e per la minore sensibilità alle siccità potrebbe essere considerata una specie alternativa all'abete rosso. Tuttavia, durante siccità molto severe (come può essere nel caso di studio quella del 1963 (Tab.22)) anche l'abete bianco si è dimostrato molto più vulnerabile del previsto ([Stangler et al. 2022](#)) e quindi nel futuro è plausibile che anche questa specie possa soffrire l'aumento della frequenza e intensità delle siccità.

Se al termine di queste considerazioni il cambiamento climatico sembra stia condizionando la vita delle due specie è bene ricordare che lo studio presenta alcuni limiti. L'area campionata è ridotta e anche il numero di campioni raccolto per popolamento è sufficiente ma non ottimale; pertanto, i risultati riscontrati in questo studio sono difficilmente estendibili ad altre aree in cui le condizioni climatiche, ecologiche e stazionali sono diverse. L'utilizzo dei dati di una sola stazione meteo ha limitato i confronti fra le condizioni climatiche delle due stazioni ma anche le possibili spiegazioni ad eventuali andamenti delle cronologie. L'analisi puramente qualitativa dei singoli picchi negativi nelle cronologie non permette di affermare con certezza quanto il clima abbia realmente inciso ma sarebbero state necessarie misure degli indici di resistenza, resilienza e recupero. La mancanza di ulteriori indagini topografiche e pedologiche esclude dalle considerazioni fatte due dei fattori che contribuiscono maggiormente nell'alleviare o inasprire una siccità. Nell'insieme lo studio, oltre ad avere sostanzialmente, come segnale del possibile cambiamento climatico, la correlazione di *Picea abies* di Caldonazzo. Misurazioni e analisi più complesse e approfondite permetterebbero di confermare di approfondire la dipendenza di questi popolamenti dalle variabili climatiche.

Se ad oggi le specie non mostrano particolari sintomi di sofferenza è però ipotizzabile che l'aumento delle siccità e delle temperature porti gli attuali popolamenti ad essere meno resistenti e resilienti, soprattutto in virtù del fatto che entrambe le specie ricadono al limite del loro range climatico ([De Rigo et al. 2016](#)). Oltre agli impatti diretti sulla vegetazione l'aumento delle temperature può portare anche ad altre conseguenze. Per esempio, le elevate temperature invernali sono direttamente correlate con lo svernamento dello scolitide dell'abete rosso (*Ips*

*typographus* L.), aumentandone il tasso riproduttivo con conseguenze devastanti sui popolamenti monospecifici di abete rosso ([Jönsson et al. 2009](#)). Impatto già ad oggi visibile in maniera sparsa in tutto il Trentino a seguito della tempesta Vaia del 2018.

## 6. Conclusioni

Lo studio aveva come obiettivo verificare l'influenza del cambiamento climatico sull'accrescimento delle due principali specie di conifere delle Alpi: *Picea abies* e *Abies alba*. Dai risultati ottenuti è stata evidenziata una dipendenza nei confronti delle variabili climatiche durante specifici periodi dell'anno. Le alte temperature durante i mesi invernali e in particolare nel mese di febbraio sono correlate positivamente con la dimensione dell'anello prodotto nell'anno dall'abete bianco. Questo è dovuto al fatto che temperature alte nel mese di febbraio anticipano il risveglio vegetativo della pianta, prolungandone la stagione vegetativa e favorendo la formazione di anelli di spessore maggiore. La correlazione è significativa durante tutto il periodo di studio (1939-2022) e pertanto questo comportamento dell'abete bianco è legato alla sua ecologia più che a cambiamenti climatici in atto.

Nella cronologia di abete bianco e di abete rosso è risultata significativa la correlazione con le precipitazioni estive. Particolare è il comportamento dell'abete rosso la cui correlazione è passata da non essere significativa nel periodo 1939-2022 a significativa negli ultimi quarant'anni. La stessa specie è risultata vulnerabile a singoli eventi di siccità come sono quello del 2017 e del 2020. L'aumento della frequenza e dell'intensità delle siccità legate ai cambiamenti climatici può essere una delle motivazioni che spiegano questo cambiamento nella dipendenza dalle precipitazioni estive. Tuttavia, questo rappresenta un dato singolare e soprattutto non corrisposto con le precipitazioni della zona il cui trend è rimasto sostanzialmente costante, pertanto non è sufficiente ad affermare che il cambiamento climatico stia condizionando la fisiologia dell'abete rosso. Rimangono una serie di relazioni con il clima che però da inizio Novecento sono rimaste inalterate e non sono quindi associabili al cambiamento climatico ma sono legate all'ecologia della specie e al clima stazionario. Se quindi da una parte c'è un'evidente crescita delle temperature minime e massime dall'altra non esiste, al momento, una chiara ed evidente sofferenza da parte di entrambe le specie nei confronti del cambiamento del clima.

La previsione dell'ulteriore aumento delle temperature e dell'inasprimento delle siccità impone un adeguamento della gestione forestale dei nostri boschi. Vaia rappresenta un esempio degli eventi disastrosi che potrebbero accadere sempre con maggior frequenza in futuro. Ha messo in evidenza la fragilità dei nostri boschi e quanto sia importante migliorare la resistenza e la resilienza dei popolamenti forestali. Per la ricostituzione dei nuovi boschi una buona strategia è quella di seguire il più possibile i processi naturali, in modo che le specie e gli ecotipi individuati dalla selezione naturale siano i più adatti alle condizioni climatiche della stazione. Nei boschi di Caldonazzo e Levico Terme, dove la vocazionalità produttiva è importante, il rimboschimento può essere una strategia adatta nell'affiancare le dinamiche naturali selezionando la composizione specifica e accorciando i tempi di ripristino del bosco ([Giovannini 2022](#)). La nuova composizione forestale dovrà prevedere l'inserimento di specie termofile o di fascia vegetazionale inferiore, ([Begović et al. 2020](#)) evitando i popolamenti monospecifici di abete rosso e favorendo invece ecosistemi più complessi non solo dal punto di vista del numero di specie ma anche dal punto di vista della struttura, al fine di creare popolamenti resistenti e resilienti alle avversità climatiche future.

Le intuizioni individuate in questo studio devono essere utilizzate per confronto con eventuali monitoraggi e approfondimenti futuri e possono essere utili per l'adozione di specifiche strategie nella gestione forestale al fine di salvaguardare le foreste e contestualmente tutelare i servizi ecosistemici offerti alla società.





## BIBLIOGRAFIA

- Begović K., Rydvala M., Mikac S., Čupić S., Svobodova K., Mikoláša M., Kozáka D., Kamenjara O., Frankovića M., Pavlina J., Langbehna T., Svoboda M.** (2020) “*Climate-growth relationships of Norway Spruce and silver fir in primary forests of the Croatian Dinaric mountains*”, *Agricultural and Forest Meteorology*, 288.
- Bigler C., Bräker O. U., Bugmann H., Dobbertin M., Rigling A.** (2006) “*Drought as an Inciting Mortality Factor in Scots Pine Stands of the Valais, Switzerland*”, *Ecosystems* 9, 330-343.
- Bonaldo D., Bellafiore D., Ferrarin C., Ferretti R., Ricchi A., Sangelantoni L., Vitelletti M. L.** (2023) “*The summer 2022 drought: a taste of future climate for the Po valley (Italy)*”, *Regional Environmental Change* 23(1), 1.
- Bottero A., Forrester D. I., Cailleret M., Kohnle U., Gessler A., Michel D.** (2021) “*Growth resistance and resilience of mixed silver fir and Norway spruce forests in central Europe: Contrasting responses to mild and severe droughts*”, *Global Change Biology* 27(18), 4403-4419
- Carrer M., Motta R., Nola P.**(2012) “*Significant Mean and Extreme Climate Sensitivity of Norway Spruce and Silver Fir at Mid-Elevation Mesic Sites in the Alps*”, *Plos one* 7(11), 1-10
- Cochard H., Lemoine D., Améglio T., Graniere A.** (2001) “*Mechanisms of xylem recovery from winter embolism in Fagus sylvatica*”, *Tree Physiology* 21(1), 27-33
- Daily Gretchen C.** (1997) “*Introduction: what are ecosystem services*”, *Nature's services: Societal dependence on natural ecosystems* 1(1)
- De Groot R. S., Matthew A. Wilson, Roelof MJ Boumans** (2002) “*A typology for the classification, description and valuation of ecosystem functions, goods and services*”, *Ecological economics* 41(3), 393-408.
- Del Río M., Pretzsch H., Ruiz-Peinado R., Ampoorter E., Annighöfer P.** (2017) “*Species interactions increase the temporal stability of community productivity in Pinus sylvestris–Fagus sylvatica mixtures across Europe*”, *Journal of Ecology* 105(4), 1032-1043
- De Rigo D., Caudullo G., Houston Durrant T. e altri** (2016). “*The European Atlas of Forest Tree Species*”, *European atlas of forest tree species*”, 1-202
- Dinca L., Marin M., Radu V., Murariu G., Drasovean R., Cretu R., Georgescu L., Timis-Gânsac V.** (2022) “*Which Are the Best Site and Stand Conditions for Silver Fir (Abies alba Mill.) Located in the Carpathian Mountains?*”, *Diversity* 14(7), 547
- Dittmar C., Fricke W., Elling W.** (2005) “*Impact of late frost events on radial growth of common beech (Fagus sylvatica L.) in Southern Germany*”, *European Journal of Forest Research* 125, 249-259
- Garcia O.** (2020) “*Computing Hegyi's (and other) Competition Indices*”, *Computational Ecology and Software*, 1-5
- Giovanni Giovannini** (2022) “*Stato di attuazione del Piano d'Azione per la gestione degli interventi di esbosco e ricostituzione dei boschi danneggiati dalla Tempesta Vaia*”, *Servizio Foreste Provincia Autonoma di Trento*, 1-176
- Hanewinkel M., Cullmann D. A., Schelhaas M. J., Nabuurs, G. J., Zimmermann N. E.** (2013). “*Climate change may cause severe loss in the economic value of European forest land*”, *Nature climate change* 3(3), 203-207

- Hartl-Meier C., Dittmar C., Zang C.** (2014) “*Mountain forest growth response to climate change in the Northern Limestone Alps*”, *Trees* 28, 819-829
- Holmes R. L.** (1983) “*Computer assisted quality control in tree ring dating and measurement*”, University of Arizona 48, 69-78
- IPCC** (2022) “*Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*”, IPCC, 1-36
- Jönsson A. M., Appelberg G., Harding S., Barring L.** (2009), “*Spatio-temporal impact of climate change on the activity and voltinism of the spruce bark beetle, Ips typographus*”, *Global Change Biology* 15(2), 486-499
- Kelly P. M., Leuschner H. H., Briffal K. R., Harris I. C.** (2002) “*The climatic interpretation of pan-European signature years in oak ring-width series*”, *The Holocene* 2(6), 689-694
- Lebourgeois F., Rathgeber B.K., Ulrich E.** (2009) “*Sensitivity of French temperate coniferous forests to climate variability and extreme events (Abies alba, Picea abies and Pinus sylvestris)*” *Journal of Vegetation Science* 21(2), 364-376
- Macias M., Andreu L., Bosch O., Camarero J., Gutierrez E.** (2006) “*Increasing aridity is enhancing silver fir (Abies alba Mill.) water stress in its South-Western distribution limit*”, *Climatic change* 79, 289-313
- Meteo Trentino** (2016) “*Gelata di fine Aprile 2016*”, Meteo Trentino
- Meteo Trentino**, “*Stazione meteo Levico Terme T0010*”
- Mitchard Edward T. A.** (2018) “*The tropical forest carbon cycle and climate change*”, *Nature* 559(7715), 527-534
- Molina A. J., Campo A.** (2011) “*The effects of experimental thinning on throughfall and stemflow: A contribution towards hydrology-oriented silviculture in Aleppo pine plantations*”, *Forest Ecology and Management* 269, 206-213
- Moreno G., Cubera E.** (2007) “*Impact of stand density on water status and leaf gas exchange in Quercus ilex*”, *Forest Ecology and Management* 254(1), 74-84
- Mörlin T.** (2002) “*Evaluation of annual ring width and ring density development following fertilisation and thinning of Scots pine*” *Annals of Forest Science* 59(1), 29-40
- Neuwirth B., Schweingruber F. H., Winiger M.** (2007) “*Spatial patterns of central European pointer years from 1901 to 1971*”, *Dendrochronologia* 24(2-3), 79-89
- Nola P.**, (1992) “*Dendroecologia di Quercus robur L. nella valle sublacuale del fiume Ticino*”, Tesi di dottorato, Università degli studi di Pavia
- Piazza A.** (2019) “*Ondata di calore di giugno 2019*”, Meteo Trentino
- Pouttu A., Dobbertin M.**, (2000) “*Needle-retention and density patterns in Pinus sylvestris in the Rhone Valley of Switzerland: comparing results of the needle-trace method with visual defoliation assessments*”, *Canadian Journal of Forest Research* 30(12), 1973-1982
- Rolland C., Desplanque C., Michalet R., Schweingruber F. H.** (2000) “*Extreme Tree Rings in Spruce (Picea abies [L.] Karst.) and Fir (Abies alba Mill.) Stands in Relation to Climate, Site, and Space in the Southern French and Italian Alps*”, *Arctic Antarctic and Alpine Research* 32(1), 1-13
- Spinoni J., Naumann G., Vogt J. V., Barbosa P.** (2015) “*The biggest drought events in Europe from 1950 to 2012*”, *Journal of Hydrology: Regional Studies* 3, 509-524

- Stangler D. F., Miller T. W., Honer, H., Larysch E., Puhmann H.** (2022) “*Multivariate drought stress response of Norway spruce, silver fir and Douglas fir along elevational gradients in Southwestern Germany*”, *Frontiers in Ecology and Evolution* 10, 1-15
- Studio forestale associato ECOS** (2012) “*Piano di Gestione Forestale Aziendale dei Beni Silvo-Pastorali del comune di Levico Terme*”
- Studio Tecnico Forestale dr. Giovanni Martinelli** (2013) “*Piano di Gestione Forestale Aziendale dei Beni Silvo-Pastorali del comune di Caldonazzo*”
- Tsui C., Chena, Z., Hsieh C.** (2004) “*Relationships between soil properties and slope position in a lowland rain forest of southern Taiwan*”, *Geoderma* 123(1-2), 131-142
- Sutinen S., Partanen J., Viherä-Aarnio A., Häkkinen R.** (2012). “*Development and growth of primordial shoots in Norway spruce buds before visible bud burst in relation to time and temperature in the field*” *Tree Physiology*, 32(8), 987-997.
- Weber P., Bugmann H., Rigling A.** (2007) “*Radial growth responses to drought of Pinus sylvestris and Quercus pubescens in an inner-Alpine dry valley*”, *Journal of Vegetation Science* 18(6), 777-792

