



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI MILANO
FACOLTÀ DI SCIENZE AGRARIE E ALIMENTARI

CORSO DI LAUREA IN
VALORIZZAZIONE E TUTELA DELL'AMBIENTE E DEL
TERRITORIO MONTANO

RELAZIONI CLIMA - ACCRESCIMENTO NEL FAGGIO
(FAGUS SYLVATICA) IN LOCALITÀ ASTRIO (BS)

Relatore: prof. Giorgio Vacchiano

Elaborato finale di: Taboni Eleonora

Matricola: 897171

Anno accademico 2019-2020

INDICE

Riassunto.....	4
Capitolo 1 - Introduzione: Clima e cambiamento climatico.....	5
1.1 - Effetto serra e gas serra.....	7
1.2 - Cosa è la dendrocronologia.....	13
1.3 - Anelli di accrescimento.....	15
1.4 - Piante utilizzate nella dendrocronologia.....	17
1.5 - Studi dendrocronologici sull'utilizzo del faggio.....	18
Capitolo 2 - Obbiettivi del lavoro.....	21
Capitolo 3 - Materiali e metodi.....	22
3.1 - La specie studiata: <i>Fagus sylvatica</i>	22
3.2 - Luogo di campionamento.....	25
3.3 - Dati climatici.....	28
3.4 - Rilievi in campo.....	30
3.5 - Preparazione campioni.....	32
3.6 - Programmi utilizzati.....	33
Capitolo 4 - Risultati	38
Capitolo 5 - Discussioni.....	43
Capitolo 6 - Conclusioni.....	49
Capitolo 7 - Sitografia.....	51
Capitolo 8 - Bibliografia.....	52
Ringraziamenti.....	55

Riassunto

Il cambiamento climatico è oramai diventato un dato di fatto e una delle principali conseguenze che ne derivano è il riscaldamento globale che sta investendo la terra da diversi anni. Questo tipo di problema causa numerosi effetti negativi al pianeta come, ad esempio, l'innalzamento delle temperature medie e l'aumento di fenomeni estremi, e numerosi studi sostengono che questo cambiamento climatico vada ad influenzare la crescita delle piante trovando riscontri concreti nei loro anelli di accrescimento. Il lavoro che è stato svolto ha l'intento di scorgere qualche analogia tra il cambiamento climatico e l'accrescimento di una specie in particolare, il faggio (*Fagus sylvatica*) come pianta di riferimento in quanto albero di primaria importanza nei monti alpini e anche in quelli appenninici e ottimo indicatore di periodi di siccità. L'area d'interesse che è stata selezionata è una frazione del comune di Breno, Astrio, a 794 metri di altitudine dove sono stati selezionati quindici esemplari di faggio aventi un diametro superiore ai 40 cm. Tramite una sonda incrementale, il succhiello di Pressler, sono state estratte due carote legnose per ogni pianta, sono state preparate appositamente per l'analisi dendrocronologica, scannerizzate e poi esaminate grazie all'utilizzo dei programmi Cdendro, CooRecorder e R.

Le correlazioni trovate sono solo negative e riguardano le precipitazioni di gennaio e le temperature di settembre e di dicembre.

Delle funzioni di risposte rilevate quelle positive sono state solamente due, le precipitazioni di giugno e le temperature di agosto e sono altrettante quelle negative che sono state le precipitazioni agosto e le temperature di giugno.

I risultati hanno mostrato che solo le risposte di finestre mobili hanno evidenziato una tendenza con giugno e con agosto ma non è stata provata significativa statisticamente; il numero abbastanza scarso di correlazioni non riesce a indicare una tendenza consistente tra il cambiamento climatico e l'accrescimento secondario del faggio: questo potrebbe essere da causato da errori nelle analisi, dall'età troppo giovanile degli alberi o, molto più probabilmente, dal fatto che i faggi non si trovassero in una condizione estrema ma in una condizione che ne agevola la crescita.

Il cambiamento climatico resta comunque un rischio per questa specie: le temperature sempre più elevate spostano i limiti superiori più in alto e il faggio potrebbe ritrovarsi a cambiare habitat a causa delle nuove specie predominanti.

Capitolo 1 - Introduzione: Clima e cambiamento climatico

Cambiamento climatico: se ne sente parlare ormai ovunque sotto le diverse sfaccettature quali riscaldamento globale, *global warming*, *climate change*. Fondamentalmente il cambiamento climatico è un fenomeno del clima che consiste nell'aumento della temperatura media della terra [1] e delle più frequenti condizioni di situazioni atmosferiche estreme e di grandi eventi improvvisi a causa della noncuranza dell'ambiente da parte dell'uomo (Alley 2012).

È noto che il clima sul pianeta è sempre stato in continuo mutamento ma l'uomo si è reso conto di questi problemi solamente a partire dal diciassettesimo secolo grazie alle quantificazioni delle grandezze meteorologiche (Orombelli 2005). Tutto questo è strettamente collegato all'effetto serra, un fenomeno completamente naturale che ha permesso la sopravvivenza sulla terra. Oggi però il pianeta ha una temperatura media notevolmente superiore facendo un rapido confronto tra il 1884, 1950 e 2019 (figura 1) e attualmente queste temperature sempre più alte stanno avendo un impatto molto grande sul mondo: la terra si sta surriscaldando molto velocemente [2]; questo innalzamento delle temperature è legato ad anni di estremi e anche legati a fattori naturali quali, ad esempio, la variazione dell'inclinazione dell'asse terrestre e dell'attività solare, eruzioni vulcaniche e l'alterazione delle correnti oceaniche; le temperature registrate sono state dei record in Europa [3].

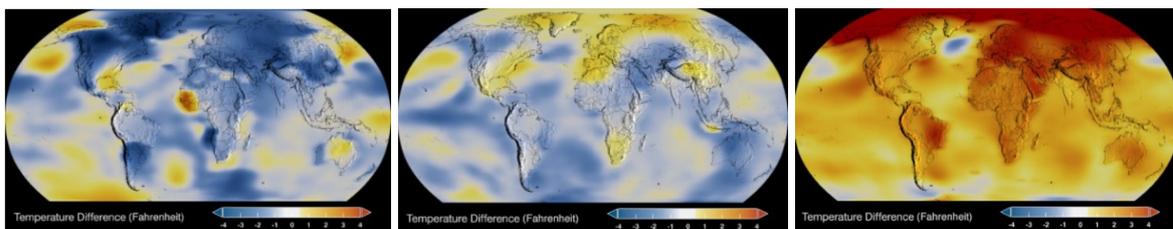


Figura 1: variazione della temperatura media negli anni in Fahrenheit: rispettivamente, da sinistra a destra, nel 1884, nel 1950 e nel 2019 (NASA).

Per far capire il problema alcuni numeri: dal 1880 al 2012 le temperature medie sono aumentate di 0.85 gradi, dal 1901 al 2012 i livelli dei mari sono aumentati di 19 cm e dal 1979 l'artico ha perso 1.07×10^6 km³ di ghiaccio per ogni decennio trascorso [4].

Nulla di ciò che è successo negli anni è paragonabile a ciò che sta succedendo ora, partendo dall'epoca industriale fino ai giorni d'oggi le azioni e le decisioni degli uomini stanno

sempre più contribuendo in maniera marcata al riscaldamento del nostro pianeta dove la temperatura media sta aumentando in maniera molto più rapida rispetto alle ultime migliaia di anni mettendo a rischio l'ambiente e gli esseri viventi che ci vivono. I cambiamenti climatici sono causati principalmente dall'attività antropica. Dal diciannovesimo secolo i combustibili fossili, come petrolio, carbone e gas naturale, hanno trasformato e travolto il modo di vivere, ma quando si è scoperto il problema che hanno causato era troppo tardi: enormi quantità di gas serra sono state rilasciate in atmosfera e di conseguenza la loro concentrazione nell'atmosfera è aumentata molto rapidamente nell'ultimo secolo (Cotana 2007). Attraverso una serie di misure dirette e grazie anche a ricostruzioni paleoclimatiche, le quali restituiscono una panoramica chiara del clima della terra in milioni di anni, si è potuto stimare le variazioni dei gas serra presenti nell'atmosfera e rilevando che il valore medio fino all'epoca preindustriale risultava essere circa 270 parti per milione [4]. Al contrario oggi tale valore ha superato quota 400 parti per milione a causa dell'attività umana e ciò significa che prima d'ora non si è mai respirata un'aria così satura di gas serra (Hashimoto 2019). La concentrazione oggi è troppo elevata e sta crescendo in modo smisurato amplificando l'effetto serra e determinando il riscaldamento globale. La temperatura si sta ancora innalzando, nonostante le varie politiche riguardanti il clima, e le stime mostrano che le temperature arriveranno a toccare oltre i 3 gradi centigradi entro la fine del secolo causando più ondate di calore mortali, siccità, incendi, intensi episodi di pioggia e alluvioni [4].

Già negli ultimi anni si sono osservati significativi cambiamenti del clima quali aumento delle temperature, aumento della variabilità meteorologica con frequenti eventi fuori stagione, rapida alternanza e incremento degli eventi estremi, aumento dei periodi caratterizzati dall'assenza di precipitazioni e la diminuzione della copertura nevosa. Questi cambiamenti hanno effetti importanti su tutto l'equilibrio della terra, dall'alterazione del ciclo idrologico e della disponibilità idrica alle modifiche degli habitat naturali in particolare in montagna e significativo risulta l'incremento dei rischi naturali connessi agli eventi di natura estrema, la scomparsa dei ghiacciai, un aumento degli incendi boschivi [3].

Dato che il clima sul pianeta terra sta cambiando e dato che è stato sempre in continuo mutamento, sono necessarie delle misurazioni il più accurate e precise possibili che possano, nel modo più meticoloso, calcolare questi cambiamenti climatici e la relazione che intercorre tra essi e la crescita delle piante, che risultano essere dei validi elementi di analisi climatica, grazie all'analisi degli anelli di accrescimento che vengono prodotti ogni anno. Il clima è

anche da definirsi uno dei principali fattori che esercita un controllo significativo sulla crescita delle piante e riguardo la loro distribuzione determinando le diverse fasce di vegetazione (Pignatti 2011). I dati che sono stati ricavati dalle diverse analisi climatiche che hanno mostrato il problema evidente del cambiamento climatico evocano interesse e allarme e fanno ritenere agli scienziati che sia corrente un cambiamento climatico molto marcato causato dall'attività antropica. Un modo per capire se il cambiamento climatico sia o meno una fluttuazione transitoria è lo studio della variabilità climatica del passato su lassi di tempo più lunghi avvalendosi dei così detti "archivi naturali del clima" che sono materiali geologici e paleobiologici che contengono dati riguardanti le condizioni climatiche che vigevano negli anni della loro formazione ricavabili tramite segnali istologici, geochimici e paleobiologici: questi archivi sono gli anelli di accrescimento delle piante, bande di accrescimento di coralli, varve, carote di ghiaccio (Orombelli 2005).

1.1 - Effetto serra

L'effetto serra è un fenomeno che deriva dall'aumento della percentuale dei gas serra ed è una delle cause principali del riscaldamento globale. L'effetto serra è un effetto completamente naturale che crea una temperatura ottimale e permette la vita sul nostro pianeta. Il motore principale è costituito dal sole che cede energia, è un'energia elettromagnetica i cui raggi sono costituiti da onde elettromagnetiche. Queste onde elettromagnetiche possono essere suddivise in diverse categorie ma quelle che interessano principalmente l'effetto serra sono tre: i raggi ultravioletti, la luce visibile e l'infrarosso (figura 2); queste tre categorie vengono divise in base alla loro lunghezza d'onda, λ , dove maggiore è la lunghezza d'onda minore è la sua energia e viceversa.

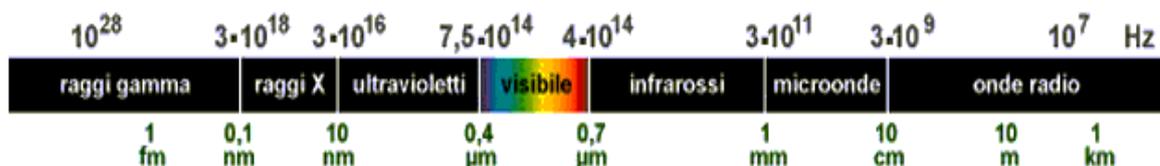


Figura 2: Spettro elettromagnetico.

I raggi ultravioletti sono molto energetici, la luce visibile meno e l'infrarosso è ancora meno energetico. Non tutte queste tipologie di onde elettromagnetiche riescono ad arrivare sulla terra, infatti quasi tutto l'ultravioletto viene schermato e fatto rimbalzare nella nostra atmosfera; luce visibile e infrarosso sono parzialmente rimbalzate. La superficie terrestre riceverà un certo quantitativo di energia che verrà dissipata, manifestata sotto forma di calore. Tuttavia, non tutta l'onda elettromagnetica viene assorbita dalla superficie terrestre ma buona parte viene fatta riflettere e rimbalza dove l'onda rimbalzata avrà un quantitativo di energia minore rispetto a quello di partenza. La luce visibile che perde energia si trasforma in infrarosso, l'infrarosso di ritorno dalla superficie terrestre non va subito nello spazio ma entra in gioco una tipologia di molecole presente in atmosfera cioè i gas serra (Mann 2002): una parte passa indisturbata verso l'atmosfera ma una parte viene assorbita cedendo energia sotto forma di calore analogamente a ciò che succedeva in prossimità della superficie terrestre; una parte viene invece fatta rimbalzare verso la terra e questa parte sarà meno energetica rispetto a quella che è arrivata. Questo "gioco di rimbalzi" (figura 3) continua, cioè la radiazione incontra la terra, una parte è assorbita e una parte rimbalza andando in atmosfera, dove una parte cede ancora energia sotto forma di calore ai gas serra e una parte è rimbalzata verso la terra; questo continuo avanti e indietro proseguirà finché l'onda non avrà perso la sua energia (Fleming *et al.* 2010).

Tutto questo determina un aumento della temperatura ma anche una stabilizzazione di quest'ultima e quindi una diminuzione delle escursioni termiche giornaliere: è indispensabile per la vita. Questo processo però può andare incontro a degli squilibri:

aumentando la percentuale di gas serra presenti in atmosfera aumenterà anche l'effetto serra da essi provocato diminuendo sempre di più la parte di onda elettromagnetica che verrà liberata nello spazio e quindi aumentando la radiazione che verrà intrappolata tra la superficie terrestre e i gas serra facendola rimbalzare finché l'onda non avrà più energia: questo provoca un aumento anomalo del calore rilasciato in atmosfera e quindi è causa del surriscaldamento globale e dei cambiamenti climatici (figura 4).



Figura 3: schema semplificato dell'azione dei gas serra.



Figura 4: schema dell'effetto serra.

Un aumento di energia andrà a modificare, ad esempio, i temporali, gli spostamenti di masse di aria e le correnti, il surriscaldamento globale non riguarda solo le temperature in aumento ma anche gli squilibri energetici e atmosferici. Bisogna sottolineare che è indispensabile la presenza di anidride carbonica e di altri gas serra in atmosfera perché altrimenti la temperatura media si aggirerebbe intorno ai -18°C .

La vita sulla terra è stata possibile in parte anche grazie ai gas serra a causa del delicato equilibrio termico che si mantiene tale. La terra riceve in continuazione dal sole un'enorme quantità di energia sopra un ampio spettro energetico oltre a produrre calore interno nel frattempo. Per mantenere un equilibrio termico essenziale, tutta l'energia dovrebbe essere continuamente irradiata verso lo spazio. Le interazioni delle radiazioni con la superficie terrestre e l'atmosfera che la circonda sono complesse, interconnesse e hanno diversi gradi di importanza rispetto all'equilibrio termico.

Tra i gas serra presenti in atmosfera si possono distinguere quelli naturali-antropici e quelli solamente antropici. I primi vengono prodotti sia in maniera completamente naturale e permettendo appunto la vita sulla terra sia dall'uomo e dalle sue attività antropiche. Tra i naturali antropici si trovano il vapore acqueo (H_2O), l'anidride carbonica (CO_2), il protossido di azoto (N_2O), il metano (CH_4) e l'esafluoruro di zolfo (SF_6). Tra quelli antropici ci sono gli alocarburi tra i quali i clorofluorocarburi sono quelli prodotti esclusivamente dalle attività antropiche.

Ogni gas serra ha un potenziale differente di trattenere il calore: viene utilizzata come misura la CO_2 equivalente, l'unità di misura utilizzata per misurare il "*Global Warming Potential*" (GWP) di ogni tipologia di gas serra cioè il corrispettivo potenziale di riscaldamento globale (figura 5). L'anidride carbonica è il gas serra di riferimento quindi il suo GWP è pari a 1. Dunque, più è basso il valore della CO_2 equivalente, più l'impatto ambientale sarà minimo.

Gas		CO₂ equivalenti
CO ₂	Carbon dioxide	1
CH ₄	Metan	21
N ₂ O	Nitrous Oxide	310
SF ₆	Sulfur Hexafluoride	23.900
PFC	Perfluorocarbons	6.500 - 9.200
HFC	Idrofluorocarbons	140-11.700

Figura 5: Tabella della CO₂ equivalente per i principali gas serra.

- Vapore acqueo: è il gas serra presente in concentrazione più elevata e causa due terzi dell'effetto serra; le molecole di acqua presenti in atmosfera catturano il calore che viene irradiato dalla superficie terrestre e lo propagano in tutte le direzioni aumentando così le temperature;
- Anidride carbonica: è responsabile del 15% dell'effetto serra ed è aumentata vertiginosamente dal 1960. La sua concentrazione in atmosfera è rimasta pressoché costante per circa diecimila anni fino a all'età preindustriale: in quel periodo ha iniziato ad aumentare a causa principalmente della combustione dei carbon fossili, petrolio, gas naturale e carbone e alla deforestazione in particolare ai tropici. Nel 1850 la concentrazione in atmosfera era circa di 270 ppm, nel 1960 era aumentata a 317 ppm e all'inizio del 2011 era aumentata ulteriormente a 390 ppm;
- Metano: è responsabile del 10% dell'effetto serra ed è causato per il 60-80% dall'uomo; ha una capacità di trattenere il calore che è venti volte superiore dell'anidride carbonica; è il prodotto della degradazione di materiale organico in ambiente privo di ossigeno (anaerobico) come le paludi, le discariche e i siti di estrazione dei carbon fossili;
- Protossido di azoto: è presente in atmosfera in piccola parte ma è trecento volte più potente dell'anidride carbonica nel trattenere calore; deriva dai processi di nitrificazione e denitrificazione del sottosuolo, processi utilizzati negli impianti di depurazione biologica delle acque.
- Alocarburi: sono da tremila a tredicimila più potenti dell'anidride carbonica; erano molto sfruttati negli anni '50 come propellenti nelle bombolette spray, in alcuni collanti e nei solventi. Sono stati ridotti con il protocollo di Montreal ma il problema principale è che permangono in atmosfera per quattrocento anni.

Le emissioni dell'uomo sono la causa principale dell'effetto serra ma gli effetti di questi gas erano conosciuti sin dal 1800: il fisico Svante Arrhenius (1859-1927) predisse già all'epoca che l'anidride carbonica prodotta dalla combustione di carbone avrebbe surriscaldato il pianeta e alla fine la parte che si è surriscaldata di più è stata l'artico. Gli eventi disastrosi meteorologici sono più che triplicati dal 1980 [5].

Perché è difficile smettere di produrre i gas serra? L'emissione collettiva di CO₂ può essere espressa come il prodotto di quattro fattori e le relazioni che intercorrono tra essi: due di questi spiegano il motivo per cui le emissioni di anidride carbonica stanno ancora aumentando in tutto il mondo, le altre due come si può smettere di produrla. I primi due fattori sono la dimensione della popolazione e la crescita economica, i restanti due sono l'intensità energetica e le emissioni per unità di energia prodotta.

1) La dimensione della popolazione.

La popolazione mondiale ha bisogno di cibo, abitazioni e vestiti e aumenta la richiesta di prodotti di lusso da cellulari e pc sempre più sofisticati a cibo sempre più ricco ma economico. Quindi più la popolazione è numerosa più le emissioni di anidride carbonica sono alte. In accordo con le nazioni unite il numero di persone crescerà fino a toccare gli undici miliardi nel 2100 stabilizzati che equivale al 40% in più di oggi.

2) Crescita economica.

Più la gente è ricca e sviluppata più il loro stile di vita produce anidride carbonica; la ricchezza globale sta crescendo quasi ovunque e sebbene sia lontana dall'essere distribuita uniformemente, la crescita economica ha portato ai più alti standard di vita e alla più grande riduzione della povertà estrema nella storia dell'umanità. "Crescita" è diventato il nuovo e principale mantra dell'economia mondiale, è molto improbabile che i paesi ricchi rinuncino al concetto di crescita.

3) Intensità energetica.

L'intensità energetica descrive quanto efficientemente venga utilizzata l'energia, più qualcosa risulta essere efficiente e meno energia viene richiesta per fare qualcosa. Aumentare l'efficienza da sola però non può essere sufficiente principalmente per tre motivi:

- Effetti di rimbalzo diretti: significa che una volta che qualcosa diventa più efficiente viene utilizzato di più e quindi, nel complesso, la maggior efficienza non porta a una riduzione così notevole e impressionante come si potrebbe immaginare o peggio, talvolta una maggiore efficienza fa in modo che gli uomini non utilizzino meno una risorsa ma di più. Ad esempio, quando gli aerei sono diventati più efficienti nei consumi, i prezzi dei biglietti sono diminuiti e più persone hanno iniziato ad utilizzare l'aereo.
- Effetti di rimbalzo indiretti: a volte quando si risparmia su qualcosa che è diventato più efficiente si spendono i guadagni in qualcosa che potenzialmente può emettere più anidride carbonica. Ad esempio, si può emettere più anidride carbonica nonostante si posseda un'automobile più efficiente nei consumi.
- Meno ritorni sull'investimento: più si ottimizza per l'efficienza, più è difficile e dispendioso rendersi più efficienti. Indipendentemente da quanto efficiente si renda l'economia mondiale, finché si avrà bisogno di energia ci saranno emissioni. L'efficienza da sola non andrà a creare un mondo a zero emissioni.

4) Le emissioni per unità di energia prodotta.

Le emissioni di anidride carbonica per unità di energia prodotta riguardano le emissioni per unità di energia utilizzata o l'impronta mondiale di carbonio globale. L'impronta di carbonio globale dell'umanità è l'anidride carbonica rilasciata per unità di energia generata. Più combustibili fossili vengono bruciati, maggiore è la produzione di anidride carbonica; questi rappresentano la più grande leva di cui l'umanità dispone in questo momento. È necessario attuare due soluzioni per accelerare la transizione dei combustibili fossili: la prima è usare la vera leva in associazione alla tecnologia moderna come, ad esempio, le energie rinnovabili e gli incentivi; la seconda è l'invenzione di una tecnologia nuova e migliore altrimenti l'idea di raggiungere un mondo a zero emissioni sarà impossibile [6][7].

1.2 - Dendrocronologia

Il termine dendrocronologia deriva dalla lingua greca ed è l'insieme di tre parole, δένδρον (dendron) cioè albero, χρόνος (kronos) cioè tempo e λογία (logos) cioè discorso; è uno studio cronologico basato sulla sezione del un tronco delle piante. Il primo scienziato che si è accorto che le piante annualmente sviluppavano anelli di accrescimento è Leonardo da Vinci (1452-1519) ma è necessario arrivare agli inizi del '900 grazie ad un astronomo americano, Andrew Ellicott Douglass (1867-1962), che viene considerato il padre della dendrocronologia; all'osservatorio astronomico di Lowell in Arizona Douglass voleva capire la relazione tra clima terrestre e attività solare ma, non avendo a disposizione una documentazione del clima abbastanza lunga, egli cercò le informazioni negli anelli di accrescimento delle piante (Ruggiero L. 2016).

L'informazione che è racchiusa negli anelli di accrescimento è una risorsa molto valida per studiare il cambiamento dell'ambiente che circonda le piante esaminate. Il clima che ha caratterizzato gli anni passati può essere ricostruito anno in anno tramite i cambiamenti negli anelli di accrescimento, nella loro ampiezza e nella loro densità. L'occorrenza di conoscere precedenti eventi anche quelli non ancora annotati come, ad esempio, terremoti o smottamenti, può essere dedotta da anomali cambiamenti negli schemi degli anelli di accrescimento. Per sfruttare al massimo le potenzialità di questa disciplina ci si avvale del *cross dating* (datazione incrociata), una tecnica archeologica che si è rivelata il principio base della dendrocronologia: il *cross dating* è una tecnica che garantisce che ad ogni singolo anello degli alberi venga assegnato il suo esatto anno di formazione e questo si può attuare abbinando modelli di anelli stretti e ampi tra nuclei dello stesso albero e tra alberi di diverse posizioni. Affinché la dendrocronologia funzioni debba esserci una certa variabilità nelle diverse sequenze degli anelli degli alberi, il che equivale alla presenza di anelli da molto stretti a molto ampi per riconoscere gli schemi comuni. (Martinez 2000).

La metodologia del *cross dating* ha rivoluzionato le metodologie per estrapolare le informazioni degli anelli di accrescimento in quanto prende come riferimento non una singola pianta bensì un gruppo di piante i cui anelli si relazionano tra loro (Douglass 1941).

Dendroclimatologia

La dendroclimatologia è anch'essa una disciplina scientifica che analizza e studia gli anelli di accrescimento ma in correlazione all'ambiente ed a eventi accaduti nel passato che le piante possono mostrare. Per gli studi dendroclimatologici si sceglie un sito dove vengono selezionate le piante, continua poi con la datazione, le misurazioni, i controlli della qualità dei dati raccolti e infine la costruzione di una cronologia. La dendroclimatologia studia quali sono le variazioni che esistono tra gli anelli di accrescimento e l'ambiente locale.

Gli anelli devono essere quindi cross datati e replicati sufficientemente per fornire una datazione più precisa possibile. I gradienti associati all'altezza dell'albero, al cambio, all'attività fisiologica controllano la dimensione dell'altezza durante tutta la vita della pianta; questi gradienti biologici interagiscono con le variabili ambientali e complicano le relazioni e i modelli di relazioni tra la crescita e l'ambiente.

Dendroecologia

La dendroecologia si occupa invece delle vicende delle piante in relazione ai suoli; può mostrare le potature che sono state effettuate, schianti e diradamenti che si riflettono nelle curve dendrocronologiche in anni specifici con delle variazioni a cause di ferite o traumi: da questi dati si può risalire al governo del bosco, i trattamenti selvicolturali e l'uso del bosco. Grazie alla dendroecologia è possibile datare esattamente l'anno in cui sono state fatte potature o resinazioni o addirittura gli effetti di compattamento del suolo e oltre a trovare informazioni negli anelli queste possono essere ricavate perfino in ferite o in tessuti cicatriziali.

1.3 - Anelli di accrescimento

Le caratteristiche intrinseche degli anelli all'interno di una pianta possono mostrare agli scienziati, oltre all'età dell'albero, anche come sono state le condizioni climatiche durante l'intera vita della pianta. Gli alberi molto vecchi possono offrire utili indizi riguardanti il clima di un'area prima dell'arrivo degli strumenti appositi di misurazione climatica. Ma gli alberi possono raccogliere molti più record del clima della terra, infatti le piante possono vivere per centinaia di anni, talvolta anche migliaia. Un modo che gli scienziati utilizzano per capire il clima passato dalle piante è studiando gli anelli di accrescimento.

Gli anelli di crescita che vengono utilizzati per la dendrocronologia sono il risultato dell'attività periodica del cambio cribro-vascolare o cribro-legnoso (figura 7a), un meristema laterale caratterizzato da un'attività dipleurica cioè che produce xilema secondario verso l'interno e floema secondario verso l'esterno. In contemporanea a questa produzione viene prodotto il periderma in sostituzione all'epidermide grazie all'attività del cambio suberofellodermico. Il periderma e xilema e floema secondari nel complesso costituiscono il corpo secondario della pianta che fece la sua comparsa nel Devoniano medio, periodo che corrisponde all'età dei pesci, alla prima comparsa di insetti e delle piante terrestri (408-362 milioni di anni fa). In primavera per trasportare la maggior quantità possibile di acqua, il cambio produce soprattutto trachee e parenchima che formano il legno primaverile (o legno precoce) che è piuttosto chiaro, meno denso, poroso e tenero. In estate invece il cambio produce soprattutto tracheidi e fibre che formano il legno autunnale (o legno tardivo), più



Figura 6: sezione trasversale di un tronco che mostra gli anelli di accrescimento.

scuro, duro e compatto. In una stessa cerchia annuale il passaggio dal primo legno a quello successivo può essere quasi impercettibile ma dove avviene il passaggio da legno autunnale a primaverile il cambiamento è netto e quindi distinguibile (figura 6 e 7b). Nel corso della loro esistenza gli alberi formano anelli secondo un ritmo periodico legato all'attività vegetativa, cioè al ciclo di crescita che nella zona temperata è costituito da tre periodi distinti: uno di notevole attività, uno di attività meno intensa, ed infine uno di riposo assoluto.

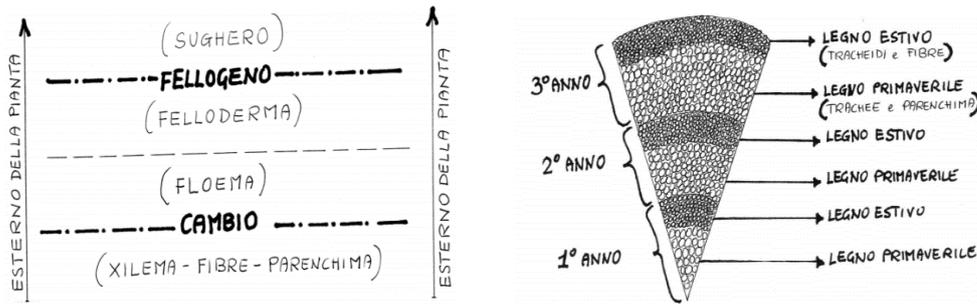
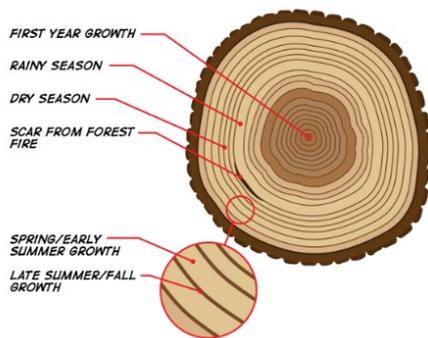


Figura 7: a sinistra schema del tronco di una pianta con accrescimento secondario (7a); a destra differenze tra legno estivo e invernale. (7b). Guido Gandelli, 2016.

I primi due periodi corrispondono ad un incremento di biomassa dell'albero che si traduce in aumento di altezza e incremento del diametro, mentre il periodo di riposo segna la fine dell'accrescimento per quel dato anno. Lo spessore di un anello di accrescimento è un indicatore molto affidabile per quanto riguarda la quantità di pioggia precipitata in una determinata annata [8]; quando le condizioni risultano essere favorevoli cioè in periodi di pioggia abbondante gli anelli risultano avere uno spessore notevole; in condizioni di siccità, ad esempio, o in altre sfavorevoli, gli anelli sono sottili (figura 8). Il più delle volte anelli sottili indicano una difficoltà nell'accrescimento mentre gli anelli spessi evidentemente segnalano la condizione contraria. L'ampiezza degli anelli è inoltre strettamente legata



all'età della pianta: a parità di condizioni ambientali piante giovani formano anelli più spessi di piante adulte o senescenti. Nelle regioni semiaride, dove le precipitazioni sono molto scarse, gli alberi vengono utilizzati come misuratori sensibili della piovosità; la registrazione dello spessore medio degli anelli di accrescimento è risultata una valida

guida per conoscere quali fossero le condizioni climatiche e le temperature di anni precedenti. L'attività periodica del cambio cribro-legnoso è correlata al periodo stagionale; variazioni significative o improvvise del clima, nella disponibilità di acqua o di qualsiasi altro fattore ambientale possono originare cerchi di accrescimento falsi (si forma più di un anello in un dato anno) per l'appunto denominate cerchie annuali false. L'ampiezza degli anelli di crescita è legata a diversi fattori ambientali come luce, temperatura, precipitazioni, disponibilità di acqua nel suolo, stagione: queste variazioni che si verificano sono l'oggetto principale della dendrocronologia che ne studia le diverse sfumature (Ray e Susan 2015; Solomon et al. 2017)

1.4 - Piante utilizzate nella dendrocronologia

Come si può supporre non tutti gli alberi sono adatti per gli studi della dendrocronologia e della dendroclimatologia. Se un albero crescesse in un luogo ove il clima è favorevole con un apporto idrico costante e adeguato l'albero non presenterà significative variazioni nei suoi cerchi di accrescimento. Per essere adatto agli studi dendrocronologici, la pianta deve essere cresciuta in un luogo dove le condizioni ambientali non sono costanti ma cambiano di anno in anno. Ad esempio, un ottimo ambiente sono le zone aride dove si vede la presenza di un fattore limitante cioè le precipitazioni che sono molto scarse oppure nelle zone artiche dove la temperatura gioca il ruolo del fattore limitante. In caso di climi aridi la scarsità di acqua produce cerchi annuali sottili e tutti gli alberi che crescono nella stessa zona presa in esame presentano circa le stesse variazioni nei cerchi. Le sequenze di spessori che vengono rilevate su un numero considerevole di alberi consentono di fare delle "datazioni incrociate" cioè stabilire una correlazione di tempo tra le sequenze dei singoli alberi. La datazione incrociata è la tecnica dendrocronologica più importante: la sequenza degli anelli del reperto in esame viene confrontata con quella ricavata da piante dello stesso sito di interesse per stabilire la sequenza guida; solitamente è necessaria la sovrapposizione di sequenze di 50 anni almeno affinché la datazione risulti precisa.

Il clima non è l'unico fattore che può influire sulla struttura degli anelli di accrescimento: la crescita di una pianta dipende anche dagli elementi nutritivi presenti nel terreno, la presenza di altre piante e la competitività e anche dalle malattie. Per questo è meglio condurre le analisi in luoghi dove il maggior fattore limitante è il clima, meglio foreste dove l'uomo non è ancora intervenuto alterando la crescita spontanea degli alberi; se alcuni campioni risultano aver anomalie questi andranno scartati come, ad esempio, alberi che presentano crescite non omogenee o lineari a causa di insetti, incendi o malattie.

Le specie sensibili al segnale climatico e quindi utili per le analisi dendrocronologiche si dicono "sensitive", mentre quelle che non reagiscono alle variazioni climatiche vengono definite specie "compiacenti". In Europa le migliori specie tra le sensitive per questo tipo di analisi sono l'abete bianco (*Abies alba*), l'abete rosso (*Picea abies*), il larice (*Larix decidua*), il pino cembro (*Pinus cembra*), le querce caducifoglie (*Quercus sp*) e il faggio (*Fagus sylvatica*). Per l'area mediterranea le specie migliori sono ancora le querce decidue e l'abete bianco, e poi alcuni pini mediterranei come il pino d'Aleppo (*Pinus halepensis*).

Naturalmente esistono differenze nel prendere in considerazione una conifera piuttosto che una latifoglia. Nel caso di una conifera nel legno gli elementi che la costituiscono sono le tracheidi che appaiono in forma tondeggianti o poligonale se viste in sezione trasversale. In ogni anello si possono notare due zone distinte: la prima è caratterizzata da pareti sottili ed equivale alla fase di vita della pianta dove l'attività vegetativa è notevole, questa zona è chiamata legno iniziale o legno primaverile; la seconda è invece caratterizzata da cellule aventi le pareti molto più spesse e leggermente appiattite e che corrispondono alla fase di attività vegetativa più rallentata ed è la zona chiamata legno finale o legno estivo.

Nel caso di latifoglie il legno primaverile è caratterizzato da una o più file di vasi grandi: questa tipologia di legno è detta a porosità anulare in quanto i pori realizzano in sezione trasversale una corona circolare nell'anello di crescita.

1.5 - Studi dendrocronologici sull'utilizzo del faggio

Il faggio è un'ottima pianta indicatrice ed è una delle più estese ed abbondanti nelle foreste naturali dell'Europa centrale (figura 9) anche per quanto riguarda il legname (Ellenberg e Leuschener 2010). Gli studi dendrocronologici e quelli ecofisiologici propongono il faggio europeo, *Fagus sylvatica*, come il miglior sensibile alla siccità rispetto alle altre specie di piante europee. Da quando il surriscaldamento globale ha iniziato a innalzare le temperature, le precipitazioni estive sono diminuite negli ultimi decenni e si protrarranno con conseguenza di estati molto calde e secche; la resistenza del faggio alla siccità e al caldo lo rendono importante. Il faggio è stato quindi scelto per calcolare la scarsità di acqua nel suolo grazie alla riduzione del condotto stomatico e quindi alla quantità di linfa che scorre, la pianta infatti diminuisce il minimo e il massimo potenziale idrico sulle foglie e fa aumentare la mortalità delle radici finché sono più rigide rispetto alle altre latifoglie. Nell'Europa centrale e orientale le foreste miste con presenza di faggio, querce,



Figura 9: Cartina che raffigura l'intero areale di distribuzione del Faggio in Europa.

<https://www.waldwissen.net/it/ecosistema-bosco/alberi-e-piante-forestali/latifoglie/ecologia-del-faggio>

carpini, aceri e tigli vedono come, a causa del cambiamento climatico, la riduzione del tronco sia più accentuata nel faggio. Le analisi dell'accrescimento in correlazione al clima in faggete di tutta Europa rivelano una coerente risposta positiva riguardo le precipitazioni abbondanti nelle stagioni di crescita (da maggio a luglio) ed effetti invece negativi delle temperature elevate sempre nelle stagioni di crescita e all'inizio dell'estate: si desume che l'attività cambiale del faggio è più alta in periodi di elevata umidità atmosferica.

Osservazioni recenti di lunga durata di faggete in relazione alla distribuzione del faggio hanno relazionano effetti della siccità con il cambiamento climatico. La mortalità di piante indotta dalla siccità è stata rilevata in Ungheria al limite sud-orientale del faggio in Europa. In Europa centrale invece la produzione di legno di faggio è aumentata dal diciannovesimo secolo e quindi si è dedotto che il faggio in questa zona non è minacciato dal cambiamento climatico non lo sarà nemmeno nei prossimi decenni; in contrasto Cavin and Jump (2016) hanno trovato in 46 faggi dall'Inghilterra alla Spagna una più alta sensibilità degli anelli alla siccità in siti più settentrionali rispetto al confine meridionale. Per quanto riguarda quindi l'Europa centrale è evidente che gli anelli di accrescimento dei faggi in elevate altitudini è controllato prevalentemente dalle temperature mentre le altitudini più basse sono guidate da precipitazioni estive e influenzati negativamente dalle temperature estive. Se quindi esistesse un motivo per capire quale sia la soglia climatica delle risposte diverse che ha il faggio si potrebbero abbassare notevolmente i rischi nella produzione di foreste di faggio.

È stato condotto uno studio nella Germania sudorientale dove i faggi sono presenti dalla pianura alle montagne per circa mille metri di dislivello. Sono state selezionate quattro faggete, da 110 metri di altitudine a 1230 m coprendo un'area dove la temperatura media parte dai 10.6°C e arriva ai 3.5°C e le precipitazioni partono dai 755mm/anno e arrivano ai 1788mm/anno. L'analisi della sensibilità climatica ha mostrato come l'incremento annuale del fusto era fortemente limitato alle basse altitudini (110-300 m) dalle scarse precipitazioni in aprile/maggio, ma dalle basse temperature estive a 1230 m. Ad altitudine intermedia (640 m) sono stati trovati come fattori limitanti sia l'umidità che la temperatura. Le differenze nella sensibilità al clima erano legate a contrastanti tendenze di crescita a lungo termine. A 110-300 m, la crescita radiale è costantemente diminuita dagli anni '80 circa, mentre è aumentata a 1230 m. I risultati scaturiti dall'analisi dalle quattro aree suggeriscono per la regione di studio che il controllo abiotico della crescita radiale del faggio passa da un fattore limitante quale l'umidità alla temperatura a una soglia situata tra 160 e 235 mm di precipitazioni in aprile/maggio (che corrisponde a 200 e 313 mm di precipitazioni in giugno-

agosto), in conformità con i risultati dendroecologici di altre regioni pianeggianti dell'Europa centrale. Quindi il declino della crescita derivante dal cambiamento climatico è più diffuso al centro dell'areale di distribuzione della specie di quanto si pensasse in precedenza, il che è molto rilevante per la pianificazione forestale. L'evidenza dendroclimatologica di questo studio sottolinea un intervallo altitudinale critico a circa 600 m s.l.m., ove il fattore limitante è l'umidità nella crescita radiale alle quote più basse e passa al fattore limitante temperatura alle quote più elevate: questa soglia si trovi in un intervallo tra c. 160 e 235 mm di precipitazione tra aprile/maggio. È visibile una forte riduzione dell'incremento annuale del fusto a 110 e 300 m s.l.m. da più di 30 anni, mentre il calo è meno marcato a 640 m s.l.m., e si registra un incremento di crescita a 1230 m s.l.m.; questa reazione deve essere causata da fattori legati al cambiamento climatico che agiscono direttamente o indirettamente e che influenzano in modo diverso le quattro aree geografiche. Le tendenze di crescita riportate da almeno sei regioni dell'Europa centrale tra la Germania nord-orientale e la Francia nord-orientale e la Svizzera evidenziano costantemente una riduzione generale della vitalità del faggio dalle pianure alle zone boschive premontane e dato che la tendenza al riscaldamento estivo continuerà e è previsto che le precipitazioni estive diminuiranno in futuro in varie regioni dell'Europa centrale, i probabili fattori trainanti dei cambiamenti vitali saranno rafforzati e il calo della crescita potrebbe prendere slancio nei prossimi decenni (Dulamsuren *et al.* 2017)

Capitolo 2 - Obiettivi del lavoro

Il lavoro ha l'obiettivo di analizzare la sensibilità climatica dell'accrescimento secondario del faggio e capire se e come il cambiamento climatico abbia o meno influenzato la crescita delle piante.

Lo scopo è di riuscire ad ottenere una tendenza generale che potrebbe sussistere tra gli anelli di accrescimento analizzati e le variazioni climatiche presenti nella zona di crescita dei faggi.

Conoscere la reazione dei faggi al clima è un'ottima metodologia per analizzare l'adattamento della pianta studiata, il faggio (*Fagus sylvatica*) in risposta al cambiamento climatico e all'innalzamento delle temperature. Infatti, un ulteriore riscaldamento climatico potrebbe far soffrire il faggio nelle regioni di pianura e bassa montagna dell'Europa centrale per una ridotta vitalità e produttività. Al contrario, la specie potrebbe trarre vantaggio dal riscaldamento nelle aree montane spostandosi progressivamente verso quote più elevate.

Capitolo 3 - Materiali e metodi

3.1 - La specie studiata: *Fagus sylvatica*



Figura 10: *Fagus sylvatica*: tre degli esemplari carotati.

Il faggio, *Fagus sylvatica* L., è un albero deciduo e non molto longevo (fino a 300 anni), albero di prima grandezza con una forte facoltà pollonifera; il nome latino del genere potrebbe provenire dal greco “*faghein*” che significa mangiare: questo verbo è riferito ai frutti eduli di cui i maiali sono ghiotti (Alberti 2019).

È caratterizzato da un fusto che cresce fino a 35 metri e con un diametro che in media va dagli 80 ai 100 cm, fusto molto dritto con una corteccia caratterizzata da un ritidoma sottile di colore grigio chiaro a tratti lucente che in tarda età risulta essere fessurata. Alla base della pianta sono presenti delle protuberanze chiamate sferoblasti, noduli legnosi che producono esclusivamente rami legnosi.

L'apparato radicale è poco profondo e gli permette di esplorare solamente la parte superficiale del suolo. La chioma è ampia e globosa a causa dei rami più fini che riescono a

Dominio	Eukaryota
Regno	Plantae
Divisione	Magnoliophyta
Classe	Magnoliopsida
Ordine	Fagales
Famiglia	Fagaceae
Genere	Fagus
Specie	<i>F. sylvatica</i>

formare un angolo molto acuto (30°) con foglie verdi scuro lunghe dai 4 ai 9 centimetri, picciolate semplici, ellittiche, ed alterne con apice acuto e con un margine intero e ondulato; le nervature fogliari sono ricoperte da peli sericei e alla base delle foglie sono presenti due stipole marroni che in poco tempo diventano glabre. La pagina superiore è più scura di quella inferiore che contrariamente presenta evidenti nervature secondarie. L'albero mantiene un fogliame ricco e denso che sembra procedere verso l'alto senza fine. Fiorisce in aprile-maggio, i fiori del faggio sono unisessuali. I fiori sono portati dai brachiblasti, cioè rami con internodi molto brevi, quelli maschili sono riuniti in infiorescenze a capolino composto da 6-16 fiori ascellari da brattee lineari (foglie modificate) di lunghezze diverse. I fiori maschili sono monoclamidati con perianzio formato da cinque o sei lobi che sono saldati alla base e formano una specie di campana zigomorfa con altrettante punte, all'interno sono situati 8-16 stami e a volte ci può essere un rudimento di ovario ma assolutamente sterile. L'infiorescenza femminile è eretta e con un breve peduncolo formata da 2 fiori, talvolta 3, dentro una cupola di color verdastro a quattro lobi tomentosa e con squame erbacee spiniformi. Il fiore femminile è monoclamidato, con perianzio sepaloide formato da 6 sepali uniti all'ovario infero a 3 logge, ma che per riassorbimento dei setti e per aborto di 5 ovuli, l'ovario diventa uniloculare e monovulare. Il faggio fruttifica annualmente, ma ogni 4-5 la fruttificazione è particolarmente abbondante e ogni 10-15 ancora maggiore (annate di "pasciona"). Il frutto viene chiamato faggiola, è una noce di colore marrone con pericarpo coriaceo lucido a maturità cioè verso settembre-ottobre e da queste si può ricavare un olio commestibile. La cupola è coperta da lunghe squame subulate rigide, è lunga all'incirca 2,5 cm e contiene due faggiole; la dispersione di queste si protrae per tutto l'autunno. Il seme ha forma piramidale a base triangolare è privo di endosperma, ma le sostanze di riserva sono contenute nei dicotiledoni ripiegati all'interno del pericarpo. I semi sono dormienti e per germinare hanno bisogno di un lungo periodo di *chilling* (vernalizzazione) da 45 giorni fino a 5 mesi. La sua germinazione è intermedia con i cotiledoni che, prima nutrono con le riserve l'embrione e poi continuano a nutrire il germinello con la fotosintesi. Il germinello ha dei cotiledoni grandi a ventaglio e auricolati alla base, hanno la pagina superiore color verde scuro e glabra, la pagina inferiore invece è bianca argenteo. Le prime foglie vere sono omomorfe ma piccole e pubescenti con margine anche dentato. Ha esigenze di crescita riguardo alla luce pari a un ombreggiamento del 60% della luce solare piena. Il frutto è a cupola chiusa con quattro valve coriacee ornate da aculei. Il legno è a porosità diffusa, l'alburno e il durame non sono differenziati (Baldino 2011; Lietutaghi 1975). Gli anelli di

accrescimento sono poco percepibili a causa del colore chiaro e i raggi parenchimatici vengono chiamati specchiature. Il legno è ricco di sostanze amilacee che attirano scolitidi e funghi che ne sono attratti quando la pianta viene lasciata in bosco. Dalla distillazione del legno si prepara il catrame del faggio molto ricco di creosoto: si tratta di un liquido limpido, paglierino, oleoso e caustico; in passato veniva utilizzato con effetto balsamico e antisettico, oggi non più perché tossico (Maugini 2019). Oggi il legno del faggio è usato in falegnameria e in ebanisteria per vari lavori d'artigianato. Si usa anche nella costruzione di attrezzi come strumenti utilizzati a mano per le lavorazioni del terreno (vanga, zappa, pala) o del legname (accetta, ascia).

Habitat ed esigenze nutrizionali

Originario della Svezia meridionale, ma ormai endemico in tutta Italia, il faggio è forse la latifoglia più diffusa in Europa, dalla Scozia fino ai Carpazi, a sud fino alla Sicilia, a Ovest fino all'Atlantico. Forma boschi puri, le faggete oppure boschi misti: alle basse latitudini si associa al rovere (*Quercus petraea*), farnia (*Quercus robur*) o al carpino (*Carpinus spp*) quando la freschezza del suolo è accentuata; in montagna principalmente con l'abete (*Picea excelsa*). Si trova spesso e volentieri su terreni calcarei o acidi, freschi e fertili da 800 a 1600 metri di altitudine sia sulle Alpi che sugli Appennini, è una specie a carattere oceanico, igrofila, mesofila e sciafila, non sopporta temperature sotto i -25°, preferisce suoli freschi, fertili, con un buon drenaggio ed è molto tollerante nei confronti del pH. In Italia il faggio è presente in tutte le zone montane tranne in Sardegna e nelle isole mediterranee orientali. I parametri climatici richiesti per la crescita del faggio corrispondono a zone con clima oceanico e suboceanico con totale assenza di periodi di asciutta. Il faggio è l'essenza d'ombra per eccellenza: le giovani piantine cercano di evitare la luce troppo forte e crescono sotto un riparo. Il faggio non tollera i ristagni d'acqua, le gelate tardive ed i suoli troppo umidi e compatti come l'humus troppo acido.

È un albero principalmente di fustaia, le faggete pure sono foreste molto scure dove crescono un numero limitato di piante o dove la lettiera è spesso priva di qualsiasi forma di vegetazione. Gli unici a sopportare la dominazione del faggio sono l'agrifoglio (*Ilex aquifolium*), il tasso (*Taxus baccata*) e il pungitopo (*Ruscus aculeatus*).

3.2 - Luogo del campionamento

Le analisi sono state condotte in località Astrio (BS), una piccola frazione del comune di Breno a circa 794 metri di altitudine orientato a sud-est. I rilievi sono stati eseguiti alle coordinate $45^{\circ}56'49.031''$, $10^{\circ}19'19.398''$ (45.946953, 10.322055) (figura 11).

Inquadramento [9]:

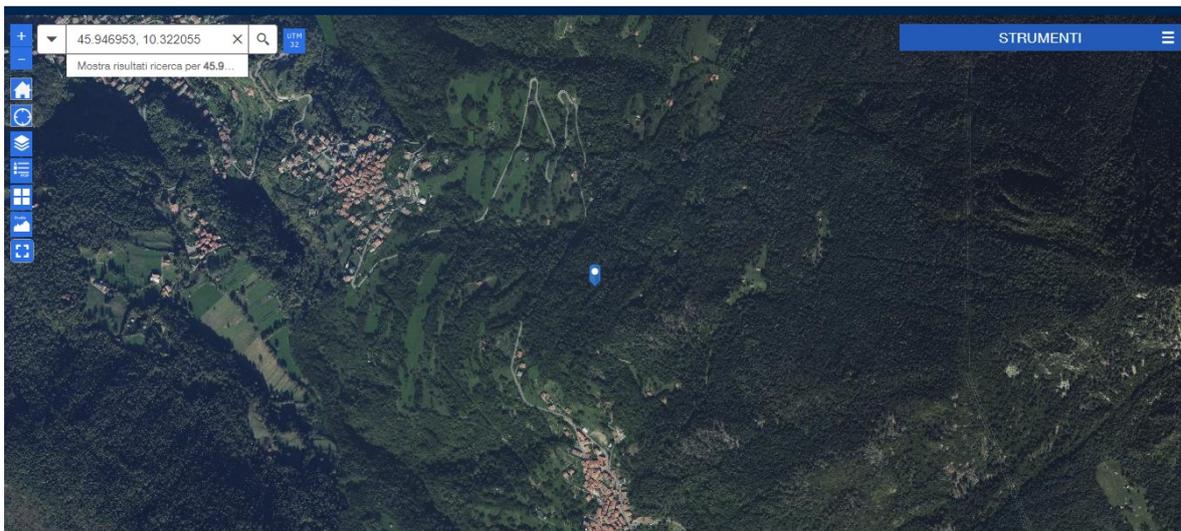


Figura 11: Ortofoto ricavata dal Geoportale della Lombardia [9]. Scala 1:10000

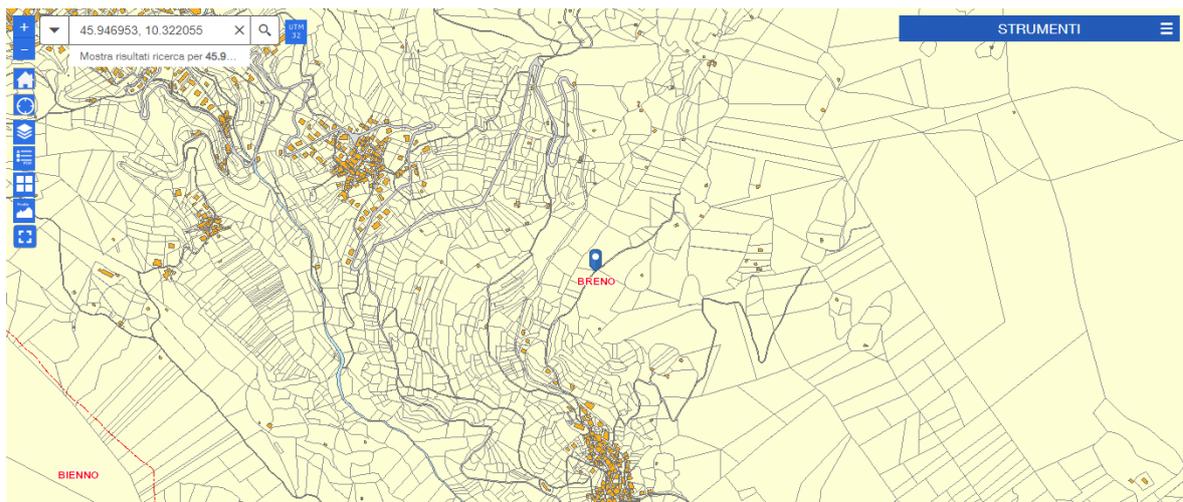


Figura 12: Mappa catastale ricavata dal Geoportale della Lombardia [9]. Scala 1:10000

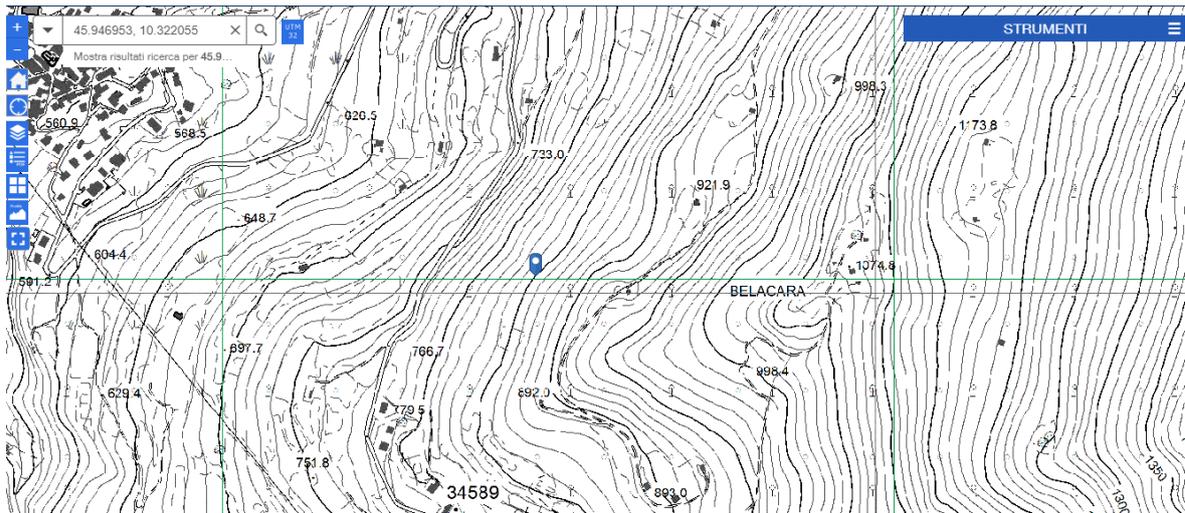


Figura 13: CTR ricavata dal Geoportale della Lombardia [9]. Scala 1:5000

La zona presa in esame corrisponde a un castagneto (figura 14) in cui il governo del bosco è affidato all'evoluzione naturale dello stesso (figura 15) con una destinazione selvicolturale multifunzionale (figura 16).



Figura 14: Carta forestale ricavata dal Geoportale della Lombardia [9]. Scala 1:5000



Figura 15: Carta di governo del bosco ricavata dal Geoportale della Lombardia [9]. Scala 1:5000

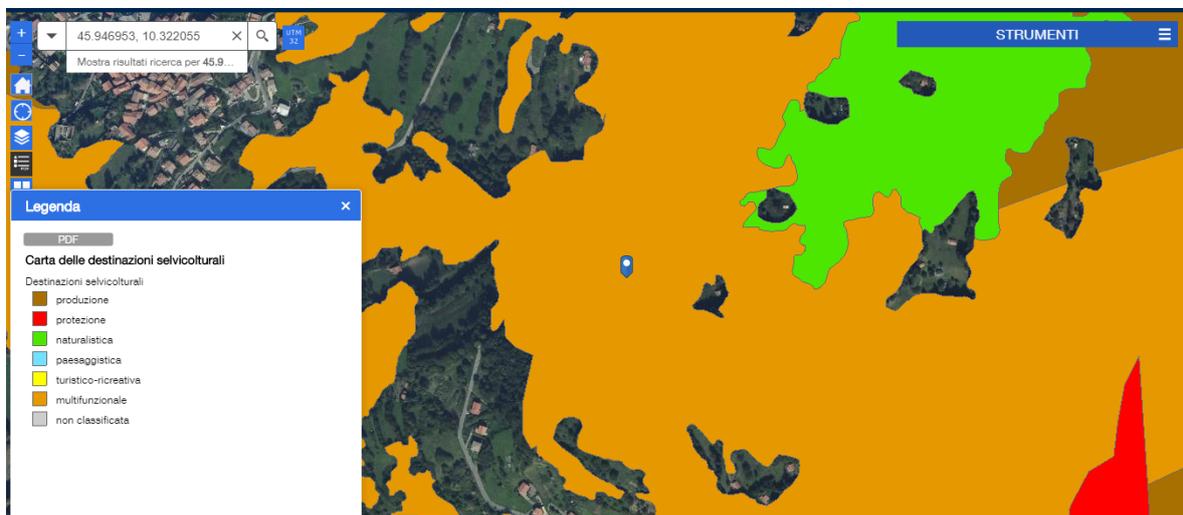


Figura 16: Destinazioni selvicolturali ricavate dal Geoportale della Lombardia [9]. Scala 1:5000

3.3 - Dati climatici

Il clima in località Astrio è tendenzialmente mite, caldo e temperato. Le precipitazioni sono significative lungo tutto il corso dell'anno, infatti anche il mese considerato più asciutto risulta avere precipitazioni significative rispetto alle altre località.

Astrio viene catalogata come “Cfb” secondo gli studi di Köppen e Geiger (figura 17): la prima lettera, C, indica l'appartenenza al gruppo C che corrisponde a climi temperati-caldi piovosi con caratteristiche di avere una temperatura media del mese più freddo in un range compreso tra i 18° e i -3° senza copertura regolare nevosa. La seconda lettera, f, indica che le precipitazioni sono presenti in tutti i mesi dell'anno (tabella 1); dalla combinazione della lettera del primo gruppo con la seconda si ottiene il sottotipo “Cf” che equivale a un clima temperato caratterizzato da un'estate umida. Infine, l'ultima lettera della classificazione, b, rappresenta che la temperatura media del mese più caldo è inferiore ai 22° e nell'arco dell'anno almeno in quattro mesi supera la soglia dei 10° (Peel e Finlayson 2007).

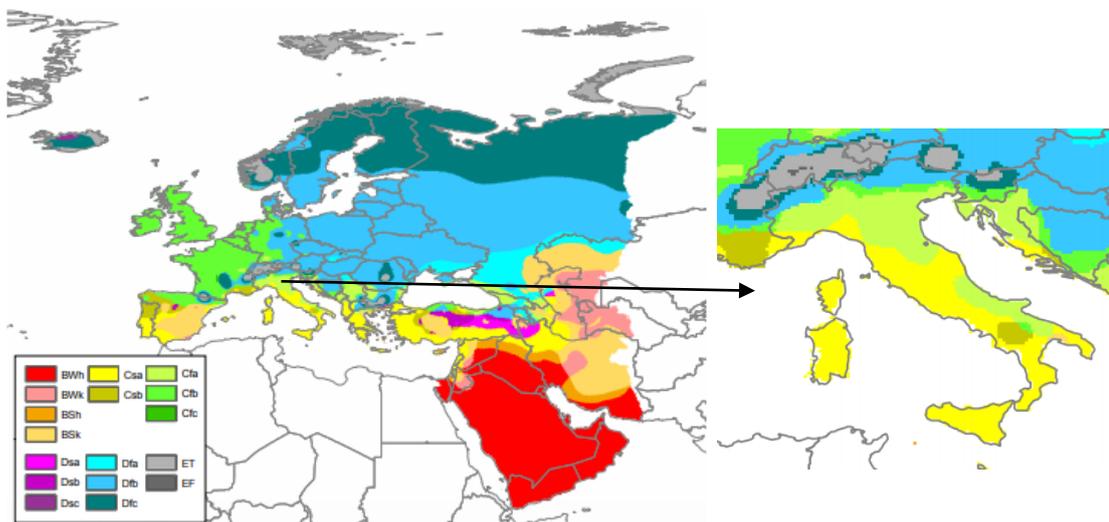


Figura 17: carta della classificazione Köppen-Geiger.

Per riassumere le medie calcolate di temperature e delle precipitazioni ci si è serviti del pratico grafico di tipo “*Bagnouls-Gaussen*” (figura 18) che mostra con estrema semplicità i valori medi degli andamenti sia delle precipitazioni che delle temperature a partire dall’anno 1960 fino all’anno 2012. Per la realizzazione di questo grafico si sono ricavati i dati dal dataset climatico “*cru ts*” 3.1 dell’università dell’Anglia orientale (Norwich, Inghilterra): sono state calcolate le relative medie di temperatura e precipitazioni per ogni mese.

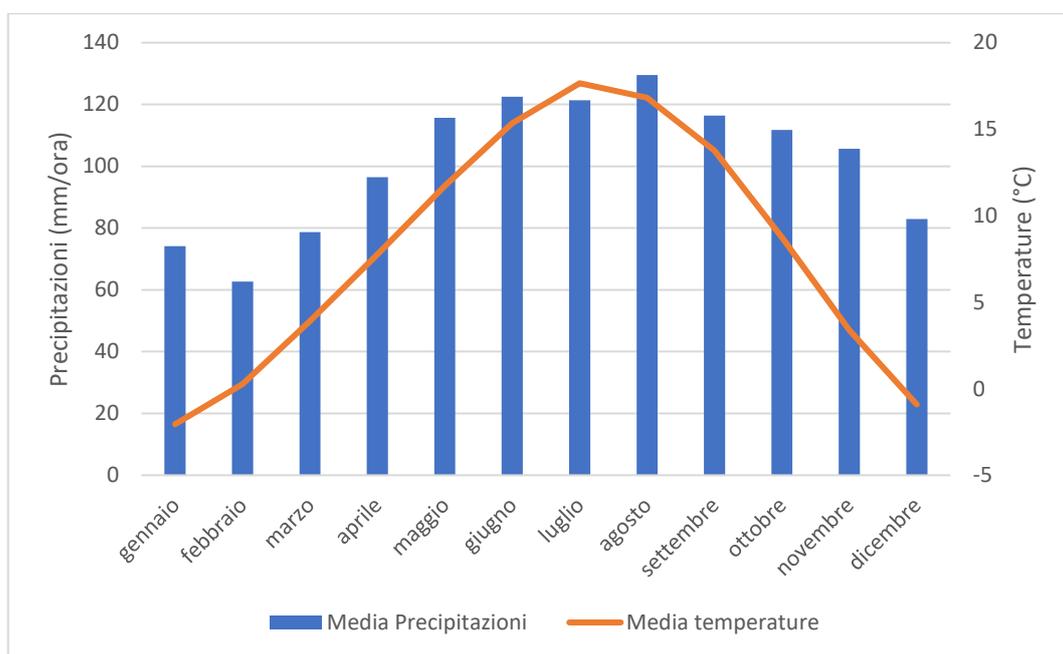


Figura 18: Grafico *Bagnouls-Gaussen* riferito all’arco di tempo 1960-2012.

Dal grafico si può notare che le medie di temperature e di precipitazioni sono favorevoli allo sviluppo del faggio: precipitazioni presenti lungo tutto il periodo dell’anno, inverni freddi ma non gelidi, temperatura media annua compresa tra i 5 e i 9 gradi, in grafico risulta 8 gradi.

3.4 – Rilievi in campo

Vicino al centro abitato, a dieci minuti a piedi circa sono presenti vicino alla strada sterrata una trentina di faggi; tra questi sono stati presi in esame solamente quelli con un diametro maggiore o uguale a 40 cm e sono stati scelti principalmente faggi isolati meglio se nati da seme. Su un'agenda si è man mano appuntato la pianta in esame secondo la numerazione classica e la misura del relativo diametro. Per prelevare le carote legnose è stato utilizzato il succhiello di Pressler (figura 19), una sonda incrementale adatta a ogni tipologia di legno che, azionata a mano facendola ruotare su sé stessa e applicando una forza in direzione interno della pianta, ricava una carota legnosa dalla pianta. Per estrarla bisogna poi inserire direttamente l'estrattore facendo



Figura 19: carota legnosa che viene estratta dal succhiello di Pressler.

attenzione a inserirlo al di sotto della carota; una volta che si è fatto scorrere l'estrattore fino in fondo alla sonda, si chiude, viene fatto un giro completo al contrario così da facilitare l'estrazione e quindi l'estrattore viene prelevato con la carota legnosa: questo procedimento permette di estrarre un campione dalla pianta in esame. Il succhiello di Pressler è caratterizzato da un'impugnatura in acciaio, una trivella a filetto doppio in acciaio di elevata resistenza e infine un estrattore con copertura al teflon. Per ottenere risultati migliori la sonda è stata posizionata a circa 1.30m di altezza del tronco e il più perpendicolare possibile rispetto al tronco stesso per l'estrazione del primo campione mentre per estrarre il secondo questo è stato prelevato nuovamente perpendicolare rispetto alla pianta ma anche rispetto alla prima carota. Una volta che il campione è stato estratto si è scelto di posizionare temporaneamente i campioni in semplici cannuce di plastica aventi il diametro leggermente superiore a quello della carota (5mm) e di chiuderle con scotch; un ulteriore pezzo di scotch è servito per etichettare la cannuccia riportando il numero della pianta carotata così da poter associare nel modo migliore pianta, diametro e carote prelevate. Una volta eseguite tutte le estrazioni e arrivati in un luogo più consono, quindi in un'abitazione

e non più nel bosco, le cannuce vengono svuotate e le carote legnose sistemate su appositi supporti legnosi. Infine, sugli appositi supporti legnosi sono state appuntate la specie, *Fagus sylvatica* abbreviato con FASY (FA ste per *Fagus* e SY per *sylvatica*), il sito dove è stata prelevata, Astrio, la misura del diametro della pianta e la data del campionamento.

I dati ottenuti dopo i carotaggi sono i seguenti:

Nome carota	Specie	Luogo	Data	Diametro (cm)
A1X-A1Y	<i>Fagus sylvatica</i>	Astrio	06/08/2019	40.2
A2X-A2Y	<i>Fagus sylvatica</i>	Astrio	18/10/2019	54.0
A3X-A3Y	<i>Fagus sylvatica</i>	Astrio	18/10/2019	49.75
A4X-A4Y	<i>Fagus sylvatica</i>	Astrio	25/10/2019	67.0
A5X-A5Y	<i>Fagus sylvatica</i>	Astrio	25/10/2019	53.6
A6X-A6Y	<i>Fagus sylvatica</i>	Astrio	25/10/2019	72.0
A7X-A7Y	<i>Fagus sylvatica</i>	Astrio	25/10/2019	42.8
A8X-A8Y	<i>Fagus sylvatica</i>	Astrio	25/10/2019	40.5
A9X-A9Y	<i>Fagus sylvatica</i>	Astrio	28/10/2019	46.4
A10X-A10Y	<i>Fagus sylvatica</i>	Astrio	28/10/2019	40.3
A11X-A11Y	<i>Fagus sylvatica</i>	Astrio	28/10/2019	42.1
A12X-A12Y	<i>Fagus sylvatica</i>	Astrio	28/10/2019	41.6
A13X-A13Y	<i>Fagus sylvatica</i>	Astrio	04/11/2019	49.9
A14X-A14Y	<i>Fagus sylvatica</i>	Astrio	04/11/2019	45.4
A15X-A15Y	<i>Fagus sylvatica</i>	Astrio	25/11/2019	42.9

3.5 - Preparazione campioni

Le carote sono state incollate ai supporti legnosi con semplice colla vinilica: la quantità di colla deve essere sufficiente a far aderire bene la carota al supporto ma non deve strabordare dalla scanalatura del supporto. La carota è applicata a circa 3-4 cm dal bordo del supporto con la corteccia rivolta a sinistra



Figura 20: Carote legnose analizzate.

rispetto alle scritte riportate sul supporto. Per far ben aderire le carote e tenerle ben fisse si è utilizzato dello scotch carta. Nel caso di campioni rotti è possibile ricomporre la carota, tenendo vicine le parti se adiacenti altrimenti lasciando uno spazio tra i due pezzi. Bisogna fare molta attenzione nella fase della sistemazione sui supporti legnosi perché bisogna orientarla in modo da mantenere le fibre in posizione verticale così che, una volta piallate pian piano con lamette apposite, i cerchi di accrescimento si vedano perfettamente (figure 20 e 21).



Figura 21: Carota legnosa preparata per l'analisi.

Quando la colla vinilica è perfettamente asciugata e in questo caso si è optato per un'asciugatura naturale, dopo 24 ore circa è stato rimosso lo scotch carta e si è proceduto a piallare le carote: sono state utilizzate lamette apposite fornite dal tutor molto taglienti e pian piano si è livellata la superficie della carota fino a che si arriva a metà dello spessore; vengono utilizzate lamette e vengono piallate completamente a mano così che le cellule del legno e gli anelli non siano rovinati e venga mantenuta un'ottima qualità.

Una volta che i campioni sono stati sistemati sui supporti fissi appositi e sistemati si è proceduto alla scannerizzazione di tutti i campioni: si è utilizzato un semplice scanner

acquisendo le immagini in formato “.tiff”, si sono posizionate otto carote a volta e successivamente sono state ritagliate con il software “gimp” così da ottenere in una immagine una singola carota. L’operazione di scannerizzazione però è stata ripetuta perché, a causa del legno molto chiaro del faggio, gli anelli di accrescimento non erano ben visibili. Quindi, dopo numerose analisi con scarsi risultati si sono nuovamente scannerizzate le carote applicando del normalissimo gesso bianco e fissandolo con della lacca spray in modo che, penetrando nei pori del legno, rendesse più visibili gli anelli di accrescimento. Ogni immagine è stata rinominata in base al nome della carota quindi A1X, A1Y, A2X ecc. in modo da rendere più pratico e facile il lavoro tramite due software di misure dendrocronologiche, CDendro e CooRecorder.

3.6 - Programmi utilizzati

Inizialmente si è utilizzato CooRecorder 9.3.1 June 5 (2018) grazie al quale vengono evidenziati tutti gli anelli di accrescimento come mostrato in figura 22:

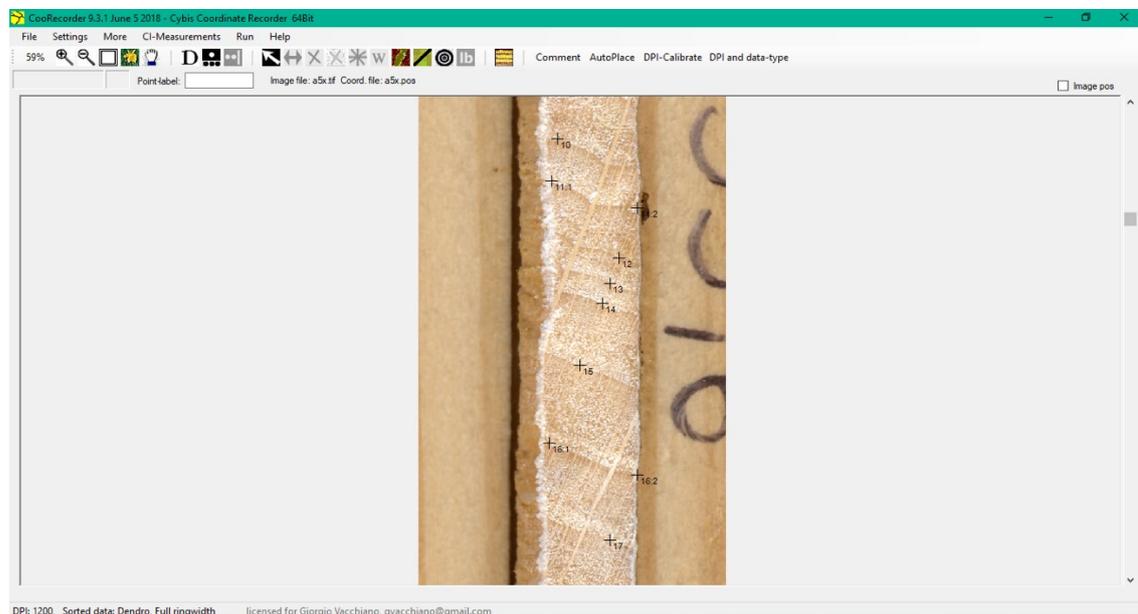


Figura 22: utilizzo di CooRecorder.

CooRecorder offre numerose funzioni per facilitare la selezione degli anelli di accrescimento: se gli anelli dovessero risultare inclinati si utilizza una funzione che anziché contrassegnare l’anello con un singolo punto, utilizza il doppio punto

annullando la distanza tra i due punti per anello e quindi correggendo il problema dovuto all'inclinazione: successivamente è stata tracciata una linea perpendicolare provvisoria per segnare gli anelli seguenti che risulteranno perpendicolari a quello ottenuto con il doppio punto. C'è da sottolineare che durante il carotaggio non sempre si è riuscito a inserire la sonda fino al midollo della pianta e quindi conoscere l'età precisa della pianta non è possibile; si ricorre quindi a una stima di questa: il software offre una funzione, il Pith Locator, cioè si stima il raggio mancante al midollo e il numero di anelli in esso contenuto (figura 23) così da riuscire ad avere un'idea quasi

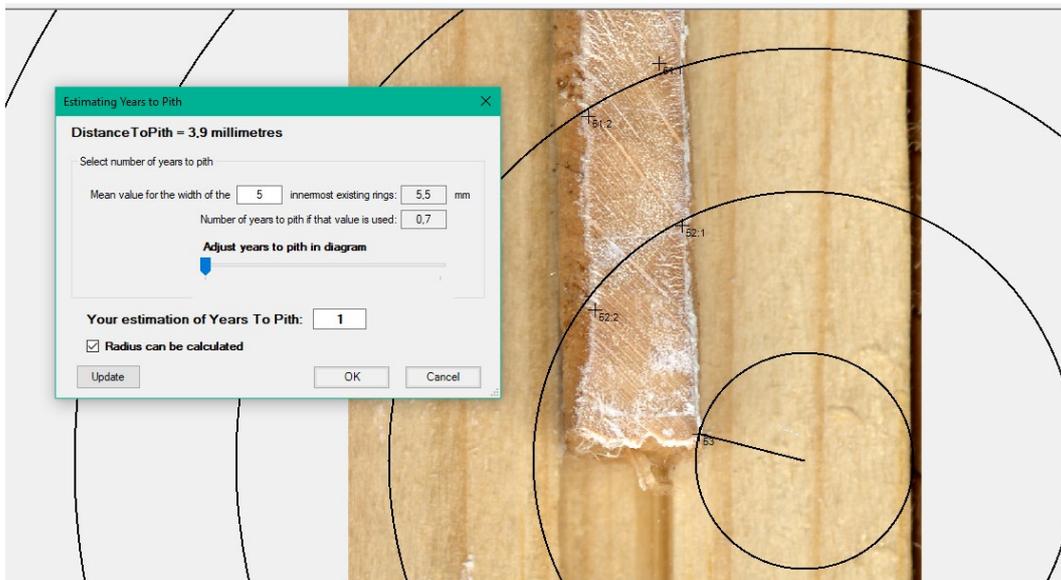


Figura 23: uso della funzione "Distance to pith" in CooRecorder.

precisa dell'anno di nascita della pianta:

Una volta che in tutte e trenta le carote sono stati evidenziati gli anelli di accrescimento ed è stato stimato il centro se mancante, si sono salvati i file ricavati in formato ".pos" così da essere utilizzati dal secondo software, Cdendro 9.3.1, il quale viene utilizzato per effettuare il cross dating cioè la datazione incrociata tra le carote. Innanzitutto le carote sono state esaminate a coppie (infatti ne sono state prelevate due per ogni pianta), aprendo i due file ".pos" contemporaneamente e selezionando una carota, solitamente la X, come riferimento. L'obiettivo è stato di fare in modo che il numero espresso dal "CorrC/TT" sia maggiore o uguale al valore 0.6.

Per fare in modo che il valore raggiunga e superi soglia di 0.6 bisogna fare in modo che gli andamenti delle due linee rappresentative delle carote siano il più simili possibili; se il valore dovesse risultare molto negativo invece, il più delle volte è a

causa dell'omissione di un anello iniziale: per verificarlo si sposta con la freccia destra o con quella sinistra la linea di riferimento che trasla di un anno (o più) e se il "corrC" da un valore negativo, o comunque molto basso, vuol dire che un anello iniziale non è

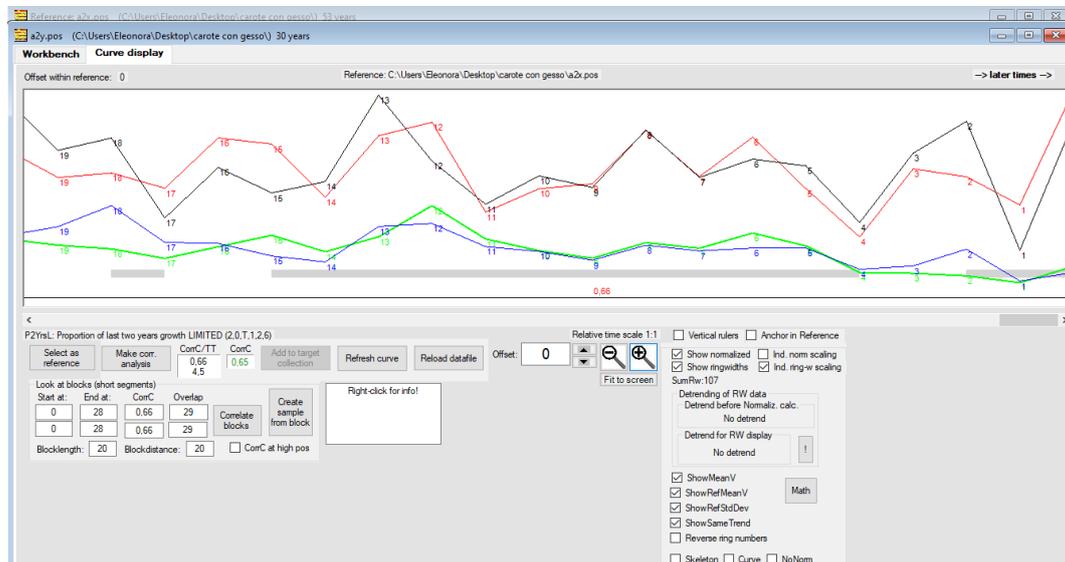


Figura 24: Utilizzo di Cdendro con esempio di $CorrC/TT = 0.66$

stato segnalato e quindi si corregge.

Una volta che le coppie di carote hanno superato o eguagliato il valore 0.6, come in figura 24, si crea una media per ogni coppia salvando il file in formato ".wid" per ottenere alla fine quindici medie. Queste quindici medie sono state poi cross datate tra di loro al fine di trovare qualche collegamento tra le piante: in questo caso è stato nuovamente utilizzato il software "Cdendro" ma la soglia di riferimento dal valore 0.6 si è abbassata a 0.4.

Infine, è stata processata una media finale che è stata utilizzata da un altro software gratuito, R: si tratta di un ambiente di tipo statistico distribuito sotto licenza GPL gratuitamente e vanta numerose funzioni tra cui la manipolazione di dati, calcoli e visualizzazione di grafici (Mineo 2003). Per rendere le analisi complete si è utilizzato RStudio, un ambiente di sviluppo che viene integrato per il linguaggio di programmazione di R; anch'esso è gratuito ed è sfruttato per combinare i diversi componenti di R (console, grafica ecc.) in un unico "banco di lavoro" (Allaire J. 2011). Per l'utilizzo di R e RStudio è stato utilizzato uno script, un file di comandi, creato appositamente per lo studio che intercorre tra anelli di accrescimento e clima.

Nello script è stato selezionato il file della media finale ottenuto con cDendro e successivamente sono state inserite le coordinate dell'area di campionamento,

45°56'49.031", 10°19'19.398" (45.946953, 10.322055) quindi il software ha relazionato in automatico i dati climatici con le coordinate esatte.

I primi due valori ottenuti tramite R sono stati i valori delle correlazioni che sono di due tipologie: intercorrelazione e autocorrelazione. La differenza consiste nel fatto che nell'autocorrelazione viene rimosso l'effetto "memoria": lo spessore di accrescimento in un determinato anno è dipendente dagli accrescimenti degli anni precedenti e nell'autocorrelazione quindi questa influenza viene eliminata.

Dopo aver calcolato le correlazioni, procedendo con le diverse analisi, sono state successivamente ricavate le cronologie stazionali usando come base di partenza la media delle cronologie originando il primo grafico chiamato "*spaghetti plot*": si tratta di una metodologia di visualizzazione di dati per la rappresentazione dei diversi andamenti: i flussi mostrati in grafico appaiono appunto come tanti spaghetti e da qui deriva il nome del grafico "*spaghetti-plot*". Le analisi hanno successivamente ricavato altri due parametri: EPS e SNR. EPS è una sigla che sta per "*express population signal*" il che significa che calcola l'omogeneità di una popolazione; più si avvicina al valore di massimo, che corrisponde al valore due, più una popolazione è considerata omogenea cioè le piante rispondono in egual modo ai segnali esterni. SNR è un'altra sigla che sta per "*signal to noise ration*": questo calcola se viene rilevato in una popolazione un qualsiasi disturbo esterno.

Dopo aver calcolato i due parametri si sono ricavati i due grafici delle cronomedie: quella standard e quella media residua: la differenza tra le due consiste nel fatto che nella media residua viene eliminata l'autocorrelazione che sarebbe l'effetto memoria. Sempre dal software R è stato poi calcolato un ulteriore parametro: la sensibilità. La sensibilità è una sorta di misura che indica la reattività degli alberi in concomitanza al cambiamento climatico; importanti sono valori compresi tra 0.1 e 0.5 che indicano una significativa reattività. Due ulteriori grafici molto importanti riguardano la correlazione di tre parametri tra loro: RWI (*ring width index*), che misura l'ampiezza degli anelli post *crossdating*, le temperature e le precipitazioni: le correlazioni univariate e quelle multivariate. I dati di precipitazioni e temperature sono stati ricavati grazie alla potenzialità di R che, dopo aver impostato le coordinate di latitudine e longitudine esatte, ha ricavato i dati climatici nell'esatta zona delle coordinate estrapolando i dati esatti dal dataset climatico "*cru ts*" 3.1 dell'università dell'Anglia

orientale (Norwich, Inghilterra): grazie a questo archivio di dati climatici sono state calcolate anche le relative medie di temperatura e precipitazioni per ogni mese che sono servite alla creazione del grafico “*Bagnouls-Gaussen*” (figura 17). Per la realizzazione di questo grafico si sono ricavati tutti i dati relativi alle precipitazioni e per quanto riguarda i dati delle temperature si sono selezionati quelli relativi agli anni 1960-1982 per poi mediarli con i dati ricavati dal sito [10] in quanto nei file dei dataset c’era un’assenza dei dati delle temperature dal 1980 in poi. Dato che la stazione di riferimento del sito era situata a un’altitudine di 370 metri e l’area di analisi è a 794 metri di altitudine, si sono scartati 0.65 °C per ogni 100 metri di dislivello e in questo modo è stata calcolata la media finale delle temperature.

L’ultimo step è stata la creazione del grafico finale di correlazioni a finestre mobili che scandisce il periodo in esame suddividendolo in blocchi di 25 anni andando ad analizzare la correlazione tra clima e accrescimento: le correlazioni positive sono evidenziate dalle caselle blu, quelle negative dalle caselle rosse. Le caselle contrassegnate da un asterisco simboleggiano una correlazione maggiore o uguale al 95% e quindi da prendere in considerazione perché molto significative per l’analisi.

Capitolo 4 - Risultati

Grazie al campionamento dei quindici esemplari di faggio e all'analisi delle carote da essi prelevati si è costruita una cronologia che parte dall'anno 1960 (albero più longevo dell'analisi) fino al 2019, anno di campionamento spaziando pertanto le analisi in un arco di tempo pari a sessanta anni.

Nella speranza che tutte e quindici le medie ricavate tramite Cdendro e CooRecorder arrivassero quantomeno al valore soglia questo non è accaduto: molte medie discostavano tra di loro in maniera molto marcata e alla fine quelle prese in esame sono state solamente sei rispetto alle quindici iniziali: queste sono state cross datate anche con quattro singoli file .pos (quelli ricavati da CooRecorder senza effettuare alcun tipo di media) che mostravano una correlazione superiore a 0.4 (valore soglia). I file utilizzati sono rispettivamente le medie A2X-A2Y, A3X-A3Y, A5X-A5Y, A6X-A6Y, A11X-A11Y, A15X-A15Y e i singoli file “.pos” sono stati A1Y, A7X, A8Y ed A12X: questi dieci file hanno formato una media finale sfruttata poi da R.

Come precedentemente descritto le serie prese in riferimento per l'analisi hanno avuto un numero di misurazioni pari a 463 (tabella 1).

Numero totale delle serie	Numero di misurazioni	Lunghezza media delle serie	Range anni	durata	Intercorrelazione media delle serie (std dev)	Autocorrelazione media delle serie (std dev)
10	463	46.3	60	1960-2019	0.23 (0.2)	0.35 (0.14)

Tabella 1: riassunto dei dati ricavati.

Come mostrato nella tabella 1, i valori sia dell'intercorrelazione media delle serie, sia dell'autocorrelazione media delle serie sono molto bassi, rispettivamente 0.23 e 0.35 e anche le relative deviazioni standard risultano avere valori altrettanto bassi, 0.2 e 0.14.

In figura 25 è rappresentato il grafico “*spaghetti-plot*”: il grafico mostra le cronologie individuali dei faggi. Ha come ascissa l’anno di formazione dell’anello di accrescimento e come ordinata le serie selezionate come valide ai fini dell’analisi. Si può notare come i flussi aumentino in maniera marcata dall’anno 1985 in poi, questo a causa del più elevato numero di dati da tale anno in poi.

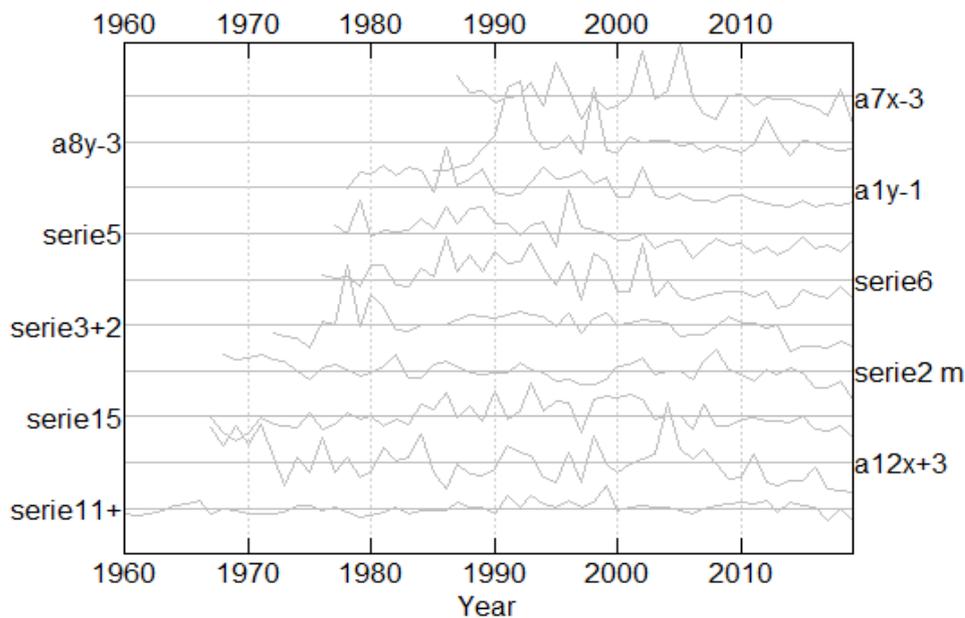


Figura 25: diagramma "spaghetti-plot".

Dalle analisi condotte, EPS è stato calcolato ed è risultato pari a 0.447 mentre il valore ricavato del parametro SNR è stato 0.807.

Il valore dell’EPS indica che comunque le piante della popolazione hanno risposto in maniera molto analoga tra di loro ai segnali esterni mentre il valore SNR, molto basso, mostra che la popolazione esprime una variabilità che non è causata da alcun tipo di segnale esterno.

In figura 26 sono rappresentate le cronomedie: quello superiore indica l’andamento della cronologia media standard (Std) mentre il secondo quello della cronologia media residua (Res). Come ascissa vengono posti gli anni di formazione degli anelli mentre in ordinata il “*sample depth*” cioè l’ampiezza dell’anello. Come si può notare dai due grafici sono presenti uno sfondo grigio, una linea nera, una grigia e infine una rossa. Lo sfondo grigio del grafico indica il numero totale di campioni che in un dato anno vanno a formare la cronologia, infatti l’area del poligono aumenta a partire dall’anno 1985 circa come si può anche notare in figura 25 dove aumentano i flussi proprio

perché aumenta il numero di campioni che vanno a costituire la cronologia. La linea nera è il riferimento che sottolinea la metà dei valori della legenda, la linea rossa mostra la tenenza dei campioni in maniera però “ammorbidita” e infine quella grigia mostra i valori misurati indicizzati.

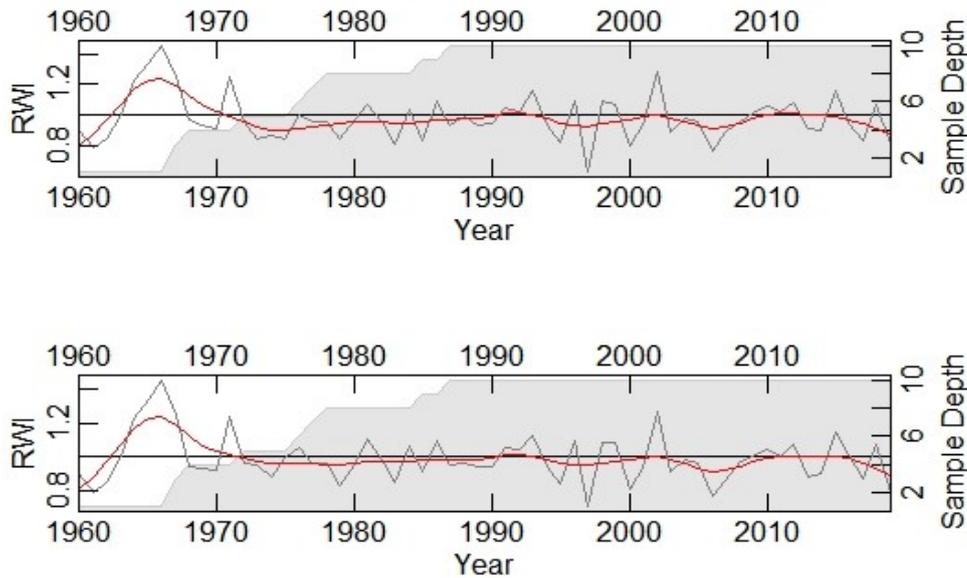


Figura 26: cronologia, rispettivamente, grafico superiore Std, grafico inferiore Res.

Il valore trovato di sensibilità è pari a 0.138 che rileva appunto un’attiva risposta ai cambiamenti climatici (valore compreso tra 0.1 e 0.5).

Il primo grafico (figura 27) è rappresentativo della correlazione univariata, vale a dire che sono stati analizzati e correlati RWI, mesi, precipitazioni e temperature mese per mese senza considerare l’influenza dei mesi precedenti su quello in esame; il secondo grafico (figura 28) invece è rappresentativo della correlazione multivariata cioè mantenendo l’effetto dell’influenza dei mesi precedenti.

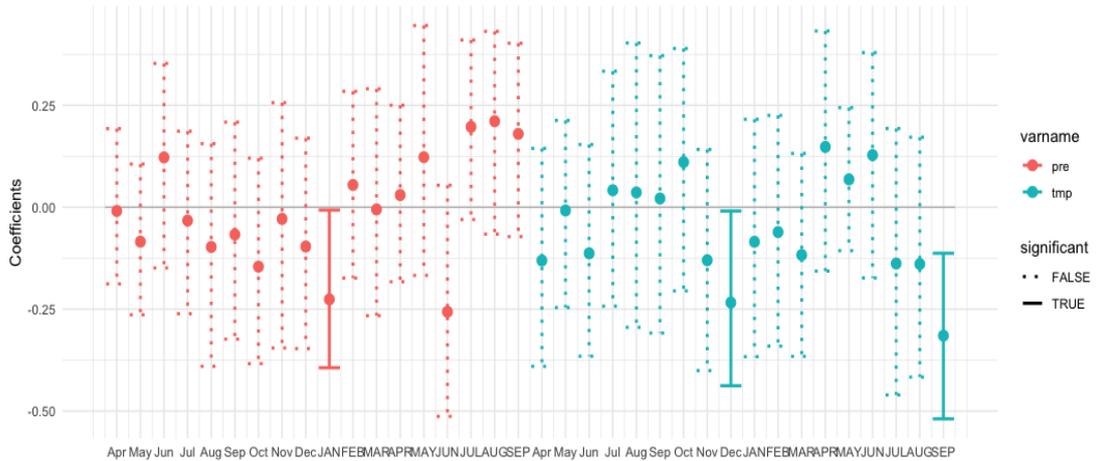


Figura 27: correlazione univariata.

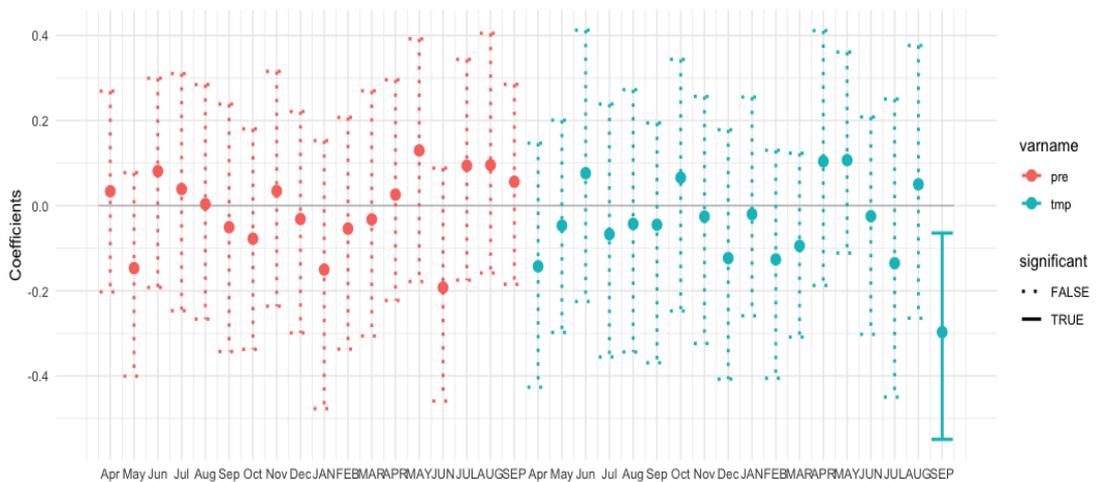


Figura 28: correlazione multivariata.

Come si può notare, entrambi i grafici sono caratterizzati da segmenti di due colori diversi: quelli rossi si riferiscono alle precipitazioni mentre quelli azzurri alle temperature. L'ascissa riporta i mesi dell'anno: i mesi scritti in carattere maiuscolo si riferiscono all'anno corrente mentre quelli in carattere minuscolo sono riferiti all'anno passato. Le linee che risultano essere continue come quelle in figura 27 e 28 sono espressive di correlazioni significative cioè esprime il legame stretto che intercorre tra la formazione dell'anello con la temperatura (il segmento è di color azzurro) e tra anello e precipitazioni (il segmento è di color rosso). Le linee tratteggiate invece, presenti in entrambi i grafici, non sono da prendere in considerazione perché corrispondono a correlazioni non significative.

Nella correlazione univariata (figura 27) si notano correlazioni significative negative per quanto riguarda le precipitazioni nel mese di gennaio dell'anno corrente e per quanto riguarda le temperature nei mesi di dicembre dell'anno precedente e di settembre dell'anno corrente. Nella correlazione multivariata (figura 28) invece, significativa è solamente la correlazione delle temperature di settembre dell'anno in corso che è anch'essa negativa.

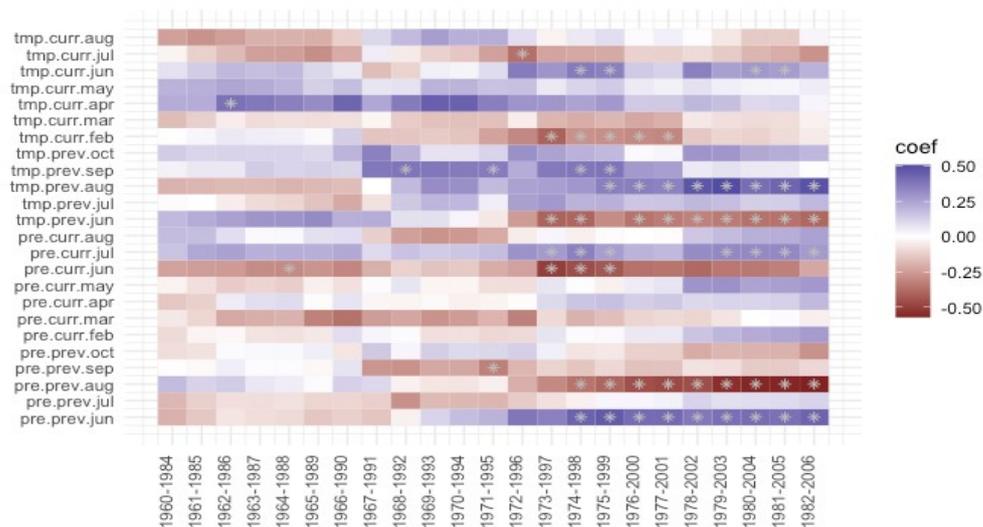


Figura 29: correlazioni a finestra mobile di 25 anni.

In figura 29 sono riportati in ascissa gli anni scanditi in blocchi da 25 anni ma arrivano solamente al 2006 per mancanza di dati affidabili e quindi sono stati tralasciati gli anni successivi. In ordinata sono rappresentati i mesi dell'anno dove "prev" è l'anno precedente e "curr" è l'anno corrente e infine, a destra si può notare la legenda con le gradazioni di colore. Importante quindi risultano essere le correlazioni positive di temperature di agosto dell'anno precedente e negative di giugno dell'anno precedente e in misura minore di febbraio dell'anno corrente e di settembre dell'anno precedente; per ciò che concerne le precipitazioni risulta una correlazione positiva in giugno dell'anno precedente e in luglio di quello corrente e una correlazione negativa invece ad agosto dell'anno precedente. Meno significative sono le correlazioni di giugno dell'anno corrente. Gli asterischi rimanenti presenti nel grafico sono collocati sia nelle temperature e nelle precipitazioni in maniera abbastanza sparsa il che sta ad indicare una significatività molto elevata ma non sono presi in considerazione in quanto non rappresentano un andamento significativo ma solo dei valori casuali.

Capitolo 5 - Discussioni

Dai dati ricavati grazie ai software, i quali hanno permesso di ricavare analisi dendroclimatiche molto sofisticate, sono emerse molte informazioni: innanzitutto dai grafici delle correlazioni univariate e multivariate si sono trovate solamente risposte negative per le precipitazioni di gennaio e per le temperature di dicembre e di settembre. Una correlazione negativa indica che, o c'è un aumento di intensità della precipitazione e diminuisce la crescita dell'anello, o diminuendo questa intensità aumenta la crescita dell'anello; l'anello preso in considerazione è quello che si formerà in primavera per gennaio e settembre mentre è quello che si formerà l'anno successivo per dicembre. Riprendendo il grafico di temperature e precipitazioni si analizzano i dati confrontandoli con il grafico in figura 30 (ripresa del grafico in figura 18).

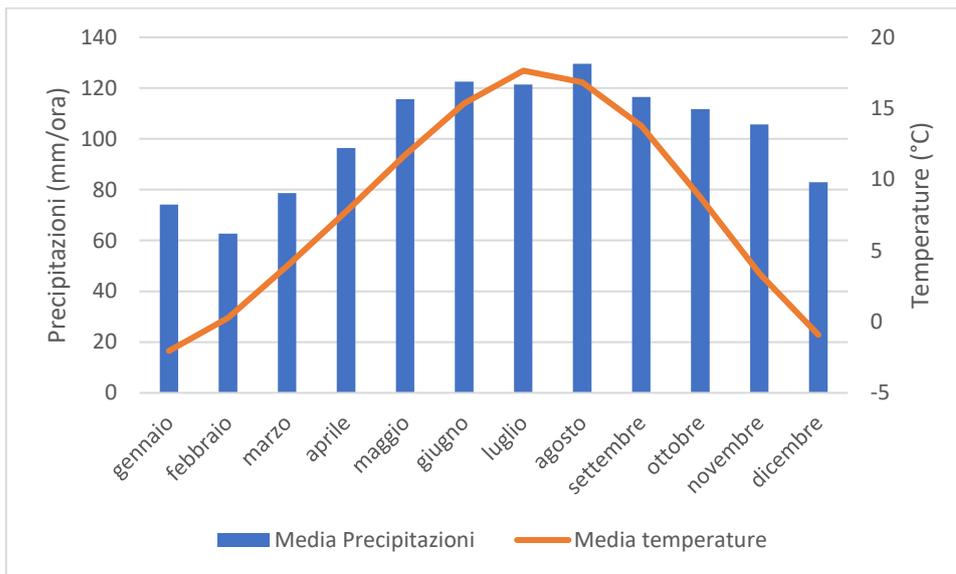


Figura 30: Grafico Bagnouls-Gaussen riferito all'arco di tempo 1960-2012.

Le precipitazioni hanno una correlazione negativa solo per gennaio: dal grafico sopra riportato si può notare che la precipitazione di gennaio, pari a 74.15 mm /ora, non si discosta molto dal minimo che corrisponde a febbraio (62.67mm/ora): questo potrebbe corrispondere alla situazione di deficit idrico da parte della pianta. Il faggio, non avendo un apparato radicale fittonante non scende in profondità ma le sue radici si spargono lungo tutta la superficie del terreno quindi un approvvigionamento idrico costante è necessario, oltre alla sopravvivenza, anche al suo benessere per non creare

situazioni di sofferenza per la pianta. Le temperature invece riguardano settembre e dicembre: le temperature di settembre e di dicembre hanno avuto anch'esse un'influenza negativa: per quanto riguarda settembre le temperature medie sono state attorno ai 13.75°C, un grado più alte della media del secolo scorso. Questo potrebbe corrispondere al fatto che a settembre corrisponde la fase vegetativa dove si attua l'ultima parte della fotosintesi, quindi se le temperature fossero alte o comunque relativamente miti questo potrebbe provocare una situazione di leggero stress idrico comporterebbe la formazione di poco legno; in genere, comunque, settembre dell'anno in corso è un periodo di relazione troppo tardivo da analizzare e da ritenere affidabile quindi generalmente si tralascia.

Per dicembre invece, le temperature medie corrispondono a -0.91°C e questa situazione pone la pianta in situazione di stress: in presenza di temperature molto basse le gelate sono molto frequenti e il faggio ne è molto sensibile a causa della corteccia che è molto fine.

Dal grafico a finestre mobili (figura 29) un'influenza molto positiva si è avuta dalle precipitazioni di giugno dal 1974 al 2006 e dalle temperature rilevate in particolare ad agosto dell'anno precedente sempre in questo arco temporale. Ciò che ha invece agito negativamente sono state le temperature di giugno dell'anno precedente e le precipitazioni di agosto sempre dell'anno precedente e sempre riferito allo stesso periodo di tempo:

1974-2006	Influenza positiva	Influenza negativa
Temperature	Agosto	Giugno
Precipitazioni	Giugno	Agosto

Analizzando il periodo di tempo considerato si è creato il grafico che riassume la quantità delle precipitazioni medie mensili riguardanti il lasso di tempo 1974-2006 (figura 31).

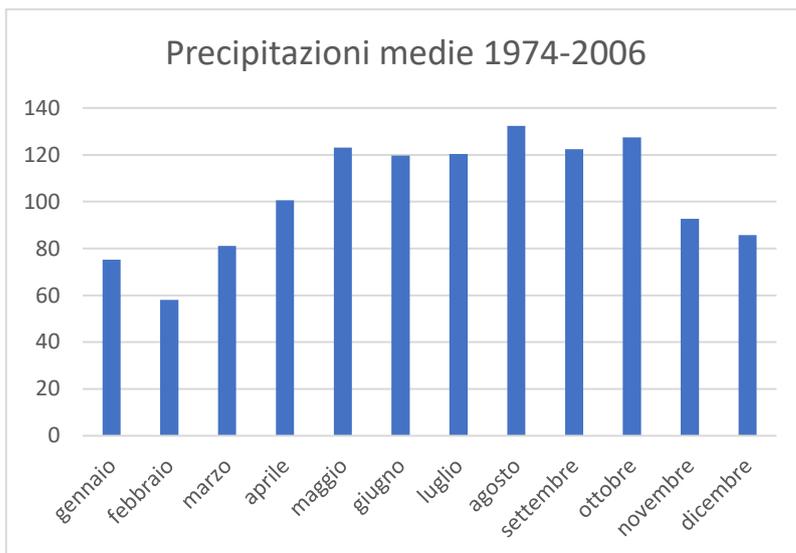


Figura 31: Dati delle precipitazioni medie mensili 1974-2006.

Il grafico in figura 31 mostra che il mese contraddistinto da una maggiore quantità di precipitazioni è agosto: l'influenza di agosto per la formazione dell'anello dell'anno successivo è stata rilevata come una correlazione negativa e questo è causata appunto dal fatto che le precipitazioni molto consistenti provocano un'influenza negativa della crescita dell'anello dell'anno successivo: un'elevata quantità di acqua, magari a causa di un fenomeno di estremo, potrebbe creare situazioni temporanee di ristagni in quanto la quantità elevata non riesce a filtrare così velocemente come in un evento di precipitazioni ordinario oppure a causa di un'elevata quantità di eventi piovosi la copertura nuvolosa non ha permesso una quantità di luce in ingresso sufficiente.

Invece, è stata rilevata una correlazione positiva tra le precipitazioni di giugno, molto vicine al record di agosto, e la crescita dell'anello, sempre riferita all'anno successivo, che aumenta: a giugno si verifica il picco di crescita vegetativa e il faggio necessita di un apporto costante di acqua sotto forma di precipitazioni in quanto, come spiegato precedentemente, ha un apparato radicale superficiale che non gli permette di riuscire a trovare acqua in profondità. Le piogge estive risultano un fattore molto importante e sono benefiche per la produzione di legno (Biondi M. 1993).

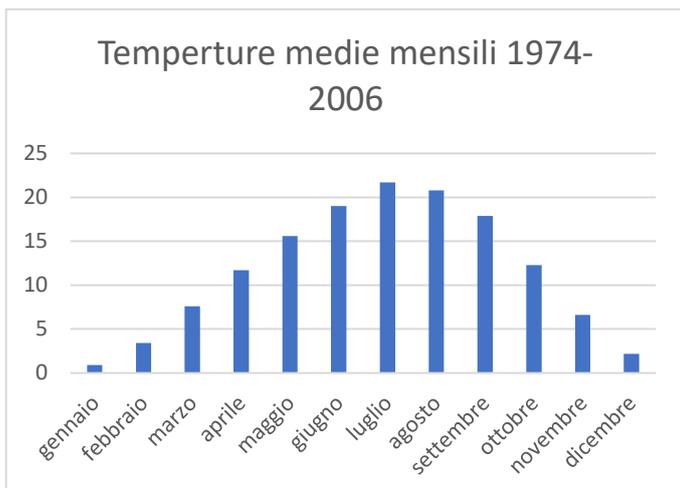


Figura 32: Dati delle temperature medie mensili 1974-2006.

Il grafico in figura 32 mostra che le temperature medie sia di agosto (20.8 °C) che quelle di giugno (19 °C) sono state molto vicine al massimo, rilevato a luglio e pari a 21.7 °C. Questo va analizzato insieme alle funzioni di risposta: le temperature di agosto, alte, superiori persino ai venti gradi, hanno influenzato positivamente la formazione dell'anello per l'anno seguente: le temperature hanno favorito lo sviluppo della crescita della pianta e la riserva dei nutrienti per il riposo vegetativo; le temperature di giugno, anch'esse elevate hanno invece avuto un'influenza negativa sempre per quanto riguarda la formazione dell'anello dell'anno successivo: essendo giugno il mese in cui la pianta necessita di acqua e nutrienti, temperature troppo elevate potrebbero fare in modo che le precipitazioni, anche se consistenti, non permangano in un tempo consono affinché la pianta riesca ad assimilarne una quota sufficiente.

Sempre nel grafico a finestre mobili (figura 29) nei mesi di giugno ed agosto dell'anno precedente alla formazione dell'anello viene evidenziato un cambiamento di tendenza: le linee orizzontali che si riferiscono alle temperature e alle precipitazioni di giugno e agosto subiscono un cambiamento di correlazione (da colore blu a colore rosso e viceversa) che alla fine del periodo diventa significativa (presenza di asterischi): questa inversione di tendenza, da positiva a negativa (e opposto) simboleggia che il cambiamento climatico può avere influenzato l'accrescimento secondario dei faggi in quanto, nel corso degli anni, le condizioni climatiche hanno invertito l'effetto sulla crescita dei faggi.

Questi risultati però sono molto limitati, si parla infatti di inversioni di tendenza significativa in soli due mesi dell'anno riferiti ad un arco temporale relativamente breve (32 anni). Per capire se è statisticamente significativa bisognerebbe utilizzare un test apposito che non sono riuscita a sfruttare.

C'è poi da sottolineare che la stazione di crescita dei faggi è caratterizzata da temperature e precipitazioni che ne agevolano la crescita: temperature ottimali combinate con precipitazioni sempre abbastanza consistenti e frequenti creano un ambiente che promuove l'accrescimento secondario e, in particolar modo durante la stagione estiva, fa crescere con vigore le piante. Situazioni di stress sono riscontrabili in situazioni di estremo o in condizioni limitanti come avviene, ad esempio, in caso di ristagno idrico o di siccità. Infatti, nello studio condotto da Dulamsuren (*et al.* 2017), riportato nel capitolo 1.5, si sono dimostrate delle ottime correlazioni degli anelli di accrescimento dei faggi con il cambiamento climatico: gli anelli di accrescimento dei faggi ad alte quote sono risultati controllati dalle temperature mentre nelle altitudini più basse dalle precipitazioni estive e influenzati negativamente dalle temperature estive; le elevate temperature e la scarsità di precipitazioni nel periodo estivo comporta una situazione di siccità che viene rilevata negli anelli del faggio dato anche che la siccità è uno dei suoi principali fattori limitanti.

Un'altra motivazione che può essere presa in considerazione si riscontra partendo dal campionamento fino alle analisi: il legno del faggio è un legno molto duro quindi difficile da carotare; la forza da impiegare per inserire la sonda deve essere elevata e costante, altrimenti le carote legnose si spaccano: questo è purtroppo accaduto in molte carote, quindi, potrebbe averle rovinare limitando la loro corretta lettura. Inoltre, il faggio è caratterizzato da un legno molto chiaro, quasi bianco, che rende molto difficoltosa l'individuazione degli anelli di accrescimento anche dopo l'ausilio del gesso :quindi l'omissione di uno o più anelli potrebbe essere avvenuta molto facilmente e potrebbe aver reso le datazioni e quindi il *crossdating* non coerenti con la vera età della pianta; come riportato da Biondi (1993), il "*crossdating*" nel faggio è possibile ma non è facile: nello studio effettuato da Piovesan (*et al.* 2003), nella costruzione delle cronologie individuali si sono riscontrate numerose difficoltà a causa di anelli troppo stretti, incompleti o mancanti soprattutto verso il midollo.

Correlato a questo, anche il non essere riuscita ad arrivare fino al midollo in tutte gli esemplari ha avuto un'incidenza negativa perché sì, la funzione "*distance to pith*" mi ha permesso di calcolare il centro della pianta ma tra una stima e il vero risultato è sempre meglio avere un'analisi concreta. Infine, l'arco temporale considerato è breve per la ricerca di una tendenza e anche l'età degli alberi indica che si sono esaminati faggi ancora relativamente giovani che non riescono a evidenziare con abbastanza chiarezza un cambiamento climatico.

I risultati ottenuti nel mio studio sono analoghi agli studi effettuati da un collega che ha conseguito le medesime analisi in un'area che corrisponde ad un'altitudine compresa tra gli 800 e i 950 metri: anche in questo caso i faggi esaminati non hanno mostrato alcuna analogia significativa tra la loro crescita secondaria e il cambiamento climatico (Sigala 2020).

Capitolo 6 – Conclusioni

Grazie al lavoro svolto per il tirocinio si sono studiate le influenze che possono esserci state tra il cambiamento climatico e l'accrescimento secondario di quindici esemplari di faggi selezionati in località Astrio nel comune di Breno (BS).

Le correlazioni positive sono state in minoranza rispetto a quelle negative. Per quanto riguarda le correlazioni positive, si sono riscontrate solo ed esclusivamente nelle funzioni a finestra mobili per ciò che riguarda le precipitazioni di giugno e le temperature di agosto per la formazione dell'anello di accrescimento l'anno successivo; correlazioni negative invece sono state riscontrate sia nel grafico a finestre mobili che nelle correlazioni univariate e multivariate: in quest'ultime per la formazione dell'anello nell'anno in corso sono rilevanti solo le precipitazioni di gennaio; per la formazione dell'anello l'anno successivo invece sono spiccate le temperature di dicembre e le precipitazioni di settembre. Il grafico a finestre mobili ha evidenziato influenze negative per la formazione dell'anello dell'anno successivo solamente nelle temperature di giugno e nelle precipitazioni di agosto.

Le correlazioni negative ricavate però non hanno un numero consistente di risultati che potrebbero essere presi in considerazione e non riescono a formare una forma di tendenza che possa correlare il cambiamento climatico con l'accrescimento secondario dei faggi. Questo invece accade per le funzioni di risposta mobili che mostrano una tendenza significativa per i mesi di giugno ed agosto che non è stata però giustificata come significativa statisticamente.

C'è da tener presente che si sono riscontrati problemi durante la fase di carotaggio che, in combinazione agli anelli poco visibili e quindi non completamente individuabili, potrebbero aver causato errori sia nella raccolta dati che poi si è rispecchiata nei dati sfruttati dai diversi software; inoltre, l'arco temporale analizzato è relativamente breve per trovare una tendenza quindi un'ulteriore analisi potrebbe essere riferita ad alberi molto più longevi che hanno a disposizione più anelli per l'analisi.

La motivazione più probabile per cui non è stata trovata una tendenza è che probabilmente dai faggi che risultano situati in un luogo e in una situazione di variabile climatica dove la pianta non è mai in una condizione di stress, è difficile avere dei riscontri di “sofferenza” o di influenze esterne riscontrabili negli anelli di accrescimento.

Nonostante gli scarsi riscontri ottenuti il cambiamento climatico è un problema che va ad influenzare il mondo vegetale, in particolare l’innalzamento delle temperature e la riduzione di precipitazioni potrebbero creare, in un futuro, una situazione che non consente una buona crescita dei faggi. Il faggio potrebbe perdere la sua posizione predominante negli ecosistemi: con l’innalzamento delle temperature i limiti superiori continueranno a salire e i boschi saranno costituiti sempre più da specie alloctone che potrebbero prendere il sopravvento sul faggio.

Capitolo 7 - Sitografia

- [1] <https://treccani.it>
- [2] <https://www.nasa.gov/>
- [3] <http://www.cclimatt.eu>
- [4] <https://www.bbc.com/>
- [5] <https://www.nationalgeographic.com>
- [6] <https://gatesnotes.com>
- [7] <https://ourworldindata.org/>
- [8] <https://climatekids.nasa.gov>
- [9] <http://www.geoportale.regione.lombardia.it/>
- [10] <https://it.climate-data.org/>

Capitolo 8 - Bibliografia

Alberti M, 2019. Conoscere gli alberi e gli arbusti d'Italia. Editoriale programma s.r.l. Pagine 104-105.

Allaire J.J., 2011. RStudio: Integrated Development Environment for R. University of Warwick, Coventry, UK.

Alley R. B., 2003. Abrupt Climate Change. Science. Volume 299.

Baldino M., 2011. Il Faggio in Italia: dendrocronologia e cambiamenti climatici. volume 122.

Biondi F., 1993. Climatic signals in tree rings of *Fagus sylvatica* from central Apennines, Italy. *Acta Oecologica*. 14(1): 57-71.

Cavin L., Jump A.S. 2016. Highest drought sensitivity and lowest resistance to growth suppression are found in the range core of the tree *Fagus sylvatica* L. not the equatorial edge. *Global change biology*.

Cook E.R., Kairiukstis L.A., 1990. Methods of dendrochronology, Applications in the Environmental Sciences. Kluwer academic publishers.

Cotana F., Rossi F., Filippini M., 2007. Soluzioni per il controllo del riscaldamento globale. CIRIAF - Centro Interuniversitario di Ricerca sull'Inquinamento da Agenti Fisici. Università degli Studi di Perugia.

Di Filippo A., Piovesan G., Schirone B., 2004. La dendroecologia applicata alle foreste vetuste: il caso delle faggete italiane. Dipartimento di tecnologie, ingegneria e scienze dell'Ambiente e delle Foreste (DAF). Università della Tuscia, Viterbo.

Douglass A.E., 1941. Crossdating in Dendrochronology. Laboratory of Tree-Ring Research. Journal for forestry. Volume 39. University of Arizona.

Dulamsuren C., Hauck M., Kopp G., Ruff M., Leuschner C., 2017. European beech responds to climate change with growth decline at lower, and growth increase at higher elevations in the center of its distribution range (SW Germany). *Trees*. Volume 31. Pagine 673-686.

Ellenberg H., Leuschner C. 2010. *Vegetation Mitteleuropas mit den Alpen in ökologischer, dynamischer und historischer Sicht*, 6th edn. Ulmer, Stuttgart.

Fleming J. R., Schmidt G., Plass G. N., 2020. Carbon Dioxide and the Climate. americanscientist.org.

Hashimoto K. 2019. *Global Carbon Dioxide Recycling For Global Sustainable Development by Renewable Energy*.

Lecchi A., 2019. *Analisi dendroclimatologia dei fattori climatici che influenzano l'accrescimento di *Larix decidua* in località Bazena (BS)*. Facoltà di scienze agrarie e alimentari. Università degli studi di Milano.

Lietutaghi P. 1975. *Il libro degli alberi e degli arbusti*. Rizzoli editore.

Mann M. E., Hughes, M. K., 2002. Tree-Ring Chronologies and Climate Variability. *Science*. Volume 296. Pagina 848.

Martinez L. 2000. Laboratory of Tree-Ring Research. University of Arizona.

Maugini E., Maleci Bini L., Mariotti Lippi M., 2019. *Botanica farmaceutica*. Piccin.

Mineo M. A. 2003. *Una guida all'utilizzo dell'ambiente statistico R*. Dipartimento di scienze statistiche e matematiche "S.Vianelli". Università degli studi di Palermo.

Motta R. 1996. Metodi e problemi nella determinazione delle età di alberi viventi in studi ecologici o di dinamica forestale. EM linea ecologica. Volume 37. Pagine 2-9.

Orombelli G., 2005. Cambiamenti climatici. Geografia Fisica Dinamica Quaternaria. Volume 7. Pagine 15-24.

Peel B. L., Finlayson T.A., 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. Hydrology and Earth System Sciences Discussions. European Geosciences Union. Volume 4. Pagine 439-473.

Pignatti G., 2011. La vegetazione forestale di fronte ad alcuni scenari di cambiamento climatico in Italia. Rivista di Selvicoltura ed Ecologia Forestale. Volume 8. Pagine 1-12.

Piovesan G., Bernabei M., Di Filippo A., Romagnoli M., Schirone B., 2003. A long-term tree-ring beech chronology from a high elevation old-growth forest of Central Italy, *Dendrochronologia*, 21(1), 13-22.

Ray F.E., Susan E.E., 2015. La biologia delle piante di Raven, settima edizione italiana condotta sull'ottava edizione americana. Zanichelli.

Ruggiero L. 2016. Dendrocronologia: una scienza per la storia e per l'ambiente. Piante da museo. Volume 38.

Sigala L. 2020. Relazione clima-accrescimento in una faggeta di Edolo, Vallecamonica (BS). Facoltà di scienze agrarie e alimentari. Università degli studi di Milano.

Solomon E.P, Martin C.E., Martin D.W., Berg L.R. 2017. Struttura e processi vitali nelle piante. VII edizione. EdiSES.

Ringraziamenti

Vorrei ringraziare tutti quelli che mi hanno aiutata ad affrontare questo percorso.

Ringrazio innanzitutto il mio relatore Giorgio Vacchiano che mi ha proposto questo tirocinio e mi ha seguito ed aiutata lungo tutto il percorso riuscendo a fornirmi tutto il materiale e a trasmettere la sua passione per questa disciplina.

Ringrazio i miei genitori e mio fratello Leonardo che mi sono sempre stati accanto, mi hanno dato la possibilità di affrontare questo percorso di studi e hanno sempre creduto in me.

Ringrazio Dario che mi ha supportata e sopportata pazientemente da sempre e che lo fa tutt'ora.

Ringrazio tutti i miei amici che mi hanno regalato serate davvero speciali e fantastiche: in particolare ringrazio Andrea e Silvia che mi hanno fatto trascorrere momenti indimenticabili e mi son sempre state accanto.

Ringrazio infine Angela che mi ha dato un grosso aiuto in tutto.