



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dipartimento Territorio e Sistemi Agro-Forestali

Corso di laurea triennale in Tecnologie Forestali e Ambientali

Analisi dell'influenza climatica sull'anatomia del legno di
Fagus sylvatica nei Balcani Centrali

Relatore:

Prof. Daniele Castagneri

Correlatore:

Prof. Marco Carrer

Laureando:

Samuele Pellichero

Matricola n. 2006060

ANNO ACCADEMICO 2022-2023

*A mia nonna Pierina e alle nostre
infinite discussioni sulle piante.
Mi manchi*

INDICE

ABSTRACT	5
RIASSUNTO	7
1. INTRODUZIONE	9
2. MATERIALI E METODI	11
2.1 Inquadramento dell'area oggetto di studio	11
2.2 Raccolta e preparazione dei campioni	12
2.3 Elaborazione delle immagini delle sezioni	13
3. RISULTATI	19
3.1 Caratteristiche anatomiche	19
3.2 Dimensione del lume dei vasi in percentuale di distanza dall'inizio dell'anello ..	23
3.3 Serie temporali detrendizzate dei parametri anatomici	26
3.4 Cronologie medie detrendizzate	30
3.5 Correlazioni tra cronologie di anatomia del legno e variabili climatiche	34
4. DISCUSSIONI	39
4.1 Caratteristiche anatomiche	39
4.2 Correlazioni tra cronologie di anatomia del legno e variabili climatiche	40
4.3 Anni caratteristici	42
5. CONCLUSIONI	45
6. BIBLIOGRAFIA	47

ABSTRACT

The climatic conditions of the coming decades, characterised by rising temperatures and an increase in drought events, may have a strong influence on European forests. In this thesis, the anatomy of beech wood and the influence that climatic variables have on it were analysed in order to understand the possible effects of climate change on one of the most important species in European forests.

Cores from four beech trees located in eastern Bulgaria, in the Central Balkan National Park, were analysed.

From these, data were obtained for several anatomical variables, calculated for each growth ring of each plant: maximum vessel size (CAMax), median vessel size (CA50), density of vessels (DENSITY), number of vessels (NUM), ring width (TRW).

The possible correlation between these anatomical variables and climatic variables (mean temperature and total precipitation) in the different months of the year was then analysed.

The results showed relevant anatomical features, such as a decrease in CAMax, CA50 and in general the size of all vessels in the terminal portion of the ring. In addition, the inverse relationship between TRW and DENSITY has been demonstrated, i.e. that a decrease in ring width corresponds to an increase in vessel density.

The climatic analyses returned a negative correlation between CAMax and CA50 and the mean temperature in August and September, a positive correlation between DENSITY and the mean temperature in August and September, and a positive correlation between CAMax and CA50 in sectors 3, 4, 5 of the ring and the total precipitation in July and August.

The study of characteristic years (1952 and 2004), i.e. years characterised by a reduced ring width in all four plants, led to the hypothesis that daily maximum temperatures in May may have a strong influence on ring growth.

Given the complexity of the association between anatomical and climatic variables found in this and previous studies on beech, the present study calls for further investigation to understand how climatic variability affects the growth and anatomy of wood in this species.

RIASSUNTO

Le condizioni climatiche dei prossimi decenni, caratterizzate dall'aumento delle temperature e da un aumento degli eventi siccitosi, potranno avere una forte influenza sulle foreste europee. In questa tesi è stata analizzata l'anatomia del legno di faggio e l'influenza che le variabili climatiche hanno su di essa, per capire quali potranno essere gli effetti dei cambiamenti climatici su una delle specie più importanti delle foreste europee.

Sono state analizzate le carote ottenute da 4 faggi situati nell'est della Bulgaria, nel Parco Nazionale dei Balcani Centrali.

Da queste, sono stati ricavati i dati relativi a diverse variabili anatomiche, calcolate per ogni anello di accrescimento di ciascuna pianta: dimensione massima dei vasi (CAMax), dimensione mediana dei vasi (CA50), densità di vasi (DENSITY), numero di vasi (NUM), ampiezza degli anelli (TRW).

È stata poi analizzata la possibile correlazione tra queste variabili anatomiche e le variabili climatiche (temperatura media e precipitazioni totali) nei diversi mesi dell'anno.

I risultati hanno evidenziato caratteristiche anatomiche rilevanti, come la diminuzione della CAMax, CA50 e in generale la dimensione di tutti i vasi nella porzione terminale dell'anello, oltre che ad aver dimostrato la relazione inversa tra TRW e DENSITY, ovvero che al diminuire dell'ampiezza dell'anello corrisponde un aumento della densità di vasi.

Le analisi climatiche hanno restituito una correlazione negativa tra CAMax e CA50 e la temperatura media nei mesi di agosto e settembre, una correlazione positiva tra DENSITY e la temperatura media nei mesi di agosto e settembre e una correlazione positiva tra CAMax e CA50 nei settori 3, 4, 5 dell'anello e le precipitazioni totali nei mesi di luglio e agosto.

Lo studio degli anni caratteristici (1952 e 2004), ovvero gli anni contraddistinti dall'aver una ridotta ampiezza dell'anello in tutte e 4 le piante, ha portato all'ipotesi che le temperature massime giornaliere nel mese di maggio possano avere una forte influenza sull'accrescimento dell'anello.

Considerata la complessità dell'associazione tra le variabili anatomiche e quelle climatiche riscontrate in questo e nei precedenti studi sul faggio, il presente studio sollecita ul-

teriori approfondimenti per comprendere come la variabilità climatica influenzi l'accrescimento e l'anatomia del legno di questa specie.

1. INTRODUZIONE

Il faggio (*Fagus sylvatica* L.) è una delle specie forestali di maggiore importanza in Europa, sia a livello ecologico che economico. La diffusione in Europa del faggio risale all'Olocene, in seguito ai cambiamenti climatici avvenuti al termine dell'ultima glaciazione che ha interessato l'emisfero boreale (Tinner & Lotter, 2006). Attualmente, il suo areale di distribuzione si sviluppa longitudinalmente dai Monti Cantabrigi ad ovest fino ai Carpazi ed ai Balcani ad est, e latitudinalmente dalla Sicilia a sud fino al sud della Svezia e della Norvegia a nord (Magri, 2008). In questa vasta area il faggio trova le condizioni ideali per il suo sviluppo, formando estese foreste, molte delle quali considerate vetuste e riconosciute come Patrimonio Mondiale dell'umanità dall'UNESCO (De Vivo, 2018). Queste condizioni climatiche stanno però velocemente mutando a causa dell'essere umano, il quale ha completamente stravolto il clima, inducendo molteplici cambiamenti climatici, di molto superiori alla naturale variabilità del clima (IPCC, 2022).

Uno studio condotto su 5800 faggi situati in 324 siti, rappresentanti l'intero areale della specie, ha dimostrato che i futuri cambiamenti della temperatura globale, in particolare quelli superiori a 1,5 °C, porteranno a una diffusa diminuzione da -20 a -40% della crescita del faggio, una situazione che potrebbe essere ulteriormente amplificata a -50% se prevarranno condizioni di siccità (Martinez del Castillo *et al*, 2022). Sempre secondo Martinez del Castillo, queste tendenze significative fanno pensare a un aumento della mortalità forestale, dato che il calo della crescita è segnalato come un precursore della moria degli alberi.

Diversi sono gli studi che, oltre a questo, si sono focalizzati sugli effetti macroscopici (mortalità ed incremento radiale) che il clima può avere sul faggio, cercando così di prevedere i possibili effetti derivanti dai cambiamenti climatici.

Molti meno sono, invece, gli studi che si sono concentrati sull'anatomia del legno di faggio e sull'analisi dell'influenza che il clima può avere su di essa.

Nelle piante, l'acqua e i minerali disciolti (linfa grezza) sono trasportati attraverso una rete capillare di vasi (xilema o legno) dalle radici, passando per il fusto fino ad arrivare alle foglie. Durante il loro sviluppo, le strutture xilematiche sono influenzate nella crescita da fattori interni ed esterni (Von Arx *et al*, 2016).

I fattori climatici possono, infatti, modificare il sistema xilematico, in particolare le dimensioni e la frequenza dei vasi, e di conseguenza anche la loro capacità di condurre acqua (Oladi *et al*, 2014).

Tutte queste informazioni anatomiche rimangono poi nel legno, e rappresentano un vero e proprio archivio naturale per le relazioni ambientali di crescita e il funzionamento delle piante con risoluzione intra-annuale (Fonti *et al*, 2010). Questo perché, i vasi xilematici, in base alla loro posizione nell'anello (legno primaticcio o tardivo), possono essere ricondotti ad un diverso momento di formazione e crescita durante la stagione vegetativa, e restituire quindi risultati relativi a diversi periodi dell'anno.

La difficoltà di questa metodologia sta nel riuscire a separare le variazioni plastiche, ovvero quelle avvenute in risposta a fattori esterni, da quelle caratteristiche della fisiologia della pianta, dovute principalmente all'età ed alle dimensioni della pianta (De Micco *et al*, 2019). Essendo diverse le variabili che possono interferire nella crescita, non è possibile definire una tecnica universale per standardizzare i valori, ma ci sono diverse metodiche possibili (Biondi & Qeadan, 2008).

Considerando le potenzialità di questa metodologia e la necessità di approfondimenti relativi a queste dinamiche, il seguente studio si pone due principali obiettivi:

1. Lo studio dell'anatomia del legno di faggio nei Balcani Centrali, in particolare riferimento ai vasi xilematici
2. L'analisi dell'influenza che la temperatura e le precipitazioni hanno sull'anatomia del legno di faggio, in particolare riferimento ai vasi xilematici.

2. MATERIALI E METODI

2.1 Inquadramento dell'area oggetto di studio

I campioni utilizzati per le nostre analisi sono stati prelevati da una faggeta pura situata vicino alla città di Tvardista, nell'est della Bulgaria (*Fig.1*). Il sito si trova ad un'altitudine di 1421 m s.l.m. ed ha coordinate 42.78365 N, 25.9614167 E. L'area è situata all'interno del Parco Nazionale dei Balcani Centrali, il quale è stato istituito nel 1991 ed occupa una superficie 71,670 ettari, estendendosi attraverso tutta la Bulgaria, dalla Serbia al Mar Nero.

La catena montuosa qui presente forma una sorta di zona di confine climatico tra le masse d'aria fredda del nord e quelle più calde del sud, che portano ad inverni rigidi e primavere piovose.

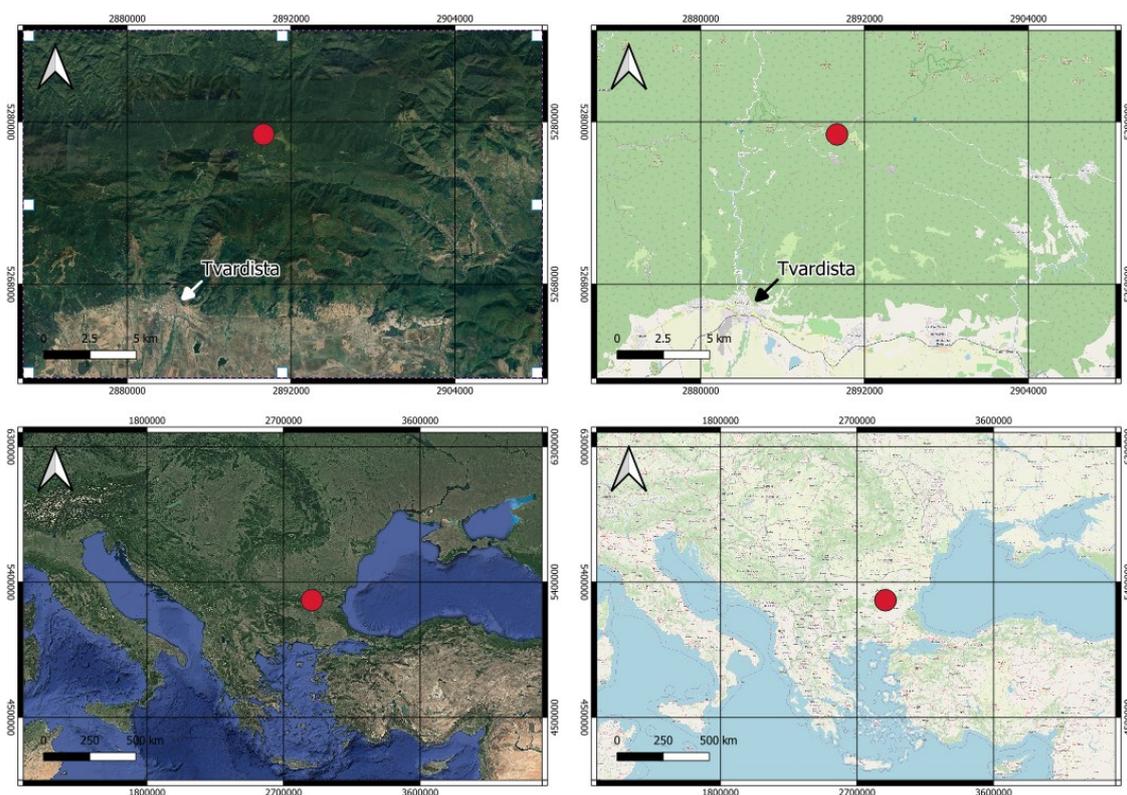


Figura 1. Mappe per l'inquadramento del sito di raccolta dei campioni (contrassegnato con il punto rosso). Le due mappe superiori sono a scala 1:200000, mentre le due mappe inferiori sono a scala 1:1800000.

2.2 Raccolta e preparazione dei campioni

Il campionamento è stato effettuato in data 04/06/2019 da parte di tre ricercatori, i quali hanno prelevato 20 carote di faggio di diametro 1 cm con l'ausilio di un succhiello di Pressler.

I campioni prelevati sono stati catalogati con la sigla TVRH, che sta ad indicare la città di Tvardista, ed un numero, che serve per identificare la pianta (ad esempio, TVRH01 indica la pianta numero 1, TVRH02 indica la pianta numero 2, ecc.).

Di questi campioni ne sono stati utilizzati 4 per il presente studio, che corrispondono alle piante TVRH02, TVRH03, TVRH07, TVRH08.

Dopo aver ricevuto i campioni presso l'Università degli Studi di Padova, questi sono stati allestiti in laboratorio.

Ogni carota è stata suddivisa in più segmenti lunghi circa 4-5 cm (in genere 5 o 6 segmenti per carota), ed ogni segmento è stato rinominato in ordine crescente dal midollo della pianta verso l'esterno.

Per esempio, la carota della pianta TVRH02 è stata suddivisa in 5 segmenti, rinominati TVRH02_1, TVRH02_2, TVRH02_3, TVRH02_4, TVRH02_5, dove il segmento 1 è il più vicino al midollo ed il segmento 5 il più vicino alla corteccia.

In questa fase sono stati ottenuti 23 segmenti: 5 da TVRH02, 6 da TVRH03, 6 da TVRH07, 6 da TVRH08.

Da ogni segmento è stata poi ottenuta una sezione trasversale di 15 micrometri utilizzando il microtomo rotativo del dipartimento TESAF dell'Università di Padova.

Ogni sezione ha preso il nome dal segmento da cui è stata ottenuta, con l'aggiunta di una lettera che indica il numero di sezione.

Per esempio, le sezioni della pianta TVRH02 sono state rinominate TVRH02_1A, TVRH02_2A, TVRH02_3A, TVRH02_4B, TVRH02_5B, dove quelle aventi la lettera B sono le seconde sezioni fatte da quel segmento, poiché la prima sezione (A) non rispettava i requisiti.

Ogni sezione è stata poi posizionata su un vetrino porta-oggetti ed è stata colorata con astra-blu e safranina.

Infine, le 23 sezioni colorate sono state scannerizzate con il ZEISS Axio-scan Microscope Slide Scanner, restituendo così le immagini digitali (*Fig.2*) delle 23 sezioni, le quali mantengono il nome della sezione.

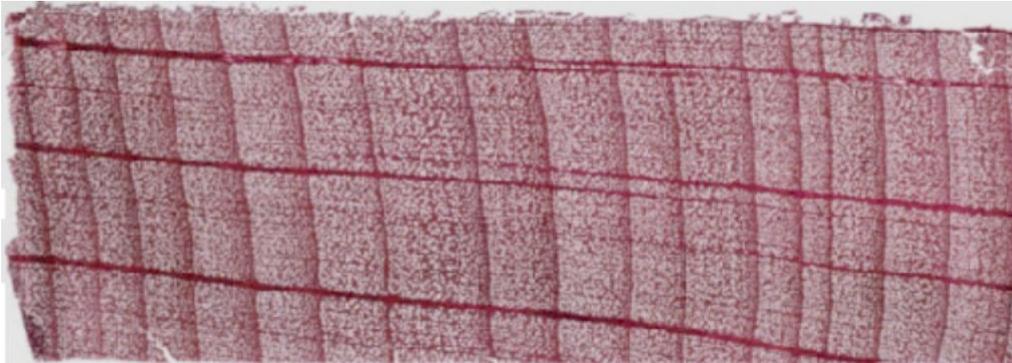


Figura 2. Immagine ottenuta in seguito alla scannerizzazione con il ZEISS Axioscan Microscope Slide Scanner. In particolare, si tratta della sezione TVRH02_2A.

2.3 Elaborazione delle immagini delle sezioni

In seguito alla scannerizzazione, ogni immagine è stata suddivisa in più frammenti, utilizzando il software “ZEISS ZEN 3.8”.

Questo passaggio è necessario poiché il software “ROXAS”, utilizzato nel passaggio successivo, richiede delle immagini con dei parametri specifici e di dimensioni limitate.

Da ogni immagine sono stati quindi creati più frammenti, denominati ROI (Region of Interest) (*Fig.3 & Fig.4*), con i seguenti parametri:

- Legno tardivo rivolto verso il basso (ROXAS lavora con sezioni in verticale)
- Larghezza della ROI non superiore a 2000 μm (nel nostro caso abbiamo utilizzato come larghezza prefissata 1750 μm)
- Lunghezza della ROI non superiore a 32000 pixel
- Raggi paralleli al bordo della ROI (quindi disposti perfettamente in verticale)

Passaggio fondamentale durante la creazione delle ROI è assicurarsi di prendere tutti gli anelli per intero, in modo da non creare buchi nella sezione temporale, che andrebbero a compromettere i risultati. Per fare questo è necessario che tra una ROI e l'altra le due aree si sormontino, prendendo così per intero l'anello di congiunzione delle due ROI.

Le ROI ricavate sono state rinominate utilizzando il nome dell'immagine con l'aggiunta di un numero, che indica il numero della ROI andando dall'esterno della pianta verso l'interno.

Per esempio, le ROI ricavate dall'immagine TVRH02_1A sono state rinominate TVRH02_1A_1, TVRH02_1A_2, TVRH02_1A_3, TVRH02_1A_4, TVRH02_1A_5, dove la ROI numero 1 è la più esterna di quest'immagine, mentre la ROI numero 5 è la più interna (in questo caso, essendo dell'immagine 1, è in assoluto la ROI più vicina al midollo della pianta numero 2).

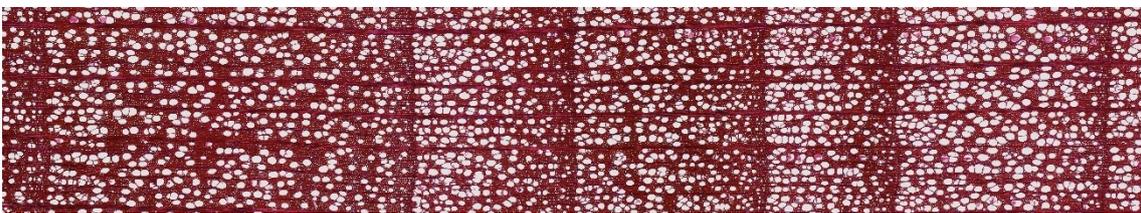


Figura 3. ROI ricavata utilizzando il software ZEISS ZEN 3.8. In particolare, si tratta della ROI TVRH07_1A_2.

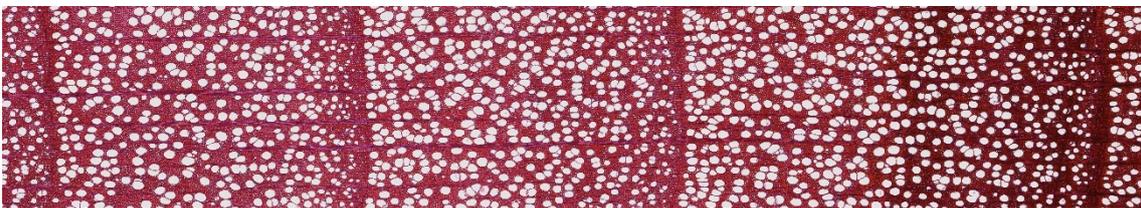


Figura 4. ROI più ingrandita rispetto alla precedente (Fig.3). In particolare, si tratta della ROI TVRH03_5A_1.

Successivamente, le ROI sono state analizzate con il software ROXAS (Von Arx & Carrer, 2014), uno strumento di analisi delle immagini appositamente progettato per quantificare le strutture xilematiche in sezione trasversale.

ROXAS identifica automaticamente le strutture anatomiche e calcola le statistiche sull'intero campione, su ogni anello e su singole porzioni.

Affinchè questo avvenga è necessario disegnare manualmente il bordo degli anelli con uno strumento chiamato "Draw missing border".

Inoltre, prima di considerare attendibili i risultati è essenziale un controllo manuale di tutte le sezioni, per rimuovere o sistemare eventuali errori del software, che possono fungere da outlier andando a falsare i risultati.

Questi errori generalmente consistono nell'unione di più vasi in un unico vaso (per via di imperfezioni che confondono ROXAS), andando così a formare vasi con dimensioni eccessive rispetto alla media.

Per eliminare questi agglomerati è sufficiente utilizzare lo strumento "Delete cells", e successivamente lo strumento "Draw missing cells" per ridisegnare i vasi corretti.

Come ultimo passaggio prima di esportare i dati, è stato assegnato l'anno di corrispondenza ad ogni anello.

Anche questo non è un passaggio automatico, ma va effettuato manualmente, utilizzando lo strumento "Plot reference RW series". Si procede iniziando dalla sezione con gli anelli più esterni dell'albero, attribuendogli come ultimo anno quello della raccolta dei campioni (gli altri anni li assegna ROXAS di conseguenza). Utilizzando lo strumento "Plot reference RW series" si genera un grafico a linee rappresentante l'ampiezza degli anelli presenti nell'immagine, e lo si mette a confronto con un altro grafico a linee generato da un file txt contenente le ampiezze degli anni misurati direttamente dalle carote (RW series).

Se i due grafici si sovrappongono significa che la datazione è corretta, altrimenti è necessario adottare dei cambiamenti nella datazione fino a quando il grafico dell'immagine non si sovrappone perfettamente a quello delle RW series.

Si procede così per ogni immagine fino alla datazione di tutte.

Dopo questi passaggi, gli output sono stati salvati in diversi file in formato txt, contenenti le informazioni, suddivise per albero, di ogni vaso presente nelle immagini.

I vasi (cellule) analizzati sono 131,501, con 43 variabili considerate per ognuno di questi, per un totale di 5,654,543 dati.

In seguito, questi dati sono stati analizzati con il software "R" utilizzato tramite l'interfaccia "RStudio".

Con R, per prima cosa, sono stati elaborati i seguenti grafici:

- Dimensione massima dei vasi (CAMax, dove CA sta per "Cell Area", poiché "cellula" può essere utilizzato come sinonimo di "vaso") nei diversi anelli, per le 4 piante e per settori, ovvero suddividendo l'anello in 5 porzioni uguali, numerati dal legno primaticcio al tardivo (Castagneri *et al*, 2017)

- Dimensione mediana dei vasi (CA50, dove CA sta per “Cell Area”, poiché “cellula” può essere utilizzato come sinonimo di “vaso”) nei diversi anelli, per le 4 piante e per settori
- Densità di vasi per anello (DENSITY) nei diversi anelli, per le 4 piante
- Numero di vasi per anello (NUM) nei diversi anelli, per le 4 piante
- Ampiezza dell’anello (TRW) nei diversi anelli, per le 4 piante
- Profili rappresentanti la dimensione del lume dei vasi in percentuale di distanza dall’inizio dell’anello

Successivamente, i dati calcolati lungo le serie temporali sono stati standardizzati utilizzando la funzione “spline” con ampiezza di 20 anni presente all’interno del pacchetto *dplr* (Bunn, 2008).

La standardizzazione è stata fatta per rimuovere il trend dell’età ed i disturbi, e di conseguenza sottolineare le variazioni interannuali.

Per trend dell’età si intende il fatto che, trasversalmente, la dimensione dei condotti xilematici aumenta dagli anelli prossimi al midollo verso gli anelli più esterni (Anfodillo *et al*, 2013).

Con i dati delle serie detrendizzate sono stati fatti i seguenti grafici:

- CAMax detrendizzata, per le 4 piante e per settori
- CA50 detrendizzata, per le 4 piante e per settori
- NUM detrendizzato, per le 4 piante
- DENSITY detrendizzata, per le 4 piante

In seguito, i dati delle 4 piante sono stati messi insieme a creare una cronologia media, considerando solo i dati dal 1931 in avanti, essendo questo l’anno da cui si hanno dati su tutte e 4 le piante:

- Cronologia CAMax detrendizzata, totale e per settori
- Cronologia CA50 detrendizzata, totale e per settori
- Cronologia NUM detrendizzato, totale
- Cronologia DENSITY detrendizzato, totale

Come ultimo passaggio utilizzando RStudio, sono stati creati dei file txt contenenti i dati totali e detrendizzati delle 4 variabili (CAMax per settori, CA50 per settori, NUM, DENSITY) dal 1931 in poi.

Questi file sono stati caricati su Excel e, ad ogni anno, sono stati associati i dati climatici ricavati dalle griglie europee (dataset E-OBS).

Le variabili climatiche utilizzate sono state la temperatura media e le precipitazioni totali, suddivise per i 12 mesi annuali.

Infine, sono stati svolti numerosi test di correlazione tra le diverse variabili anatomiche e le variabili climatiche.

3. RISULTATI

3.1 Caratteristiche anatomiche

La prima variabile analizzata è stata la dimensione massima dei vasi (CAMax) nei diversi anelli e per settori (*Fig.5*).

Si nota come l'andamento sia piuttosto simile nei diversi settori dell'anello, eccezion fatta per il settore 5, nel quale la dimensione massima dei vasi ha valori inferiori rispetto agli altri 4 settori. Questo perché, nonostante il faggio abbia un legno a porosità diffusa, nel legno tardivo i vasi tendono comunque ad avere una dimensione leggermente minore.

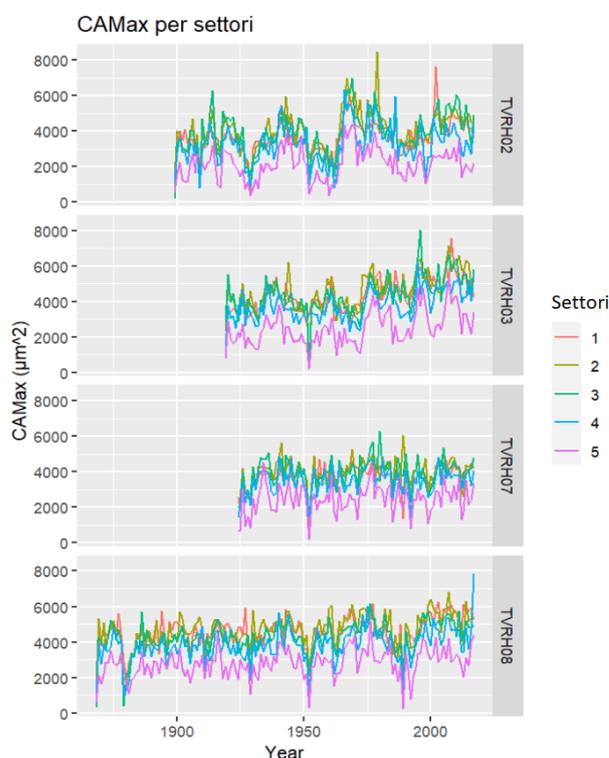


Figura 5. Dimensione massima dei vasi (CAMax) nei diversi anelli (anni, Year) e settori. Ogni grafico rappresenta una pianta, e le diverse curve indicano ciascuna un diverso settore dell'anello, come indicato nella legenda.

L'altra variabile relativa alle dimensioni dei vasi analizzata è la dimensione mediana dei vasi (CA50) nei diversi anelli e per settori (*Fig.6*).

Anche in questo caso l'andamento è simile nei diversi settori ad eccezione del settore 5, che in questo caso segue un andamento inferiore rispetto agli altri 4 settori.

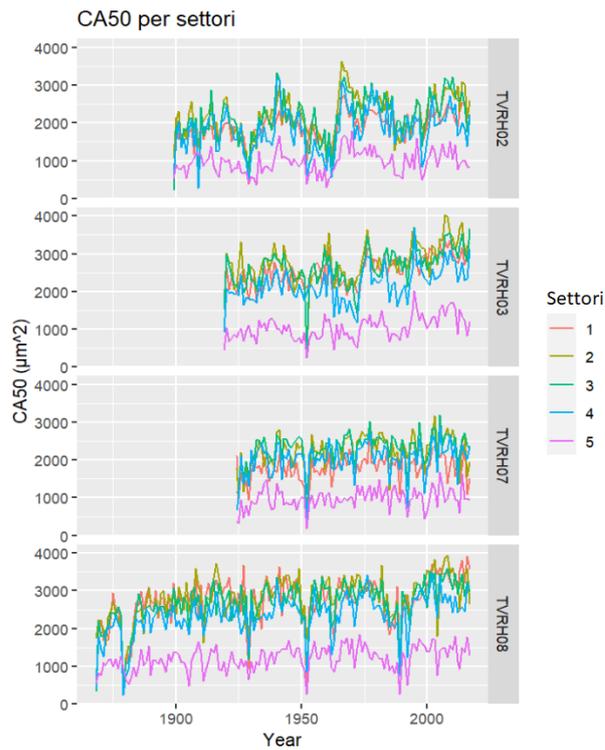


Figura 6. Dimensione mediana dei vasi (CA50) nei diversi anelli (anni, Year) e settori. Ogni grafico rappresenta una pianta, e le diverse curve indicano ciascuna un diverso settore dell'anello, come indicato nella legenda.

La variabile analizzata successivamente è stata l'ampiezza dell'anello (TRW) nei diversi anelli (Fig. 7).

In particolare, si nota come, negli anni 1952 e 2004, tutte e quattro le piante abbiano un'ampiezza dell'anello di molto inferiore rispetto agli altri anni.

Questi due anni vengono chiamati caratteristici, e sono quelli che più di tutti potranno darci informazioni utili alla nostra ricerca.

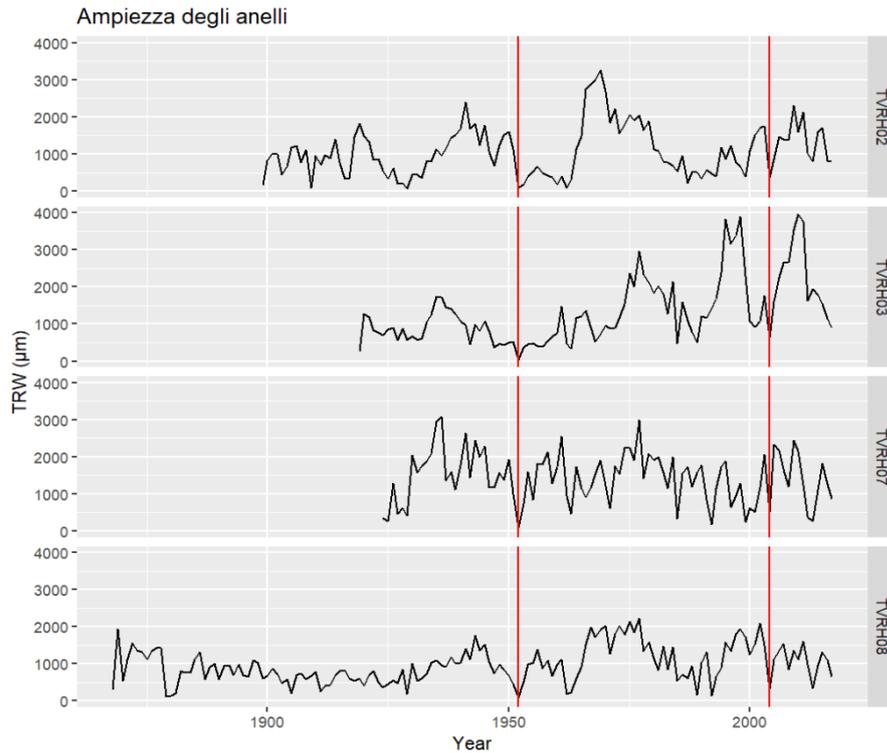


Figura 7. Ampiezza dell'anello (TRW) nei diversi anelli (anni, Year). Le due intercette stanno ad indicare gli anni caratteristici 1952 e 2004, ovvero due anni con un'ampiezza dell'anello di molto inferiore rispetto agli altri anni, riscontrabili in tutte e 4 le piante.

In seguito, è stata analizzata la densità di vasi per anello (DENSITY) nei diversi anelli (Fig.8).

Si nota come nell'anno 1952 (prima intercetta da sinistra), ovvero il più corto anello presente, la densità sia molto più elevata rispetto agli altri anni (eccezion fatta per la pianta TVRH03).

Anche per l'anno 2004 (seconda intercetta da sinistra) la densità è particolarmente elevata, anche se meno visibile rispetto all'anno 1952.



Figura 8. Densità di vasi per anello (*DENSITY*) nei diversi anelli (anni, *Year*). Ogni curva rappresenta una pianta. Le due intercette sono posizionate negli anni 1952 e 2004, ovvero due anni caratteristici con un'ampiezza dell'anello molto inferiore rispetto agli altri anni.

L'analisi del numero di vasi per anello (*NUM*) nei diversi anelli (*Fig.9*) non ha invece portato a risultati interessanti, poiché direttamente collegato all'ampiezza dell'anello. Per esempio, è visibile come negli anni caratteristici 1952 e 2004 il numero di vasi sia molto inferiore rispetto agli altri anni, ma questo dato è dovuto principalmente al fatto che l'ampiezza dell'anello è piccola, e non ci restituisce un valore che può essere confrontato tra i diversi anni, come invece si può fare con la densità.

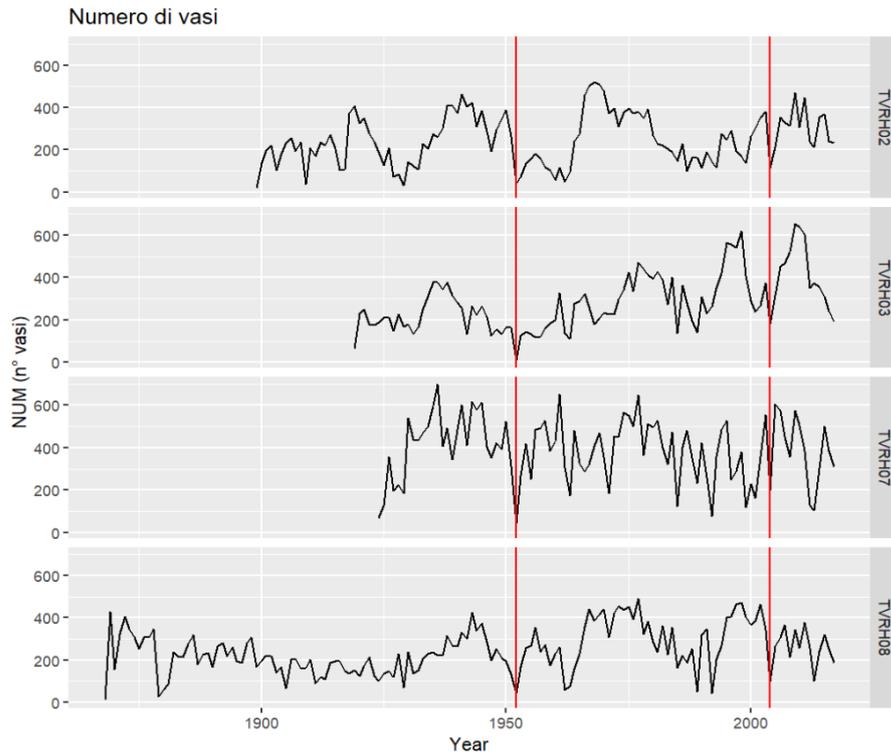


Figura 9. Numero di vasi per anello (NUM) nei diversi anelli (anni, Year). Ogni curva rappresenta una pianta. Le due intercette sono posizionate negli anni 1952 e 2004, ovvero due anni caratteristici con un'ampiezza dell'anello molto inferiore rispetto agli altri anni.

3.2 Dimensione del lume dei vasi in percentuale di distanza dall'inizio dell'anello

Il grafico rappresentante la dimensione del lume dei vasi in percentuale di distanza dall'inizio dell'anello (Fig.10) evidenzia com'è distribuita la dimensione dei vasi nell'anello:

- Nella distanza 0-25 % i vasi tendono gradualmente a crescere
- Nella distanza 25-50 % la dimensione dei vasi si mantiene abbastanza costante
- Nella distanza 50-75 % i vasi diminuiscono gradualmente di dimensione
- Nella distanza 75-100 % la dimensione dei vasi decresce bruscamente, fino a portarsi quasi a 0

Dimensione vasi nell'anello

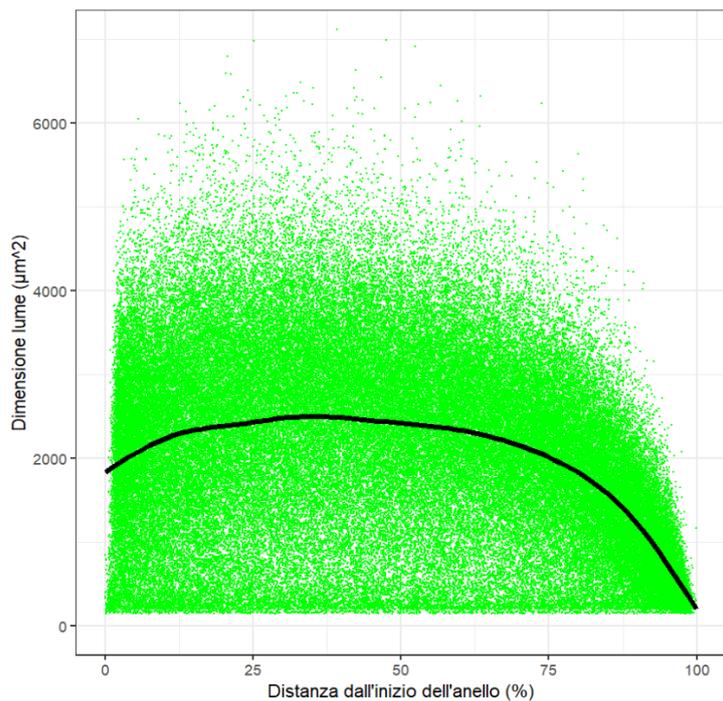


Figura 10. Dimensione del lume dei vasi in percentuale di distanza dall'inizio dell'anello. Sono stati rappresentati tutti i 131,501 vasi campionati (punti verdi), e la linea di tendenza nera indica l'andamento medio.

Rispetto agli anni caratteristici, il grafico che mette a confronto la dimensione del lume dei vasi in percentuale di distanza dall'inizio dell'anello dell'anno 1952 con quelli dei 3 anni precedenti (1951, 1950, 1949) (*Fig.11*), testimonia come nell'anno 1952 i vasi abbiano una dimensione notevolmente minore rispetto ai 3 anni precedenti.

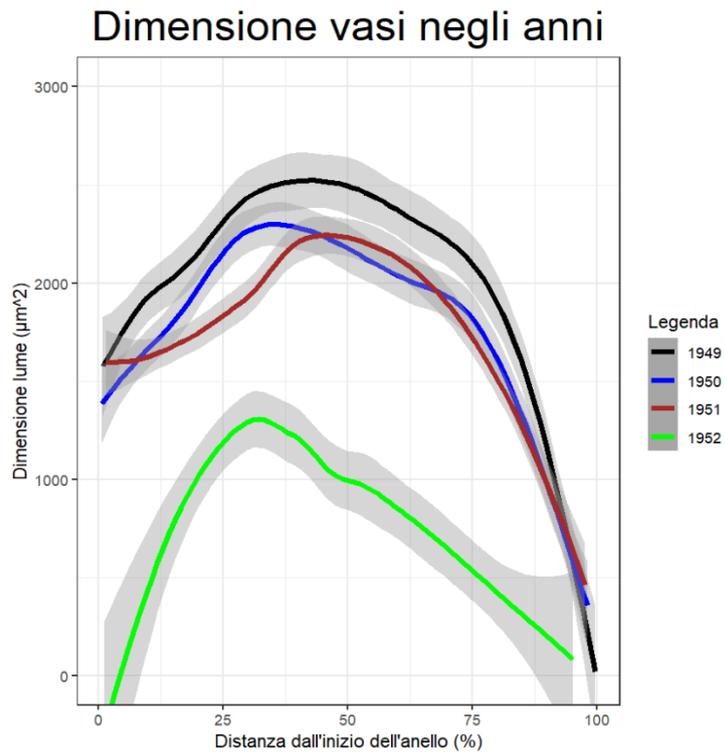


Figura 11. Dimensione del lume dei vasi in percentuale di distanza dall'inizio dell'anello per gli anni 1949, 1950, 1951, 1952. Ogni linea colorata corrisponde al profilo medio calcolato su 4 piante relativo ad un anno, come indicato in tabella. L'area grigia indica l'errore standard.

Lo stesso risultato, anche se in maniera meno netta, lo restituisce la stessa tipologia di grafico svolta per l'anno caratteristico 2004 e i 3 anni precedenti (2003, 2002, 2001) (Fig.12).

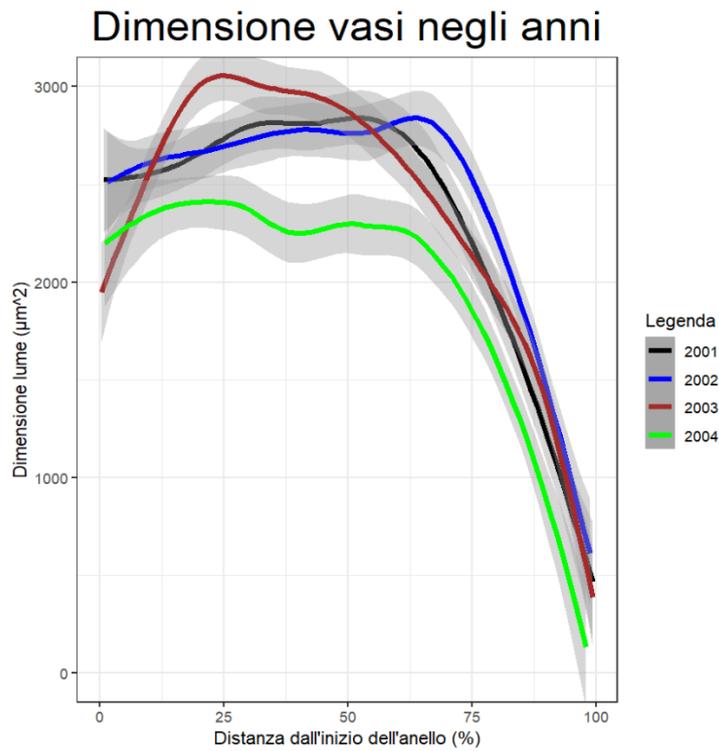


Figura 12. Dimensione del lume dei vasi in percentuale di distanza dall'inizio dell'anello per gli anni 2001, 2002, 2003, 2004. Ogni linea colorata corrisponde al profilo medio calcolato su 4 piante relativo ad un anno, come indicato in tabella. L'area grigia indica l'errore standard.

3.3 Serie temporali detrendizzate dei parametri anatomici

Il grafico della CAMax detrendizzata per settori (Fig.13) mostra come, in seguito alla detrendizzazione, la dimensione massima dei vasi sia simile in ogni settore dell'anello.

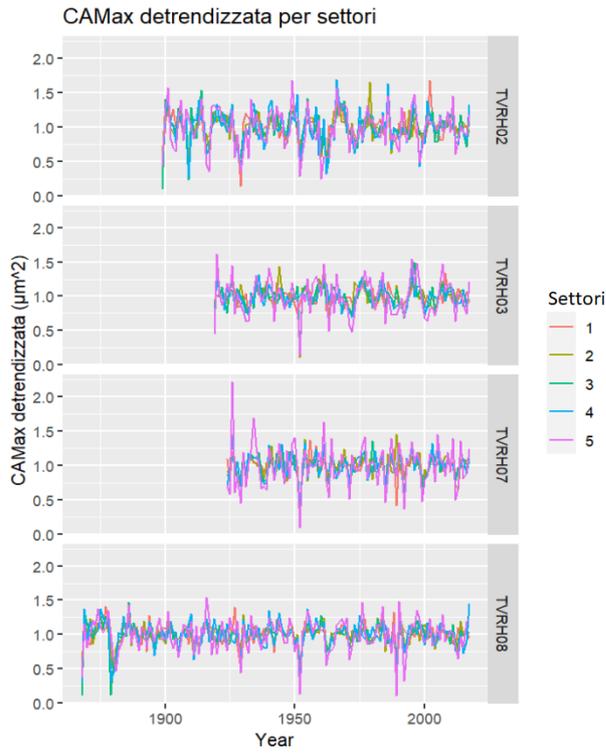


Figura 13. Dimensione massima dei vasi (CAMax) detrendizzata nei diversi anelli (anni, Year) e settori. Ogni grafico rappresenta una pianta, e le diverse curve indicano ciascuna un diverso settore dell'anello, come indicato nella legenda.

Lo stesso discorso vale per il grafico della CA50 detrendizzata per settori (Fig.14), nel quale le diverse curve dei settori tendono a sovrapporsi, per via della detrendizzazione.

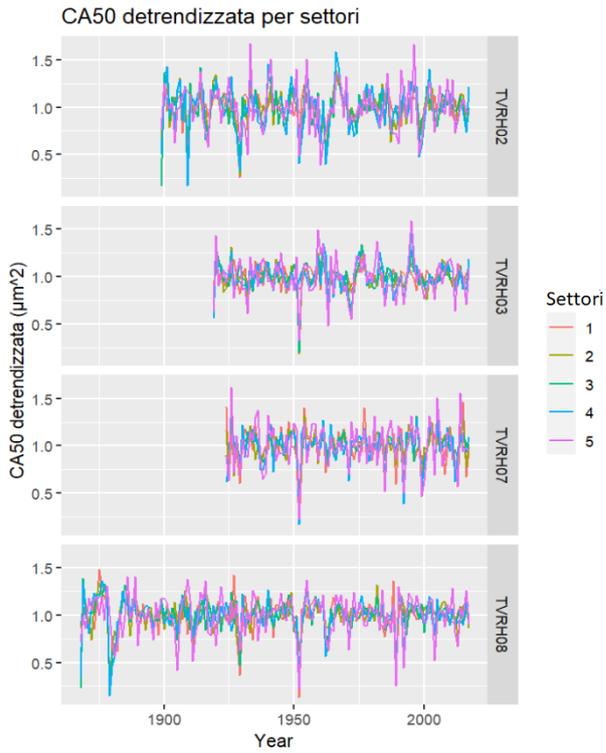


Figura 14. Dimensione mediana dei vasi (CA50) detrendizzata nei diversi anelli (anni, Year) e settori. Ogni grafico rappresenta una pianta, e le diverse curve indicano ciascuna un diverso settore dell'anello, come indicato nella legenda.

Riguardo ai grafici della densità di vasi detrendizzata (Fig.15), si nota ancora come la densità negli anni 1952 (prima intercetta da sinistra) e 2004 (seconda intercetta da sinistra) sia maggiore rispetto che negli altri anni.



Figura 15. Densità di vasi per anello (DENSITY) detrendizzata nei diversi anelli (anni, Year). Ogni curva rappresenta una pianta. Le due intercette sono posizionate negli anni 1952 e 2004, ovvero due anni caratteristici con un'ampiezza dell'anello molto inferiore rispetto agli altri anni.

Anche nel caso dei grafici riguardanti il numero di vasi per anello detrendizzato (Fig.16), come per i grafici del numero di vasi non detrendizzato, i risultati rimarcano come il numero di vasi per anello sia una variabile fortemente legata all'ampiezza dell'anello.



Figura 16. Numero di vasi per anello (NUM) detrendizzato nei diversi anelli (anni, Year). Ogni curva rappresenta una pianta. Le due intercette sono posizionate negli anni 1952 e 2004, ovvero due anni caratteristici con un'ampiezza dell'anello molto inferiore rispetto agli altri anni.

3.4 Cronologie medie detrendizzate

La cronologia media detrendizzata del parametro CAMax (Fig.17) mostra come nel 1952, ovvero l'anno con gli anelli più stretti, la dimensione massima dei vasi nei diversi settori sia di molto inferiore rispetto agli altri anelli.

Lo stesso non si può dire riguardo l'anno 2004, ovvero l'altro anno con gli anelli piuttosto stretti, il quale mantiene delle dimensioni massime dei vasi non molto elevate, ma non particolarmente diverse dalla media.

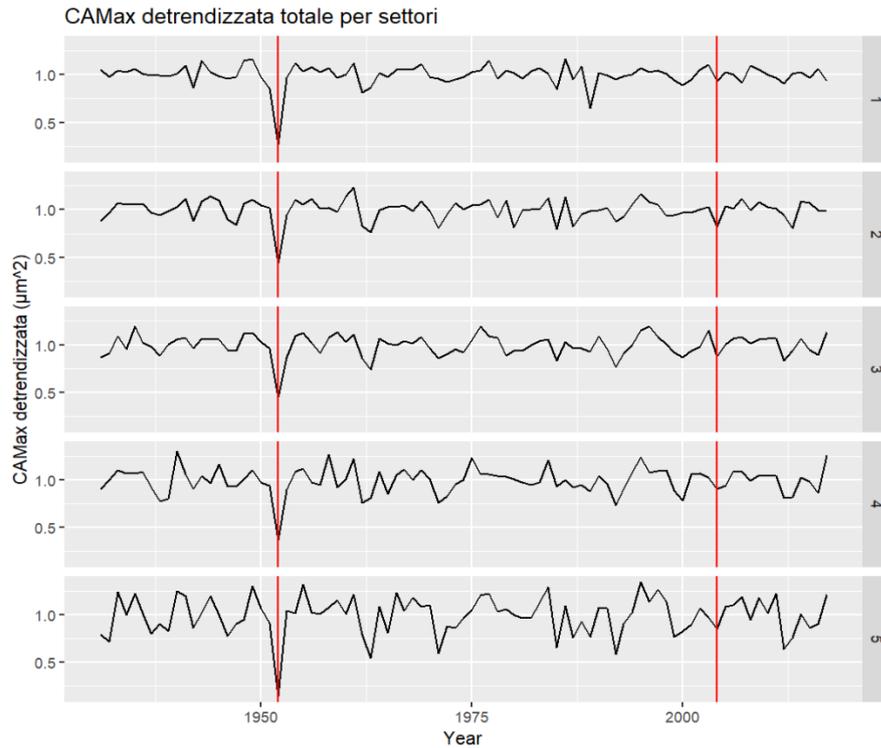


Figura 17. Cronologia media della dimensione massima dei vasi (CAMax) per settori. Ogni curva rappresenta un settore dell'anello. Le due intercette sono posizionate negli anni 1952 e 2004, ovvero due anni caratteristici con un'ampiezza dell'anello molto inferiore rispetto agli altri anni.

Simili sono anche i risultati riscontrabili nella cronologia media della CA50 detrendizzata per settori (Fig.18).

In questo grafico, infatti, si nota come nel 1952 la dimensione mediana dei vasi nei diversi settori sia sensibilmente inferiore rispetto agli altri anni, mentre nel 2004 non si nota una differenza sostanziale rispetto agli altri anni.

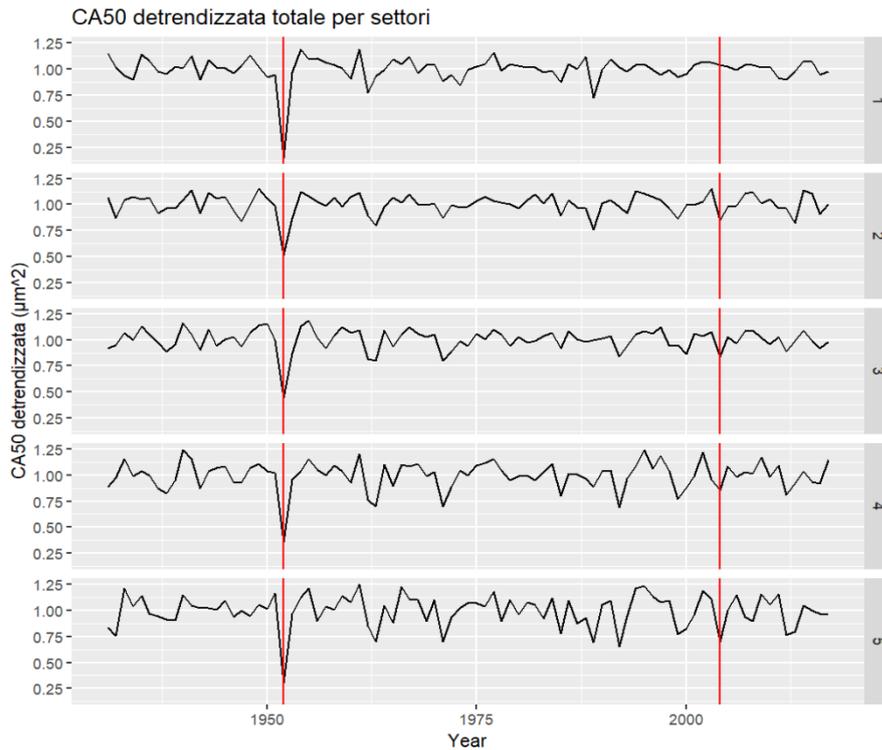


Figura 18. Cronologia media della dimensione mediana dei vasi (CA50) per settori. Ogni curva rappresenta un settore dell'anello. Le due intercette sono posizionate negli anni 1952 e 2004, ovvero due anni caratteristici con un'ampiezza dell'anello molto inferiore rispetto agli altri anni.

La cronologia media della densità di vasi per anello detrendizzata (Fig.19) sottolinea come, nei due anni caratteristici (1952 e 2004), la densità di vasi per anello sia considerevolmente maggiore rispetto agli altri anelli.

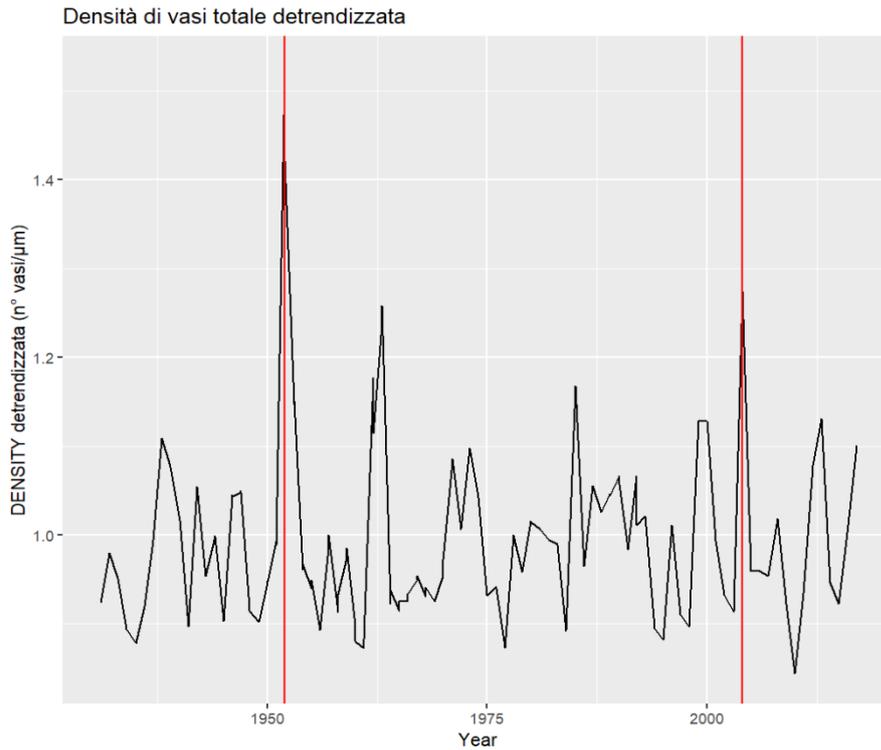


Figura 19. Cronologia media della densità di vasi per anello (DENSITY) detrendizzata. Le due intercette sono posizionate negli anni 1952 e 2004, ovvero due anni caratteristici con un'ampiezza dell'anello molto inferiore rispetto agli altri anni.

Infine, la cronologia media del numero di vasi per anello detrendizzata (Fig.20), indica ancora come il numero di vasi per anello sia strettamente correlato all'ampiezza dell'anello.

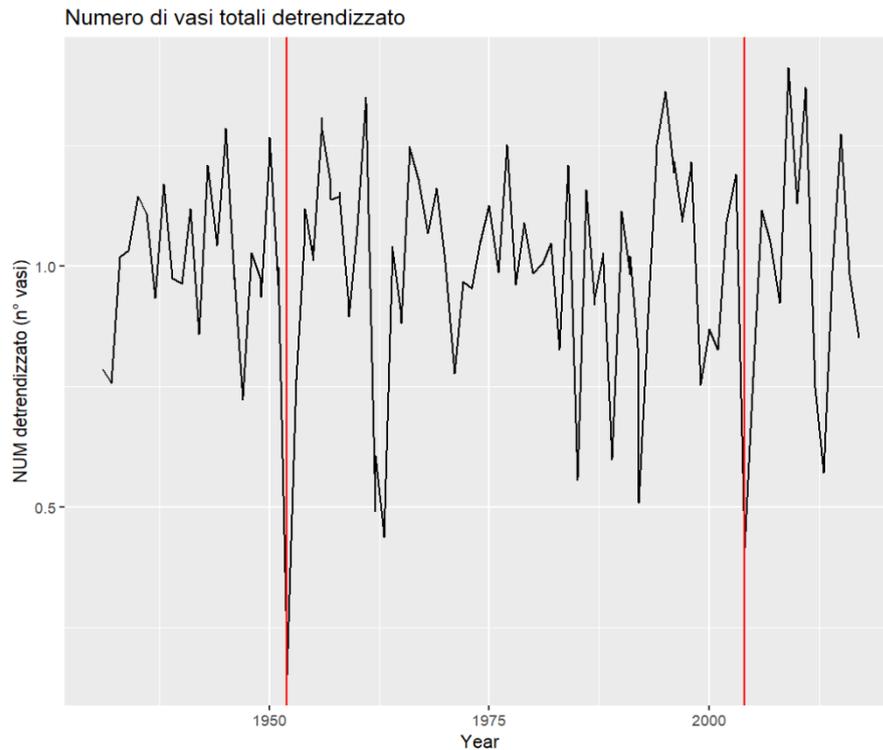


Figura 20. Cronologia media del numero di vasi per anello (NUM) detrendizzato. Le due intercette sono posizionate negli anni 1952 e 2004, ovvero due anni caratteristici con un'ampiezza dell'anello molto inferiore rispetto agli altri anni.

3.5 Correlazioni tra cronologie di anatomia del legno e variabili climatiche

I coefficienti di correlazione risultanti dall'analisi della possibile associazione tra la temperatura media nei 12 mesi e le 4 variabili anatomiche (CA50 per settori, CAMax per settori, DENSITY, NUM) nella fascia temporale 1931-2017 (Tab.1) mostrano una correlazione negativa tra CA50 e CAMax e i mesi di agosto (soprattutto) e settembre, ossia che l'aumento della temperatura media è associato alla diminuzione di CA50 e CAMax.

Nel caso della densità di vasi per anello c'è una correlazione positiva nei mesi di agosto e settembre, che sta ad indicare che all'aumento di una variabile è associato l'aumento anche dell'altra variabile (l'aumento della temperatura media è associato con l'aumento della densità di vasi per anello).

Rispetto al numero di vasi per anello, invece, non si riscontra alcuna correlazione con la temperatura media.

CORRELAZIONE TRA CA50 E TEMPERATURA MEDIA 1931-2017												
	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre
CA50_1	0.01455	-0.02680	0.09706	-0.17281	-0.02065	0.02117	-0.02469	-0.23604	-0.21801	-0.03390	-0.08858	-0.11357
CA50_2	0.07219	-0.03469	0.02963	-0.22768	0.12720	0.00826	-0.10397	-0.24086	-0.22498	-0.02881	0.01883	0.02372
CA50_3	-0.00014	0.00211	0.03562	-0.13890	0.08639	-0.14780	-0.11152	-0.34109	-0.22306	-0.05901	-0.06855	0.00790
CA50_4	-0.00535	0.14649	0.03950	-0.16174	0.00676	-0.11625	-0.14783	-0.45575	-0.24859	-0.07220	-0.09896	-0.12452
CA50_5	-0.07357	0.10382	0.09061	-0.18205	0.06279	-0.00422	-0.17145	-0.33290	-0.16792	-0.07899	-0.00250	-0.04418
CORRELAZIONE TRA CAMax E TEMPERATURA MEDIA 1931-2017												
	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre
CAMax_1	-0.01944	0.00053	-0.00939	-0.16415	0.10652	-0.02770	-0.16301	-0.28949	-0.27835	-0.04408	-0.04630	-0.08605
CAMax_2	0.09035	0.02050	0.07323	-0.10607	0.06375	-0.08763	-0.19685	-0.30154	-0.19141	-0.01090	-0.06595	-0.02776
CAMax_3	-0.00500	-0.02019	-0.04412	-0.20624	0.13073	-0.08610	-0.17357	-0.36619	-0.32436	-0.12824	-0.06046	0.02843
CAMax_4	-0.06146	0.06233	0.06960	-0.21481	0.08436	-0.08251	-0.17262	-0.34493	-0.15365	0.01059	-0.01827	-0.02959
CAMax_5	0.01687	0.17189	0.03074	-0.17465	0.00923	-0.10702	-0.23523	-0.46305	-0.34660	-0.04957	-0.06955	-0.03835
CORRELAZIONE TRA DENSITÀ DI VASI E TEMPERATURA MEDIA 1931-2017												
	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre
DENSITY	-0.13875	-0.02298	-0.03848	0.09348	-0.12723	0.08235	0.18462	0.23173	0.21142	0.05866	0.05367	0.04342
CORRELAZIONE TRA NUMERO DI VASI E TEMPERATURA MEDIA 1931-2017												
	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre
NUM	-0.01672	0.07760	0.00879	-0.13096	0.09191	0.08724	-0.01988	-0.14700	-0.07213	-0.06700	-0.05337	0.03481

Tabella 1. Correlazione tra la temperatura media e le 4 variabili anatomiche (CA50 per settori, CAMax per settori, DENSITY, NUM) nel periodo 1931-2017. Le caselle evidenziate in giallo sono quelle aventi un coefficiente di correlazione maggiore o uguale a 0.211, e perciò indicanti una correlazione tra le due variabili.

Sempre rispetto al lasso temporale 1931-2017, la Tab.2 riporta i coefficienti di correlazione relativi all'analisi della possibile associazione tra le precipitazioni totali nei 12 mesi e le 4 variabili anatomiche (CA50 per settori, CAMax per settori, DENSITY, NUM).

Nel caso di CA50 e CAMax, si nota una correlazione positiva nei mesi di luglio e agosto, ma solamente nei settori terminali dell'anello. Dove è significativa, questa correlazione positiva indica che all'aumento delle precipitazioni totali è associato un aumento anche della CA50 e della CAMax.

Lo stesso non si può dire rispetto alla densità di vasi per anello e al numero di vasi per anello, poiché le analisi non hanno portato a nessun valore di correlazione significativo.

CORRELAZIONE TRA CA50 E PRECIPITAZIONI TOTALI 1931-2017												
	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre
CA50_1	0.04591	0.03411	-0.06137	0.17779	0.03239	0.20499	0.11502	0.11115	0.08994	-0.20668	0.01846	-0.01493
CA50_2	-0.04589	-0.05643	0.00706	0.27341	-0.08617	0.04805	0.20764	0.13783	0.19719	-0.14963	0.01986	0.06508
CA50_3	-0.02020	-0.12573	0.01616	0.15893	-0.02953	0.14471	0.15919	0.21374	0.17549	-0.26943	0.02625	0.10090
CA50_4	-0.08511	-0.09925	0.05264	0.19211	-0.02963	0.08937	0.31158	0.25796	0.15051	-0.08829	0.01021	0.02868
CA50_5	0.03568	-0.07100	0.03283	0.12102	-0.09741	-0.00958	0.29722	0.21680	0.08530	-0.05187	0.07555	0.07059
CORRELAZIONE TRA CAMax E PRECIPITAZIONI TOTALI 1931-2017												
	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre
CAMax_1	0.09352	0.03919	-0.06990	0.10496	0.01238	0.19080	0.18132	0.14766	0.14715	-0.21607	-0.09537	-0.00665
CAMax_2	-0.01642	0.02103	0.02614	0.13052	-0.02381	0.09634	0.20772	0.19662	0.09945	-0.13890	-0.04786	0.04986
CAMax_3	-0.06729	-0.01602	0.04423	0.10031	-0.06834	0.10191	0.24265	0.20133	0.20324	-0.16309	0.00553	0.12408
CAMax_4	-0.01646	-0.08625	0.08255	0.17649	-0.03832	0.10607	0.22548	0.21384	0.09765	-0.12406	-0.00811	0.05030
CAMax_5	-0.04275	-0.07254	0.05592	0.04958	-0.05083	0.09020	0.32445	0.33805	0.16882	-0.05360	0.06760	0.06756
CORRELAZIONE TRA DENSITÀ DI VASI E PRECIPITAZIONI TOTALI 1931-2017												
	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre
DENSITY	0.00962	-0.06218	-0.04378	-0.07930	0.01131	-0.16338	-0.19835	-0.12998	-0.12814	0.11855	-0.00943	0.00056
CORRELAZIONE TRA NUMERO DI VASI E PRECIPITAZIONI TOTALI 1931-2017												
	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre
NUM	0.03070	0.01391	0.07583	0.06672	-0.02462	-0.04230	0.11203	0.08640	0.11119	-0.06777	0.01554	0.14027

Tabella 2. Correlazione tra le precipitazioni totali e le 4 variabili anatomiche (CA50 per settori, CAMax per settori, DENSITY, NUM) nel periodo 1931-2017. Le caselle evidenziate in giallo sono quelle aventi un coefficiente di correlazione maggiore o uguale a 0.211, e perciò indicanti una correlazione tra le due variabili.

Il periodo temporale 1955-2017, analizzato in modo da escludere l'anno 1952 il quale, essendo un anno caratteristico molto sottile, poteva avere un peso molto elevato nella statistica, ha restituito risultati differenti.

La tabella riportante i coefficienti di correlazione risultanti dall'analisi della possibile associazione tra la temperatura media nei 12 mesi e le 4 variabili anatomiche (CA50 per settori, CAMax per settori, DENSITY, NUM) nella fascia temporale 1955-2017 (Tab.3), evidenzia meno correlazioni rispetto al precedente lasso temporale.

Riguardo alla CA50 e alla CAMax, agosto è il mese in cui, secondo i coefficienti di correlazione, esiste una maggiore correlazione negativa tra queste due variabili e la temperatura media. Ci sono poi altri mesi in cui, in qualche settore, si riscontra una leggera associazione tra queste variabili.

Nel caso della densità di vasi per anello, si riscontra una correlazione negativa nel mese di gennaio.

Rispetto al numero di vasi per anello, anche in questo caso, non si riscontra nessuna correlazione con la temperatura media.

CORRELAZIONE TRA CA50 E TEMPERATURA MEDIA 1955-2017												
	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre
CA50_1	0.10775	0.04081	0.04910	-0.17078	-0.13065	0.03632	0.03192	-0.03297	0.03768	-0.00750	-0.03315	-0.06818
CA50_2	0.24575	-0.06742	-0.01165	-0.25121	0.15588	0.10871	-0.01598	-0.10381	0.01996	0.04193	0.01068	0.09994
CA50_3	0.22804	0.09604	0.01390	-0.17283	0.10891	-0.14203	-0.08250	-0.25764	-0.15734	-0.03380	-0.16706	0.04383
CA50_4	0.07403	0.25359	0.03995	-0.16531	0.02429	-0.02218	-0.05384	-0.37062	-0.07633	-0.05307	-0.15677	-0.04138
CA50_5	0.11165	0.19270	0.03523	-0.16239	0.05186	0.01852	-0.11528	-0.24480	-0.01326	0.01441	-0.04480	0.00057
CORRELAZIONE TRA CAMax E TEMPERATURA MEDIA 1955-2017												
	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre
CAMax_1	0.05357	0.07383	-0.11688	-0.14682	0.15397	0.04712	-0.16003	-0.12141	-0.06021	-0.06970	-0.05342	-0.02272
CAMax_2	0.25374	0.06829	0.07098	-0.06433	0.07693	-0.01010	-0.14680	-0.17198	-0.00369	-0.00256	-0.09916	0.03770
CAMax_3	0.13986	0.00893	-0.09816	-0.21784	0.16817	-0.02138	-0.08764	-0.26789	-0.25140	-0.19621	-0.08032	0.14847
CAMax_4	0.02860	0.19252	0.07723	-0.21487	0.12042	0.01858	-0.10463	-0.21403	0.00956	0.06044	-0.09090	0.07429
CAMax_5	0.14082	0.21452	0.01721	-0.15905	0.07656	-0.03914	-0.14848	-0.36004	-0.17374	-0.04108	-0.12577	0.01572
CORRELAZIONE TRA DENSITÀ DI VASI E TEMPERATURA MEDIA 1955-2017												
	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre
DENSITY	-0.32928	-0.07026	0.03167	0.10330	-0.07736	0.02467	0.13373	0.12933	0.05745	0.06236	0.06226	0.04902
CORRELAZIONE TRA NUMERO DI VASI E TEMPERATURA MEDIA 1955-2017												
	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre
NUM	0.08251	0.10655	-0.11251	-0.14788	0.07285	0.11655	-0.01909	-0.11587	0.02226	-0.06411	-0.09636	0.03486

Tabella 3. Correlazione tra la temperatura media e le 4 variabili anatomiche (CA50 per settori, CAMax per settori, DENSITY, NUM) nel periodo 1955-2017. Le caselle evidenziate in azzurro sono quelle aventi un coefficiente di correlazione maggiore o uguale a 0.248, e perciò indicanti una correlazione tra le due variabili.

Infine, la Tab.4 riporta i coefficienti di correlazione derivanti dall'analisi della possibile associazione tra le precipitazioni totali nei 12 mesi e le 4 variabili anatomiche (CA50 per settori, CAMax per settori, DENSITY, NUM) nel periodo temporale 1955-2017.

I risultati ci indicano una scarsa associazione tra le variabili anatomiche e le precipitazioni totali in questo periodo. Infatti, gli unici valori dei coefficienti di correlazione significativi riguardano la CA50 nel settore 4 nel mese di agosto e la CAMax nel settore 5 nel mese di agosto e nel settore 3 nel mese di dicembre, mentre per la densità di vasi ad anello ed il numero di vasi ad anello non si riscontrano valori significativi.

CORRELAZIONE TRA CA50 E PRECIPITAZIONI TOTALI 1955-2017												
	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre
CA50_1	-0.01676	-0.00628	-0.01728	0.05398	0.13021	0.18300	0.04130	0.07804	0.02014	-0.07870	0.15339	0.11506
CA50_2	-0.06249	-0.06991	0.06518	0.24799	-0.13611	0.07188	0.06437	0.09677	0.09764	-0.03193	0.10652	0.21987
CA50_3	-0.07883	-0.16121	0.05072	0.08761	-0.07447	0.19331	0.04555	0.22423	0.13436	-0.14001	0.11447	0.22573
CA50_4	-0.09818	-0.13830	0.15078	0.06915	-0.03704	0.05347	0.23924	0.26269	0.09527	0.04466	0.13132	0.15185
CA50_5	-0.02349	-0.10586	0.09861	0.04559	-0.08031	0.00865	0.22980	0.20404	0.02003	0.06903	0.14591	0.14928
CORRELAZIONE TRA CAMax E PRECIPITAZIONI TOTALI 1955-2017												
	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre
CAMax_1	0.09222	0.09727	0.01802	-0.03793	-0.02094	0.21601	0.10933	0.10974	0.05007	-0.09367	-0.01171	0.11866
CAMax_2	-0.00763	0.02992	0.14736	-0.04156	-0.01982	0.13443	0.09787	0.15198	0.00372	-0.03905	0.05909	0.24556
CAMax_3	-0.11608	-0.02495	0.10437	-0.00406	-0.08322	0.09924	0.17254	0.17595	0.17241	-0.00005	0.07692	0.27980
CAMax_4	0.00823	-0.15286	0.21422	0.08437	-0.05139	0.07279	0.13493	0.22716	0.02087	-0.00474	0.07856	0.15680
CAMax_5	-0.05875	-0.10722	0.14328	-0.09009	-0.04485	0.11826	0.21791	0.34937	0.08449	0.04583	0.18194	0.18839
CORRELAZIONE TRA DENSITÀ DI VASI E PRECIPITAZIONI TOTALI 1955-2017												
	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre
DENSITY	0.00968	-0.11195	-0.14059	-0.00544	0.00491	-0.19742	-0.11384	-0.14011	-0.04658	-0.03971	-0.10210	-0.14898
CORRELAZIONE TRA NUMERO DI VASI E PRECIPITAZIONI TOTALI 1955-2017												
	Gennaio	Febbraio	Marzo	Aprile	Maggio	Giugno	Luglio	Agosto	Settembre	Ottobre	Novembre	Dicembre
NUM	0.02809	0.06371	0.14983	-0.00771	-0.01951	-0.00081	0.06084	0.10173	0.05045	0.05475	0.09924	0.19880

Tabella 4. Correlazione tra le precipitazioni totali e le 4 variabili anatomiche (CA50 per settori, CAMax per settori, DENSITY, NUM) nel periodo 1955-2017. Le caselle evidenziate in azzurro sono quelle aventi un coefficiente di correlazione maggiore o uguale a 0.248, e perciò indicanti una correlazione tra le due variabili.

4. DISCUSSIONI

4.1 Caratteristiche anatomiche

Le analisi relative all'anatomia delle 4 piante riportano una grande variabilità delle caratteristiche anatomiche di anno in anno e di pianta in pianta. Questo può essere riconducibile al fatto che le piante oggetto del nostro studio vivono in un ambiente con numerosi fattori limitanti, e di conseguenza adottano differenti risposte alle variazioni delle condizioni climatiche.

Un aspetto interessante è dato dalle dimensioni dei vasi nelle diverse parti dell'anello. Infatti, nella *Fig.5* si vede come, nel settore 5, la CAMax tenda ad essere inferiore rispetto agli altri settori, così come nella *Fig.6* la CA50 risulti nettamente inferiore nel settore 5 rispetto agli altri settori dell'anello.

Lo stesso si nota nella *Fig.10*, dove è chiaro come la dimensione dei vasi nella parte terminale dell'anello sia di molto inferiore rispetto alla parte antecedente.

Questo andamento è stato spiegato da Aloni (1991), il quale ha indicato come, nelle specie a porosità diffusa, la continua produzione di vasi durante la stagione vegetativa sia dovuta allo sviluppo delle giovani foglie come principale fonte di auxina, la quale stimola la produzione di vasi. Verso la fine della stagione vegetativa, quando le ultime foglie formate diventano mature, c'è una diminuzione del livello di auxina, associato ad un aumento del livello di giberelline. Queste condizioni provocano la formazione di vasi con dimensioni inferiori.

Un altro aspetto interessante è dato dal fatto che, come si evince confrontando la *Fig.7* (TRW) con la *Fig.8* (DENSITY), la densità di vasi per anello tende ad aumentare al diminuire dell'ampiezza dell'anello.

Per affermare questa relazione inversa è stato svolto un test di correlazione tra l'ampiezza di ogni anello e la corrispettiva densità di vasi.

Il test ha restituito un coefficiente di correlazione pari a -0.638, confermando una forte associazione tra le due variabili.

Questo aumento della densità dei vasi man mano che gli anelli si fanno più sottili, riscontrato in diversi studi (Eilmann *et al*, 2014; Oladi *et al*, 2014; Diaconu *et al*, 2016; Arnič *et al*, 2021), può essere spiegato analizzando il comportamento della pianta dal punto di vista idraulico.

Il faggio, infatti, può regolare le prestazioni idrauliche cambiando diversi parametri dei vasi, tra cui la densità di questi ultimi (Hacke *et al*, 2017).

Dal momento in cui l'anello risulta essere meno ampio rispetto agli anni precedenti, la pianta reagisce con la formazione di più vasi per unità di area, in modo da mantenere comunque delle prestazioni idrauliche atte a consentire il corretto trasferimento della linfa.

Rispetto al numero di vasi per anello, non è stato possibile ricavare informazioni utili.

Questo perché il numero di vasi per anello è strettamente collegato all'ampiezza dell'anello, ed è perciò impossibile utilizzarlo come parametro di paragone tra anelli con ampiezza differente, soprattutto quando si ha a disposizione la densità, la quale restituisce valori con la stessa unità di misura, e perciò confrontabili.

Un'altra osservazione importante sta nella grande differenza di crescita dell'anello tra i diversi individui nei diversi anni (*Fig. 7*). Sono, infatti, pochi gli anni in cui l'andamento della crescita dell'anello è simile tra le varie piante, e questo rende più difficile la ricerca di anni caratteristici, utili per l'analisi dell'influenza climatica sull'anatomia del legno.

4.2 Correlazioni tra cronologie di anatomia del legno e variabili climatiche

Riguardo alle analisi sulle correlazioni tra le variabili anatomiche e le variabili climatiche, i risultati sono stati molteplici.

L'analisi è stata svolta su due diversi periodi temporali:

- Periodo 1931-2017: considera tutti gli anni in cui si hanno informazioni riguardanti tutte e 4 le piante
- Periodo 1955-2017: lasso temporale scelto per evitare di considerare nelle analisi l'anno 1952, e vedere eventuali differenze rispetto alla fascia temporale 1931-2017.

I risultati tra i due periodi sono stati simili ma le correlazioni sono risultate più significative nel periodo 1931-2017, ovvero nel periodo che tiene in considerazione anche l'anno 1952. Questo significa che l'anno 1952 ha un peso elevato nella statistica, avendo una forte influenza sulla correlazione con le variabili climatiche.

Pertanto, nelle seguenti discussioni i risultati saranno commentati facendo riferimento al periodo 1931-2017, consapevoli però dell'elevato peso che l'anno 1952 ha sulle correlazioni.

La correlazione negativa tra CAMax e CA50 e la temperatura media nei mesi di agosto e settembre lascia diversi interrogativi (*Tab.1*).

La correlazione negativa tra la temperatura media e le dimensioni dei vasi è stata riscontrata anche in precedenti studi (Sass & Eckstein, 1995; Miranda *et al*, 2022), ma in periodi dell'anno differenti. In questi studi, la correlazione è stata trovata nei mesi iniziali della stagione vegetativa, al contrario del presente studio, dove la correlazione è stata trovata a fine estate.

La difficoltà nell'interpretazione di questi risultati sta nel fatto che, secondo Martinez del Castillo *et al*, 2018, la formazione dello xilema nel faggio ha un picco tra maggio e giugno, e finisce al massimo a fine agosto.

Lo stesso studio precisa però che la formazione dello xilema varia enormemente in base al sito, all'età della pianta, e che è strettamente correlato con il clima.

Nonostante questa precisazione, risulta difficile immaginare che la formazione dello xilema si sia spinta fino a settembre, ma non si può nemmeno escludere a priori, non avendo dati sulla xilogenesi di questo sito.

Un altro interrogativo sta nel fatto che tutte le correlazioni ricadano negli stessi mesi, quando invece, avendo fatto le analisi per settori, si dovrebbe vedere un andamento scalare in relazione al mese di crescita dei vasi in ogni settore.

In ogni caso, non è stato possibile trovare un'interpretazione adeguata a questi risultati, lasciando spazio a futuri studi per capire se si è trattato solamente di un caso isolato o di un aspetto non ancora descritto.

Gli stessi interrogativi ricadono anche nella correlazione positiva riscontrata tra la DENSITY e la temperatura media nei mesi di agosto e settembre (*Tab.1*).

Più significativi sono invece i risultati ottenuti dall'analisi della correlazione tra le variabili anatomiche e le precipitazioni totali.

Infatti, la correlazione positiva riscontrata tra CAMax e CA50 e le precipitazioni totali nei mesi di luglio e agosto (*Tab.2*) corrisponde ai risultati di altri studi (Sass & Eckstein, 1995; Miranda *et al*, 2022; Olano *et al*, 2022).

La correlazione interessa solamente gli ultimi settori dell'anello, ovvero quelli che si sono sviluppati durante quel periodo dell'anno (luglio e agosto). Anche in questo caso, lo sviluppo dei vasi tende ad essere leggermente tardivo rispetto alla normale xilogenesi del faggio, ma rientra dentro i limiti possibili, facendo così ipotizzare uno sviluppo tardivo dello xilema nelle piante del sito di analisi.

Il fatto che questa correlazione positiva si riscontri solamente nei settori terminali dell'anello e non in quelli iniziali rafforza la tesi di Pourtahmasi, secondo cui le condizioni climatiche hanno un'influenza maggiore sull'attività cambiale nella seconda parte dell'anello, mentre nella prima parte prevalgono i fattori interni (Pourtahmasi *et al*, 2011).

4.3 Anni caratteristici

Relativamente ai due anni caratteristici riscontrati (1952 e 2004), i motivi che possono aver portato ad avere un accrescimento dell'anello così ridotto in tutte le piante possono essere diversi.

Nel caso del 1952, i motivi del ridotto accrescimento dell'anello sono, molto probabilmente, riconducibile a due fattori climatici. Il primo è la forte siccità avvenuta in quell'anno nei mesi di luglio, agosto (e anche settembre), ovvero i mesi nei quali avviene buona parte dell'accrescimento dell'anello, durante i quali non ci sono state precipitazioni. Questo evento anormale, in una zona abituata a costanti precipitazioni, è stato probabilmente un fattore chiave, considerando la grande sensibilità del faggio agli eventi siccitosi (Leuschner, 2020).

Il secondo fattore sono le temperature massime giornaliere avute quell'anno nel mese di maggio, durante il quale ha inizio l'accrescimento dell'anello.

Infatti, le temperature massime giornaliere hanno subito delle forti fluttuazioni, passando da un periodo particolarmente caldo, con un picco di 22.5 °C, ad un periodo particolarmente freddo, con un picco di 6.6 °C, nel giro di pochi giorni, e rimanendo molto basse per diversi giorni in un periodo fondamentale per lo sviluppo dell'anello.

L'influenza di questi due fattori, che hanno agito in due periodi differenti, ha fatto in modo che nell'anno 1952 ci fosse un accrescimento dell'anello decisamente ridotto in tutte le piante analizzate.

Rispetto all'anno 2004, invece, il motivo è meno chiaro. L'unico fattore anormale riscontrato è una riduzione generale delle temperature massime giornaliere del mese di maggio. Al contrario del 1952 non ci sono forti fluttuazioni, ma solamente delle temperature massime giornaliere inferiori rispetto agli anni precedenti.

In aggiunta a questo, una possibilità è che possa essersi verificata un'annata di pasciona, ovvero un'annata in cui la fruttificazione è molto abbondante, particolarmente intensa.

Il faggio è, infatti, una specie famosa per questa caratteristica, ed è stato dimostrato che durante le annate di pasciona si è soliti registrare delle riduzioni degli accrescimenti delle piante (Dittmar *et al*, 2006), poiché le risorse vengono utilizzate prevalentemente per la produzione di frutti. Come già precisato, il fatto che l'accrescimento ridotto del 2004 possa essere correlato ad un'annata di pasciona non può essere verificato in questa tesi in quanto non sono disponibili informazioni sulle annate di pasciona nel sito.

Sempre riguardo a questi due anni caratteristici, sono interessanti i risultati riguardanti le dimensioni dei vasi negli anni caratteristici rispetto ai tre anni precedenti.

Nella *Fig.11*, rappresentante la dimensione del lume dei vasi in percentuale di distanza dall'inizio dell'anello per gli anni 1949, 1950, 1951 e 1952, è evidente come la dimensione dei vasi dell'anno 1952 sia di molto inferiore in tutte le zone dell'anello.

Questo risultato è coerente con le aspettative, dal momento che il faggio diminuisce le dimensioni dei suoi vasi in risposta agli eventi siccitosi (Rodríguez-Ramírez *et al*, 2019).

Invece, nella *Fig.12*, che rappresenta la dimensione del lume dei vasi in percentuale di distanza dall'inizio dell'anello per gli anni 2001, 2002, 2003 e 2004, la dimensione dei vasi nell'anno 2004 non si discosta di molto da quella dei 3 anni precedenti.

Nell'anno 2004 si nota comunque una piccola differenza rispetto ai 3 anni precedenti nella parte centrale dell'anello, ma non sufficientemente elevata da essere considerata significativa.

È interessante notare come in entrambi gli anni caratteristici, contraddistinti dall'aver un'ampiezza dell'anello inferiore rispetto alla media, siano state riscontrate delle temperature massime giornaliere anomale nel mese di maggio. È altrettanto interessante il fatto che, nonostante entrambi gli anni abbiano avuto un accrescimento ridotto dell'anello, solamente nell'anno 1952, caratterizzato da una forte siccità estiva, la dimensione dei vasi sia inferiore rispetto a quella degli anni precedenti.

Questi risultati fanno ipotizzare che le due variabili anatomiche (ampiezza dell'anello e dimensione dei vasi) siano influenzate ciascuna da un diverso fattore climatico, ovvero che le temperature massime giornaliere nel mese di maggio influenzino l'ampiezza dell'anello, mentre le precipitazioni estive siano correlate con la dimensione dei vasi.

Il fatto che le precipitazioni estive possano essere correlate con la dimensione dei vasi è stato riscontrato nelle correlazioni effettuate in questo studio (capitolo 4.2), nonostante le correlazioni restituiscano un risultato significativo solamente negli ultimi settori dell'anello, mentre dalla *Fig. 11* appare evidente che anche i vasi nei primi settori siano decisamente più piccoli. In questo caso sorge l'interrogativo su quale possa essere il motivo riconducibile alle dimensioni inferiori dei vasi nei primi settori, tenendo però in considerazione che la *Fig. 11* può trattarsi di un caso isolato, mentre le correlazioni sono state effettuate su un numero molto più elevato di campioni e sono perciò più attendibili. Rispetto alla possibile correlazione tra le temperature massime giornaliere nel mese di maggio e l'ampiezza dell'anello non è stato possibile verificare l'ipotesi per una mancanza di dati utili, ma si invitano successivi studi all'approfondimento di questo particolare.

5. CONCLUSIONI

L'analisi dell'anatomia del legno di faggio proveniente dai Balcani Centrali ha rimarcato diversi aspetti interessanti.

Lo studio evidenzia che, benchè il faggio sia una specie a porosità diffusa, la dimensione massima dei vasi (CAMax) e la dimensione mediana dei vasi (CA50) tendono a diminuire notevolmente nella parte terminale dell'anello, e che, in generale, la dimensione di tutti i vasi decresce bruscamente nell'ultima porzione dell'anello.

È stata dimostrata la relazione inversa tra l'ampiezza dell'anello (TRW) e la densità di vasi per anello (DENSITY), ovvero il fatto che al diminuire dell'ampiezza dell'anello corrisponde un aumento della densità di vasi. Questo meccanismo viene adottato dalla pianta per riuscire a mantenere delle prestazioni idrauliche atte a consentire il corretto trasferimento della linfa anche nelle annate in cui l'ampiezza dell'anello risulta inferiore rispetto alla media.

Riguardo alle correlazioni con le variabili climatiche, è stata riscontrata una correlazione negativa tra le dimensioni dei vasi e la temperatura media nei mesi di agosto e settembre, lasciando diversi interrogativi per via del periodo inoltrato e per la correlazione di tutti i settori nello stesso periodo. Gli stessi interrogativi sono emersi nella correlazione positiva individuata tra la densità di vasi per anello e la temperatura media nei mesi di agosto e settembre. È stata, infine, riscontrata una correlazione positiva tra CAMax e CA50 e le precipitazioni totali nei mesi di luglio e agosto, in particolare nei settori 3, 4 e 5 dell'anello.

In merito agli anni caratteristici (1952 e 2004), ovvero gli anni contraddistinti dall'aver una ridotta ampiezza dell'anello in tutte e 4 le piante, è stato ipotizzato che le temperature massime giornaliere nel mese di maggio possano avere una forte influenza sull'accrescimento dell'anello, ma non è stato possibile approfondire e verificare tale ipotesi.

In conclusione, si può confermare la complessità dell'associazione tra le variabili anatomiche e quelle climatiche osservata in precedenti studi sul faggio. Per questo motivo, il presente studio sollecita affinché ci sia un maggiore approfondimento sull'influenza che le variabili climatiche hanno sull'anatomia del legno di faggio, considerando il ruolo chiave che questa specie ricopre nell'ecologia delle foreste europee.

6. BIBLIOGRAFIA

Aloni, R. (1991). Wood formation in deciduous hardwood trees. In *Physiology of trees.*, 175-197.

Anfodillo, T., Petit, G., & Crivellaro, A. (2013). Axial conduit widening in woody species: a still neglected anatomical pattern. In *Wood structure in plant biology and ecology* (pp. 24-36). Brill.

Arnič, D., Gričar, J., Jevšenak, J., Božič, G., von Arx, G., & Prislan, P. (2021). Different wood anatomical and growth responses in European beech (*Fagus sylvatica* L.) at three forest sites in Slovenia. *Frontiers in plant science*, 12, 669229.

Biondi, F., & Qeadan, F. (2008). A theory-driven approach to tree-ring standardization: defining the biological trend from expected basal area increment. *Tree-Ring Research*, 64(2), 81-96.

Bunn, A. G. (2008). A dendrochronology program library in R (dplR). *Dendrochronologia*, 26(2), 115-124.

Castagneri, D., Fonti, P., von Arx, G., & Carrer, M. (2017). How does climate influence xylem morphogenesis over the growing season? Insights from long-term intra-ring anatomy in *Picea abies*. *Annals of botany*, 119(6), 1011-1020.

De Micco, V., Carrer, M., Rathgeber, C. B., Camarero, J. J., Voltas, J., Cherubini, P., & Battipaglia, G. (2019). From xylogenesis to tree rings: wood traits to investigate tree response to environmental changes. *IAWA journal*, 40(2), 155-182.

De Vivo, G. (2018). La faggeta vetusta di Cozzo Ferriero patrimonio mondiale dell'umanità UNESCO.

Diaconu, D., Stangler, D. F., Kahle, H. P., & Spiecker, H. (2016). Vessel plasticity of European beech in response to thinning and aspect. *Tree Physiology*, *36*(10), 1260-1271.

Dittmar, C., Fricke, W., & Elling, W. (2006). 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.

Eilmann, B., Sterck, F., Wegner, L., de Vries, S. M., Von Arx, G., Mohren, G. M., ... & Sass-Klaassen, U. (2014). Wood structural differences between northern and southern beech provenances growing at a moderate site. *Tree physiology*, *34*(8), 882-893.

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

Hacke, U. G., Spicer, R., Schreiber, S. G., & Plavcová, L. (2017). An ecophysiological and developmental perspective on variation in vessel diameter. *Plant, cell & environment*, *40*(6), 831-845.

IPCC, 2022: Summary for Policymakers [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Tignor, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem (eds.)]. In: *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 3–33, doi:10.1017/9781009325844.001.

Leuschner, C. (2020). Drought response of European beech (*Fagus sylvatica* L.)—A review. *Perspectives in Plant Ecology, Evolution and Systematics*, *47*, 125576.

- Magri, D. (2008). Patterns of post-glacial spread and the extent of glacial refugia of European beech (*Fagus sylvatica*). *Journal of Biogeography*, 35(3), 450-463.
- Martinez del Castillo, E., Prislan, P., Gričar, J., Gryc, V., Merela, M., Giagli, K., ... & Čufar, K. (2018). Challenges for growth of beech and co-occurring conifers in a changing climate context. *Dendrochronologia*, 52, 1-10.
- Martinez del Castillo, E., Zang, C. S., Buras, A., Hacket-Pain, A., Esper, J., Serrano-Notivoli, R., ... & de Luis, M. (2022). Climate-change-driven growth decline of European beech forests. *Communications Biology*, 5(1), 163.
- Miranda, J. C., Calderaro, C., Coccozza, C., Lasserre, B., Tognetti, R., & von Arx, G. (2022). Wood anatomical responses of European beech to elevation, land use change, and climate variability in the Central Apennines, Italy. *Frontiers in Plant Science*, 13, 855741.
- Oladi, R., Bräuning, A., & Pourtahmasi, K. (2014). “Plastic” and “static” behavior of vessel-anatomical features in Oriental beech (*Fagus orientalis* Lipsky) in view of xylem hydraulic conductivity. *Trees*, 28, 493-502.
- Olano, J. M., Hernández-Alonso, H., Sangüesa-Barreda, G., Rozas, V., García-Cervigón, A. I., & Garcia-Hidalgo, M. (2022). Disparate response to water limitation for vessel area and secondary growth along *Fagus sylvatica* southwestern distribution range. *Agricultural and Forest Meteorology*, 323, 109082.
- Pourtahmasi, K., Lotfiomran, N., Bräuning, A., & Parsapajouh, D. (2011). Tree-ring width and vessel characteristics of oriental beech (*Fagus orientalis*) along an altitudinal gradient in the Caspian forests, northern Iran. *IAWA journal*, 32(4), 461-473.
- Rodríguez-Ramírez, E. C., Terrazas, T., & Luna-Vega, I. (2019). The influence of climate on the masting behavior of Mexican beech: growth rings and xylem anatomy. *Trees*, 33, 23-35.

Sass, U., & Eckstein, D. (1995). The variability of vessel size in beech (*Fagus sylvatica* L.) and its ecophysiological interpretation. *Trees*, 9, 247-252.

Tinner, W., & Lotter, A. F. (2006). Holocene expansions of *Fagus sylvatica* and *Abies alba* in Central Europe: where are we after eight decades of debate?. *Quaternary Science Reviews*, 25(5-6), 526-549.

Von Arx, G., & Carrer, M. (2014). ROXAS—A new tool to build centuries-long tracheid-lumen chronologies in conifers. *Dendrochronologia*, 32(3), 290-293.

Von Arx, G., Crivellaro, A., Prendin, A. L., Čufar, K., & Carrer, M. (2016). Quantitative wood anatomy—practical guidelines. *Frontiers in plant science*, 7, 781.