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 IN UNA FAGGETA DI EDOLO, VALCAMONICA (BS)

Relatore: Prof. Giorgio Vacchiano

Elaborato finale di: Sigala Luca
Matricola: 789952

Anno Accademico 2019-2020

INDICE

Riassunto 2
Capitolo 1 – Introduzione: il faggio e il clima 3
1.1 – La specie studiata: *Fagus sylvatica* 3
1.1.1 - Descrizione e caratteristiche 3
1.1.2 – Distribuzione spaziale 5
1.1.3 – Habitat ed ecologia 6
1.2 – Il cambiamento climatico e degli ecosistemi 8
1.3 – Effetti del clima sulla crescita di *Fagus sylvatica* 16
1.3.1 – Effetti dell'arricchimento atmosferico di CO_2 18
1.3.2 – Effetti della siccità 20
1.3.3 – Effetti del ristagno e delle inondazioni 22
1.3.4 – Conclusioni 23
Capitolo 2 – Obiettivi 24
Capitolo 3 – Materiali e metodi 25
3.1 – Analisi territoriale 25
3.2 – Area di studio 33
3.3 – La dendrocronologia 34
3.4 – Metodi 38
3.4.1 – Metodi di campionamento 38
3.4.2 – Metodi di preparazione dei campioni 39
3.4.3 – Metodi di analisi dei campioni 41
Capitolo 4 – Risultati 46
Capitolo 5 – Discussione 53
Capitolo 6 – Conclusioni 58
Capitolo 7 – Bibliografia e sitografia 60
7.1 - Bibliografia 60
7.2 - Sitografia 64
Ringraziamenti 65

Riassunto

Il clima ed i suoi cambiamenti sono sempre più un tema di attualità, trovandosi al centro di numerosi studi e dibattiti scientifici.

Negli ambienti montani, dove la vita delle piante può essere al limite, le variazioni climatiche possono avere una maggiore incisività sulla loro crescita.

La finalità di questo elaborato consiste nel ricercare eventuali risposte da parte del faggio (*Fagus sylvatica*) ai principali fattori climatici, quali la temperatura e le precipitazioni, ed ai loro cambiamenti nel tempo mediante l'utilizzo della dendrocronologia. A tal proposito si sono campionati 18 faggi in una zona circoscritta del Monte Faeto (Edolo, BS) situata ad 800-950 metri di altitudine, con l'obiettivo di costruire una cronologia media dell'accrescimento per questo sito di studio ed utilizzarne i risultati per correlare le differenti ampiezze anulari con i relativi dati climatici.

Una volta effettuato il campionamento utilizzando un succhiello di Pressler, le carote estratte sono state fissate su supporti in legno, levigate e scansionate in modo da poterle analizzare mediante l'utilizzo di software appositamente concepiti e sviluppati per la dendrocronologia.

Dall'analisi è emerso come le temperature di luglio e gennaio, così come le precipitazioni dei mesi di giugno e luglio, siano favorevoli alla crescita dei faggi campionati, mentre le temperature di settembre sono risultate essere sfavorevoli in tal senso.

Le correlazioni mobili, infine, non hanno evidenziato particolari cambiamenti od inversioni di tendenza nel corso del tempo, pertanto si conclude che il cambiamento climatico non abbia avuto impatti significativi per quanto riguarda l'area di studio nel periodo di tempo considerato. Questo non esclude, tuttavia, che in un futuro prossimo, complice l'aumento ulteriore delle temperature medie a causa del surriscaldamento globale, si possa verificare un numero sempre crescente di fenomeni estremi. Quest'ultimi rappresentano un pericolo tangibile per il faggio che, all'interno del proprio habitat, rischierà di perdere la sua dominanza naturale nei confronti di altre specie e di conseguenza essere forzato ad occupare il piano dominato ed assumere un portamento arbustivo o, addirittura, a scomparire.

Capitolo 1 – Introduzione: il faggio e il clima

1.1 – La specie studiata: *Fagus sylvatica*

Classificazione scientifica:

Dominio – Eukaryota

Regno – Plantae

Divisione – Magnoliophyta

Classe – Magnoliopsida

Ordine – Fagales

Famiglia – Fagaceae

Genere – *Fagus*

Specie – *F. sylvatica*

1.1.1 - Descrizione e caratteristiche

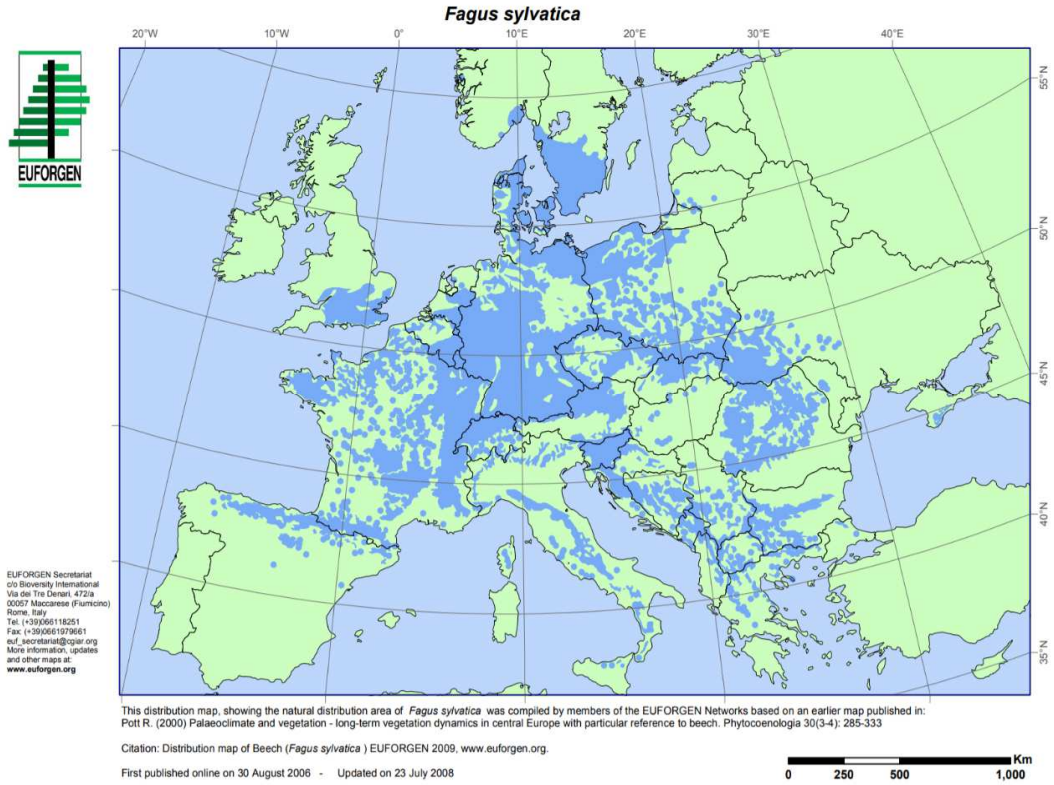
Il faggio (*Fagus sylvatica* L., 1753), detto anche faggio occidentale o faggio comune, è un albero appartenente al genere *Fagus* ed alla famiglia Fagaceae. Le piante appartenenti a questa famiglia, di cui fanno parte anche querce e castagni, costituiscono molti boschi alpini ed appenninici di rilievo in termini di importanza ambientale, economica e forestale.

Il faggio non è un albero molto longevo, difatti può arrivare “soltanto” all’età di 200-300 anni ed in buone condizioni edafiche può raggiungere i 40 metri di altezza ed i due metri di diametro, tuttavia nella norma non si superano, nemmeno nelle faggete mature, i 30-35 metri di altezza e diametri di 80-100 centimetri.
La corteccia, che caratterizza il faggio rispetto a tutte le altre specie boschive, è liscia e sottile, di color grigio-cenerina, dotata di caratteristiche striature orizzontali e, spesso, macchie biancastre per la presenza di licheni. La sua liscezza è dovuta dalla rapida disgregazione degli strati esterni sotto l’azione degli eventi meteorici, attività di microrganismi e dalla spiccata superficialità del fellogeno.

Una caratteristica unica del faggio è anche la formazione alla base del tronco di piccole protuberanze sferoidali dette sferoblasti, o nodi, che non possono però rinnovare agamicamente la pianta; sempre nella zona del colletto, infine, con l’avanzare dell’età, si può formare anche un ritidoma con screpolature e fessurazioni.
Il legno di faggio è duro, compatto, durevole, pesante, dotato di una resistenza notevole ed in grado di conservare nel tempo la sua solidità e duttilità alla lavorazione; ha, inoltre, un buon potere calorifico e la sua combustione è lenta.

In figura, una tipica faggeta. (Fonte: web)

1.1.2 – Distribuzione spaziale



Mappa geografica raffigurante la distribuzione naturale di Fagus sylvatica (in azzurro) in Europa. (Fonte: EUFORGEN).

Il faggio occidentale (*Fagus sylvatica*), come si può intuire dal nome ed osservare nell'immagine soprariportata, copre un areale che corrisponde all'incirca con tutta l'Europa occidentale. Questa specie si estende a sud fino alla Sicilia settentrionale (Etna e Madonie), alla Grecia, Parnaso; ad ovest fino in Cornovaglia e sui monti della Galizia spagnola; ad est in Moldavia, a tratti anche oltre il fiume Dnestr ed in Crimea orientale; a nord arriva fino al 60° parallelo, in Scandinavia meridionale, comparendo in alcune stazioni di Oslo e Bergen.

In Italia il faggio è presente sulle Alpi, sugli Appennini, sui Nebrodi, sulle Madonie e sull'Etna, mentre manca allo stato naturale in Sardegna, regione in cui è stato introdotto per scopi selvicolturali e in cui la vegetazione climatica dell'orizzonte montano (1200–1800 m) è rappresentata da consorzi di agrifoglio e taxus. Sugli Appennini forma boschi puri raggiungendo il limite superiore della vegetazione arborea; sulle Alpi l'optimum per il faggio si ritrova nella fascia montana del distretto esalpico, dove forma estesi popolamenti puri. Nelle fasce a quote

superiori o inferiori, i popolamenti subiscono l'ingresso di altre specie più resistenti alle gelate (come l'abete) o più tolleranti all'aridità (come il carpino nero).
Non è da trascurare il fatto che la sua distribuzione sia stata anche in gran parte dettata dall'uomo, mosso da scopi economici, che nel tempo ne ha selezionato la composizione secondo le proprie esigenze, favorendo o sfavorendo il faggio in base alla richiesta del mercato del periodo e/o del luogo, ed alterando inevitabilmente le associazioni naturali e, di conseguenza, gli ecosistemi.

1.1.3 – Habitat ed ecologia

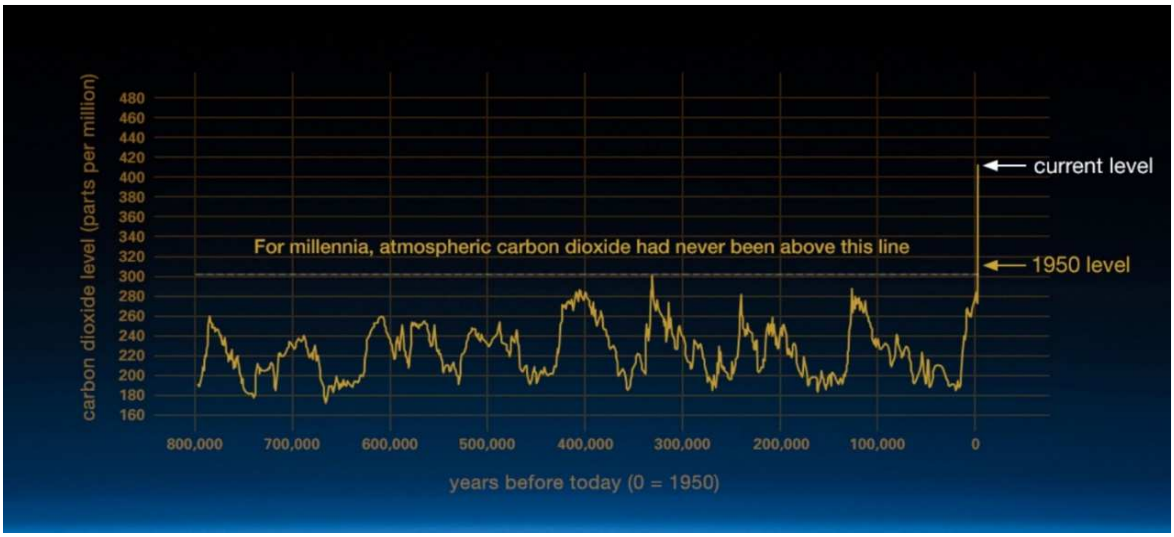
Fagus sylvatica è una specie mesofila e sciafila, che vive in ambienti con abbondanti precipitazioni ed elevate umidità, ma allo stesso tempo è sfavorito dal ristagno idrico nel terreno, dal freddo troppo intenso e dalla siccità prolungata.
Le depressioni profonde od oscure delle valli, così come le sommità troppo asciutte, dunque, non sono luoghi adatti per questo albero che, invece, predilige ai fini della sua crescita ottimale quelle parti di montagna in cui si addensano le nubi e le nebbie.
Il faggio occidentale predilige suoli fertili, non molto acidi, di medio impasto e ben drenati, ed in queste circostanze cresce con vigore sia su rocce silicee che carbonatiche, mentre in condizioni più difficili esige la presenza di un substrato carbonatico-dolomitico. È in grado di adattarsi anche a suoli meno fertili e pietrosi, purché ci sia elevata umidità atmosferica, specialmente in primavera, tuttavia non tollera ristagni o suoli pesanti ed argillosi.
L'ecologia del faggio occidentale è caratterizzata da climogrammi riferibili a zone fitoclimatiche di tipo prettamente oceanico e suboceanico, o del *Fagetum* (Pavari), caratterizzate da una piovosità di tipo equinoziale e totale assenza di periodi secchi. In nord Europa i fattori che limitano la sua crescita sono il freddo eccessivo ed il periodo vegetativo troppo breve che ne deriva, ad est la sua espansione è frenata dal clima continentale, mentre a sud dal tipico clima secco ed i periodi di 2-3 mesi consecutivi di aridità estiva. Nei pressi del Mar Caspio e

del Mar Nero ha potuto espandersi a macchia d'olio grazie alle grandi nebbie ed umidità atmosferica che caratterizzano l'area.
In senso altitudinale il discorso è analogo: alle quote più elevate l'aria più rarefatta è molto più secca, ed i mesi vegetativi (con temperature superiori a 10 °C) sono insufficienti per completare una corretta maturazione dei semi.
L'altitudine e la latitudine sono strettamente correlate nel determinarne la distribuzione: man mano che ci si sposta verso nord, si riduce l'altitudine massima raggiunta dal faggio. Lausi e Pignatti nel 1973 hanno valutato che per ogni grado di latitudine nord, si abbassa di circa 110 metri il limite superiore della faggeta.
In nord Italia, sulle pendici di Alpi, Prealpi e Appennino settentrionale, il faggio si associa con l'abete bianco e numerose altre specie accompagnatrici come il tasso, gli aceri di monte e riccio, il frassino maggiore, l'olmo montano, il sorbo degli uccellatori, i tigli, il ciliegio selvatico ed il pioppo tremolo; queste associazioni sono caratteristiche dell'*Abieti-Fagetum*, mentre nelle Alpi più interne nelle zone endalpiche si incontrano associazioni più microterme, riferibili agli *Abieti-Piceo-Fagetum* dove, in proporzioni varie, il faggio si trova anche con l'abete rosso.
Più verso il meridione, in presenza di versanti più soleggiati, ben drenati e xerici, il faggio resiste grazie alla frequenza quasi giornaliera di temporali di tipo orografico nel corso della stagione calda e si associa anche con il carpino bianco ed il carpino nero, formando l'associazione *Ostryo-Fagetum,* e, alle quote superiori, con il pino silvestre ed il larice. Nelle foreste montane di latifoglie decidue, lungo la dorsale appenninica, il faggio è la specie più importante a livello forestale, tanto che condiziona anche le altre specie. Nella zona degli Appennini settentrionali vegeta prevalentemente su suoli acidi o subacidi, mentre in quelli meridionali in prevalenza su suoli a matrice carbonatica a reazione basica. L'optimum vegetazionale del faggio, secondo Pignatti (1982), è sulla fascia alpina fra le altitudini di 600 e 1300 metri di quota e nell'Italia peninsulare tra i 1000 ed i 1700 metri di quota. L'umidità atmosferica modifica localmente gli intervalli altitudinali riportati in precedenza, per esempio ci sono faggete depresse eterotopiche, nel Gargano, così come nel Lazio, in Toscana ed in Liguria, che scendono a contatto con leccete e pinete mediterranee a causa di un'umidità atmosferica sufficiente anche nei mesi estivi in nicchie ecologiche particolari.

1.2 – Il cambiamento climatico e degli ecosistemi

Il clima della Terra è cambiato molte volte nel corso della storia. Solo negli ultimi 650.000 anni ci sono stati ben sette cicli di avanzata e ritirata glaciale, con la fine improvvisa dell'ultima era glaciale circa 11.700 anni fa, che segna l'inizio dell'era climatica moderna e della civiltà umana.

La maggior parte di questi cambiamenti climatici è attribuita a variazioni molto piccole nell'orbita terrestre che modificano la quantità di energia solare che il nostro pianeta riceve. L'attuale tendenza al riscaldamento è di particolare importanza perché la maggior parte di essa è estremamente probabile (maggiore del 95% di probabilità, Fifth Assessment Report, 2014) sia il risultato dell'attività umana e proceda ad un ritmo che non ha precedenti.

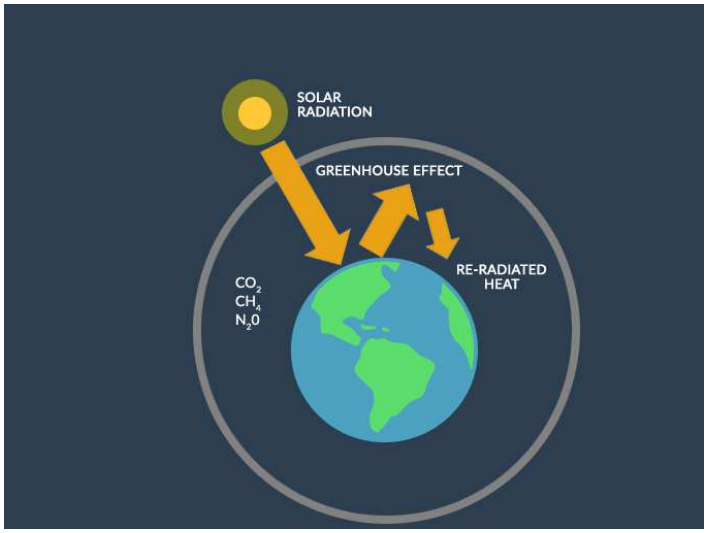


Questo grafico, basato sul confronto dei campioni atmosferici contenuti nelle carote di ghiaccio e misurazioni dirette più recenti, fornisce la prova che la CO_2 atmosferica è aumentata dopo la rivoluzione industriale. (Fonte: NASA)

Gli scienziati attribuiscono la tendenza al riscaldamento globale all'espansione umana ed alla conseguente emissione di gas serra, che sono quei gas presenti nell'atmosfera in grado di trattenere in maniera consistente una parte considerevole dell'infrarosso della radiazione solare che colpisce la Terra, emessa dalla superficie terrestre, dall'atmosfera e dalle nuvole.

Questi gas presenti nell'atmosfera impediscono al calore di andarsene, immagazzinando in maniera semi permanente energia termica e dando luogo al

cosiddetto effetto serra. I gas che contribuiscono maggiormente all'effetto serra sono il vapore acqueo, l'anidride carbonica, il metano, il protossido d'azoto, i clorofluorocarburi (CFC) e l'ozono.



In figura, rappresentazione semplificata dell'effetto serra. (Fonte: Young Scientists Journal)

Il vapore acqueo (H_2O) è il gas serra più abbondante ed esso aumenta man mano che l'atmosfera terrestre si riscalda. Il riscaldamento della superficie causato dalla produzione umana di altri gas a effetto serra porta ad un aumento del vapore acqueo atmosferico perché le temperature più calde rendono più facile per l'acqua evaporare e rimanere nell'aria sotto forma di nuvole. Questo crea un "ciclo di feedback" positivo in cui il riscaldamento porta a più riscaldamento.

Le attività umane hanno solo una piccola influenza diretta sulle concentrazioni atmosferiche di vapore acqueo, principalmente attraverso l'irrigazione e la deforestazione, quindi spesso non viene mostrato od associato agli altri composti.

L'anidride carbonica (biossido di carbonio, CO_2) è un componente minore, ma di enorme importanza e diffusione. Viene rilasciata attraverso processi naturali, come la respirazione e le eruzioni vulcaniche, ed antropici come la deforestazione, i cambiamenti nell'uso del suolo e la combustione di combustibili fossili. L'uomo ha aumentato la concentrazione di questo gas di oltre un terzo rispetto all'inizio della rivoluzione industriale.

Il metano (CH_4) è un gas idrocarburo che deriva sia da fonti naturali che da attività umane, tra cui la decomposizione dei rifiuti nelle discariche, l'agricoltura (in particolare la coltivazione del riso), così come la digestione dei ruminanti e la gestione del letame associato al bestiame domestico. Rispetto all'anidride carbonica, il metano è chimicamente più attivo, ma anche molto meno abbondante nell'atmosfera.

Il protossido d'azoto (ossido nitroso, monossido di diazoto, N_2O) è un potente gas serra prodotto dalle pratiche di coltivazione del suolo, in particolare l'uso di fertilizzanti commerciali ed organici, la combustione di combustibili fossili, la produzione di acido nitrico e la combustione della biomassa.

I clorofluorocarburi (CFC) sono composti sintetici interamente di origine industriale utilizzati in una serie di applicazioni. A partire dagli anni Cinquanta, la loro produzione e rilascio nell'atmosfera sono ora bloccate (almeno nei Paesi avanzati, grazie ad un accordo internazionale) per via della loro capacità di contribuire alla distruzione dello strato di ozono.

Quest'ultimo (ozono) merita uno spazio a sé, in quanto differisce dagli altri gas serra in diversi modi. Gli effetti dell'ozono dipendono dalla sua altitudine, o dove il gas si trova verticalmente nell'atmosfera. La maggior parte dell'ozono esiste naturalmente nello strato dell'atmosfera chiamato stratosfera, che spazia da circa 6 a 30 miglia sopra la superficie terrestre. L'ozono nella stratosfera ha un leggero effetto di riscaldamento netto sul pianeta, ma la sua presenza è positiva per la vita sulla Terra perché assorbe radiazioni ultraviolette nocive dal sole, impedendo loro di raggiungere la superficie terrestre. Nella troposfera, lo strato dell'atmosfera vicino al livello del suolo, invece, l'ozono è un inquinante atmosferico dannoso e nocivo per la salute, facendo parte dello smog urbano e prendendo il ruolo di importante gas serra che contribuisce al cambiamento climatico. A differenza degli altri principali gas serra, l'ozono troposferico dura solo da giorni a settimane, quindi i suoi livelli di concentrazione spesso variano in base al luogo in questione ed alla stagione in corso.

Ma come è possibile ricavare i dati storici relativi a tutte queste sostanze in modo tale da poterne studiare l'andamento e le concentrazioni nel tempo?
La paleoclimatologia è la scienza atta allo studio del clima del passato, col fine primario di confrontarlo con il clima attuale e dedurre, di conseguenza, in che direzione andrà quello futuro.
Le tecniche adottate per ricavare questi dati sono svariate, ed antiche prove possono essere trovate nei ghiacci, così come negli anelli degli alberi, nei sedimenti oceanici, nelle barriere coralline o, ancora, negli strati di rocce sedimentarie. Questi dati paleoclimatici rivelano che l'attuale riscaldamento globale si sta verificando circa dieci volte più velocemente del tasso medio di riscaldamento dell'era glaciale.

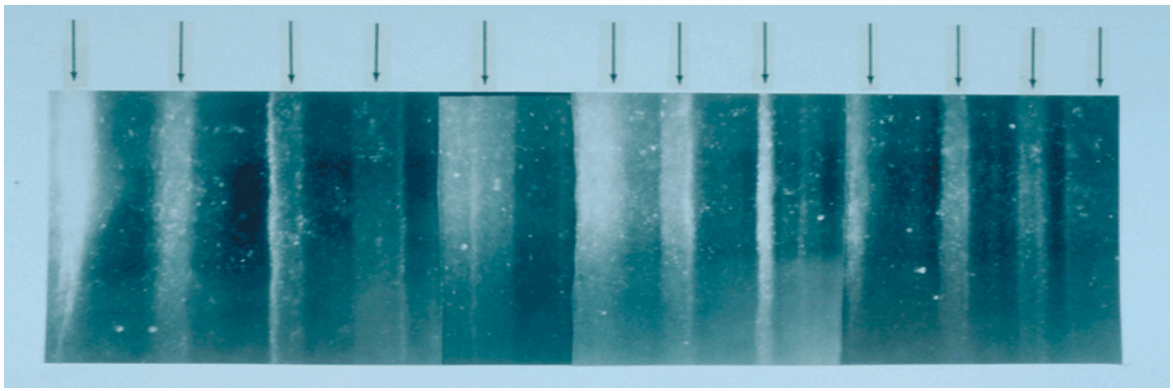
In figura, una carota di ghiaccio in fase di misurazione. (Fonte: NASA)

Le carote di ghiaccio, uno dei principali metodi di recente impiego, sono cilindri di ghiaccio estratti da calotte glaciali e ghiacciai che ci permettono di tornare indietro nel tempo e di campionare l'accumulo, la temperatura dell'aria e la chimica dell'aria da un altro tempo.
I dati delle carote di ghiaccio ci permettono di generare ricostruzioni continue del clima passato, risalendo ad almeno 800.000 anni. Osservando le concentrazioni passate di gas serra negli strati di carote di ghiaccio, gli scienziati possono

calcolare il confronto tra quantità moderne di gas serra con quelle del passato ed interpolarle ai dati delle temperature.

Queste estrazioni avvengono principalmente in Groenlandia, in Antartide e nei ghiacciai montani tropicali, ed i dati mostrano all'unisono che il clima della Terra risponde ai cambiamenti dei livelli di gas serra.

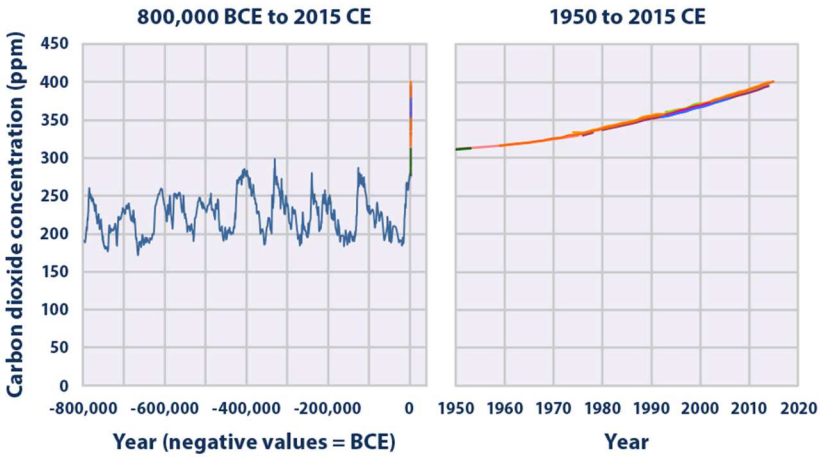
Le misurazioni dell'anidride carbonica provenienti dal ghiaccio più vecchio in Groenlandia sono meno affidabili, poiché gli strati di acqua in disgelo hanno un livello più elevato di anidride carbonica (la CO_2 è altamente solubile nell'acqua). Le registrazioni più vecchie di anidride carbonica sono quindi meglio quelle relative alle carote di ghiaccio antartiche.



In figura, sono indicati (frecce) 11 strati annuali, dove le estati sono rappresentate dalle bande più chiare, mentre gli inverni con quelle scure. (Fonte: web)

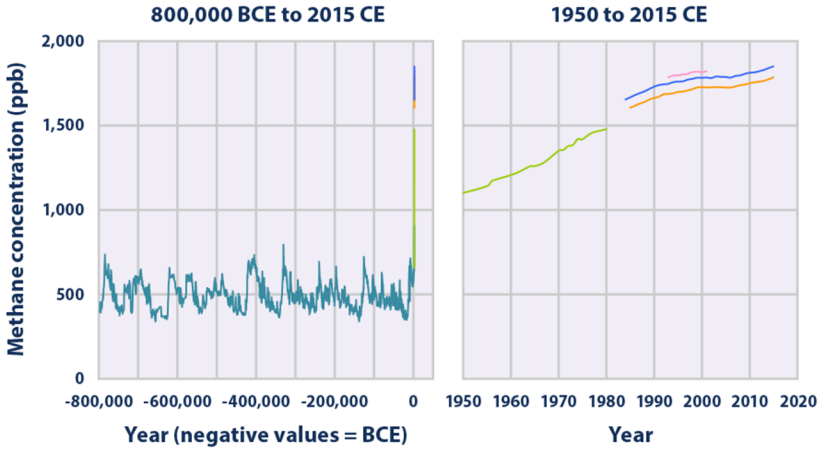
Le concentrazioni dei gas serra sono misurate in parti per milione (ppm), parti per miliardo (ppb) o parti per trilione (ppt) per volume. In altre parole, per esempio, una concentrazione di 1 ppb per un dato gas significa che vi è una molecola di quel gas ogni miliardo di molecole d'aria. Alcuni gas alogenati sono considerati grandi gas a effetto serra a causa dei loro altissimi potenziali di riscaldamento globale e della loro lunga permanenza in atmosfera, anche se sono presenti in relative piccole quantità (ppb e ppt).

Le misurazioni storiche mostrano che le attuali concentrazioni atmosferiche globali di anidride carbonica, metano e protossido di azoto sono senza precedenti rispetto agli ultimi 800.000 anni.



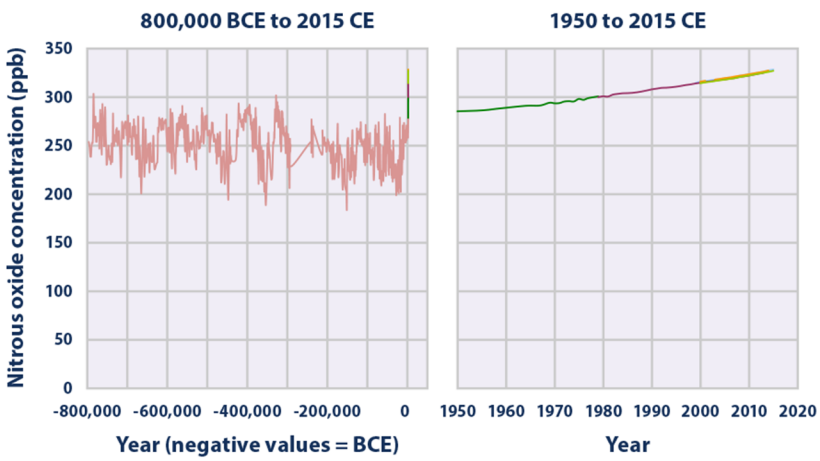
In figura, concentrazioni di CO_2 nel corso del tempo. (Fonte: NASA)

Le concentrazioni di biossido di carbonio sono aumentate notevolmente dall'inizio dell'età industriale, passando da una media annua di 280 ppm alla fine del 1700 a 401 ppm misurata a Mauna Loa nel 2015, con un aumento del 43 per cento.



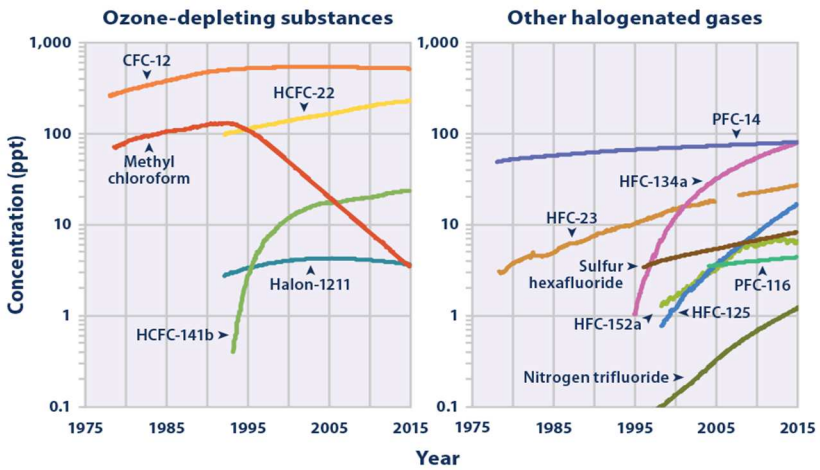
In figura, concentrazioni di CH_4 nel corso del tempo. (Fonte: NASA)

La concentrazione di metano nell'atmosfera è più che raddoppiata rispetto ai tempi preindustriali, raggiungendo circa 1.800 ppb negli ultimi anni.



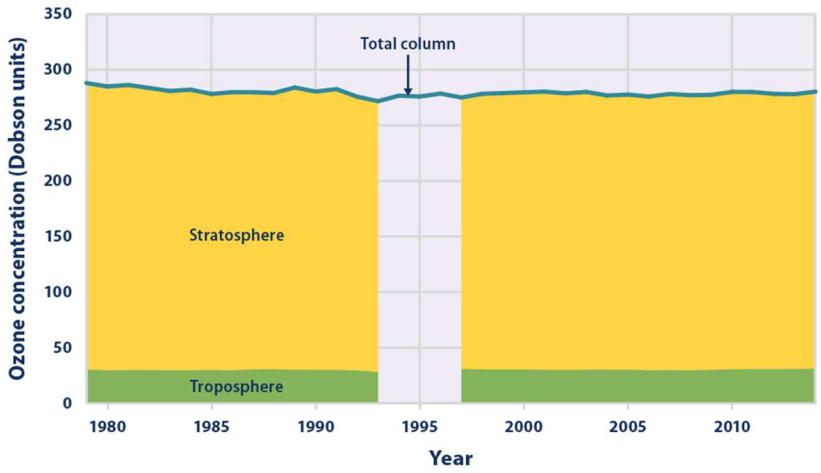
In figura, concentrazioni di N_2O nel corso del tempo. (Fonte: NASA)

Negli ultimi 800.000 anni, le concentrazioni di ossido di azoto nell'atmosfera raramente superavano i 280 ppb. Dagli anni '20 di questo secolo, tuttavia, sono aumentati vertiginosamente, raggiungendo un nuovo massimo di 328 ppb nel 2015.



In figura, concentrazioni di gas alogenati nel corso del tempo. (Fonte: NASA)

Le concentrazioni di molti dei gas alogenati erano essenzialmente pari a zero alcuni decenni fa, ma sono aumentate rapidamente in quanto sono state incorporate nei prodotti e nei processi industriali.



In figura, concentrazioni di O_3 nel corso del tempo. (Fonte: NASA)

La quantità totale di ozono nell'atmosfera è diminuita di circa il 3% tra il 1979 e il 2014 e tutta la diminuzione è avvenuta nella stratosfera, con la maggior parte di tale riduzione che si è verificata tra il 1979 e il 1994. I cambiamenti nell'ozono stratosferico riflettono l'effetto delle sostanze che riducono l'ozono.

Queste sostanze chimiche sono state rilasciate nell'aria per molti anni, ma recentemente gli sforzi internazionali hanno ridotto le emissioni e gradualmente eliminato il loro uso. A livello globale, tuttavia, la quantità di ozono nella troposfera è aumentata di circa il 3% tra il1979 e il 2014.

1.3 – Effetti del clima sulla crescita di *Fagus sylvatica*

Il cambiamento climatico ha già avuto impatto sull'abbondanza e la distribuzione delle specie negli ultimi 50 anni (Parmesan e Yohe 2003) e dovrebbe essere una delle principali cause di estinzione delle specie nel prossimo futuro (Thomas et al. 2004).

Il faggio comune o europeo (*Fagus sylvatica*) è senza dubbio la specie arborea più rilevante in Europa, sia perché è senza equivoci la più abbondante e dominante della vegetazione naturale potenziale europea, sia grazie agli svariati servizi ecosistemici che fornisce. Questa specie, tuttavia, è molto sensibile ai cambiamenti climatici ed ha particolari esigenze ai fini della propria crescita e buona salute. I sempre più allarmanti e frequenti cambiamenti climatici, che estremizzano e prolungano i fenomeni piovosi, così come quelli relativi alla siccità, sono, quindi, un grave pericolo per il faggio, anche perché altre specie, più tolleranti nei confronti di questi eventi, presto potrebbero prendere il sopravvento negli ecosistemi, svantaggiando ulteriormente il faggio e privandolo della sua naturale dominanza, forzandolo ad un portamento più arbustivo che arboreo e, di conseguenza, compromettendone inevitabilmente la crescita.

Le attuali proiezioni climatiche per l'Europa centrale prevedono un aumento delle temperature, le quali porterebbero ad un aumento della frequenza e della durata dell'intensa siccità estiva (es. IPCC 1997, 2001).
A causa della sua sensibilità verso la bassa disponibilità di acqua (Ellenberg 1996) ed i conseguenti periodi di siccità prolungati, la crescita, la fisiologia, la crescita e la capacità concorrenziale del faggio potrebbero essere compromesse da tali variabili condizioni ambientali, e la situazione può essere ulteriormente aggravata dal fatto che l'area di distribuzione del faggio comprende molti siti con terreni poco profondi e calcarei con, quindi, bassa capacità di stoccaggio dell'acqua.
Le temperature medie misurate sulla superficie terrestre sono già aumentate di 0,8 °C nel periodo tra il 1861 ed il 2005, ed è previsto e presumibile che continuino ad aumentare fino alla fine di questo secolo di 1,5-5,8 °C al di sopra del valore del 1990.
Per quanto riguarda la parte meridionale dell'Europa centrale, si prevede che l'aumento delle temperature sarà fino a 2 °C entro i prossimi 40 anni.
Le precipitazioni annuali, invece, rimarranno molto probabilmente costanti nello stesso periodo di tempo, ma avremo molto probabilmente a che fare con cambiamenti significativi per quanto riguarda la loro distribuzione durante l'anno, con modelli stagionali completamente differenti da quelli attuali e dotati di piogge particolarmente concentrate ed intense, al posto di poche piogge prolungate nel tempo.
L'aumento dell'intensità dei singoli eventi di precipitazione potrà comportare un aumento della criticità e del numero degli eventi di inondazione, una riduzione delle precipitazioni durante la stagione di crescita del faggio e periodi di siccità estiva più prolungati e frequenti. In presenza di eccessiva siccità, le piantine e gli alberi adulti di faggio possono soffrire di embolia allo xilema, limitata capacità di assorbimento di nutrienti e ridotta crescita; mentre nel caso di suolo inondato il faggio potrebbe riscontrare problematiche nell'assorbimento dei nutrienti e, di conseguenza, la sua crescita potrebbe risentirne sensibilmente.
Al momento, inoltre, rimane incerto in che misura altri fattori ambientali (ad es. le proprietà e l'uso del suolo, le interazioni competitive, ecc.) possano modificare la risposta alla siccità del faggio, amplificandone ulteriormente la suscettibilità o aumentandone il potenziale di resilienza.

In ogni caso, la capacità competitiva del faggio sarà messa a dura prova in quanto altre specie dominanti, ad esempio la quercia, sono ben adattate a questi stress ambientali, mentre il faggio è noto per esserne più suscettibile.
Ci occupiamo quindi delle potenziali risposte del faggio, una delle specie di alberi forestali economicamente ed ecologicamente più importanti attualmente supportate dalla gestione forestale in questa zona, ai cambiamenti ambientali previsti nel futuro prossimo. A tale scopo, è stata esaminata la letteratura che si occupa della risposta del faggio nei confronti dell'aumento delle concentrazioni atmosferiche di CO_2, l'aumento delle temperature dell'aria con conseguente intensificazione della siccità e, infine, del disboscamento e degli allagamenti.

1.3.1 – Effetti dell'arricchimento atmosferico di CO_2

L'aumento delle concentrazioni di CO_2 non solo influisce potenzialmente sul clima globale e regionale in futuro, ma esercita anche effetti diretti sul metabolismo del carbonio e sui relativi processi fisiologici e, pertanto, deve essere preso in considerazione quando si stima la reazione complessiva delle piante al cambiamento climatico. La maggior parte degli esperimenti sugli effetti diretti dell'aumento di CO_2 sulla fotosintesi, l'uso dell'acqua e la crescita degli alberi sono stati effettuati con piante giovani ed in condizioni ambientali più o meno controllate, mentre gli effetti dell'aumento di CO_2 sugli alberi adulti sono risultati di difficile comprensione (Saxe et al. 1998; Ceulemans et al. 1999).
I risultati ottenuti dalle piantine in ambiente controllato, tuttavia, non possono essere facilmente trasferiti alle condizioni naturali di un bosco maturo: la sensibilità alla CO_2 può differire tra piante giovani e adulte, inoltre in un bosco naturale vi sono molti fattori ambientali che possono modificare gli effetti degli agenti gassosi, e quindi le condizioni di crescita, in modi difficilmente prevedibili. Quando, come compromesso, sono stati presi in considerazione esperimenti in cui gli alberi (compresi quelli giovani) sono stati coltivati per più di una stagione di crescita in condizioni di crescita elevate e rilevanti per il campo, è stata osservata una tendenza verso l'aumento nell'uso dell'acqua a livello delle foglie. Gli esperimenti con faggio adulto sotto aumento della CO_2 concentrata hanno

mostrato, tuttavia, che le stimolazioni di crescita variavano in gran parte tra gli anni (Kosrner et al. 2005).

Le proprietà del suolo sembrano avere un ruolo cruciale per quanto riguarda l'impatto effettivo che l'anidride carbonica comporta nella crescita del faggio: su substrato acido si è osservata una spiccata inibizione della crescita, mentre su substrato calcareo è stata addirittura velocizzata, nonostante la consistente competizione dell'abete (Spinnler et al. 2002; Kozovits et al. 2005a,b).

Vincoli alla crescita del faggio sono stati riscontrati in ambienti in cui ha competuto, sotto esposizione ad alte concentrazioni di CO_2, per più di due anni con l'abete rosso (Kozovits et al. 2005a,b) e non si esclude che il faggio abbia ridotto il proprio indice di area fogliare (LAI) come risposta diretta a queste condizioni. Secondo Leuschner (1998), il faggio perderebbe così il suo fondamentale vantaggio competitivo (Reiter et al. 2005), ovvero la capacità di reprimere le specie concorrenti creando un'intensa ombreggiatura mediante la propria folta chioma, e questo potrebbe comportare una perdita di dominanza del faggio, perlomeno sui terreni acidi.

Nelle condizioni in cui l'azoto è limitato e carente, sempre con concentrazioni di CO_2 elevate, il faggio ha incrementato lo sviluppo delle radici fini (Medlyn et al. 2001; Dyckmans e Flessa 2002; Forstreuter 2002; Spinnler et al. 2002).

Questo aumento della biomassa sotterranea del faggio può, seppur in parte, compensare la perdita di capacità concorrenziali al di sopra del terreno (Leuschner et al. 2001; Schmidt e Kazda 2001), soprattutto nei luoghi in cui l'azoto è una risorsa limitata.

In conclusione, è doveroso puntualizzare che non vi è alcuna variazione sostanziosa nell'attività fotosintetica, nella crescita o nella capacità competitiva del faggio in risposta all'aumento delle concentrazioni di CO_2.

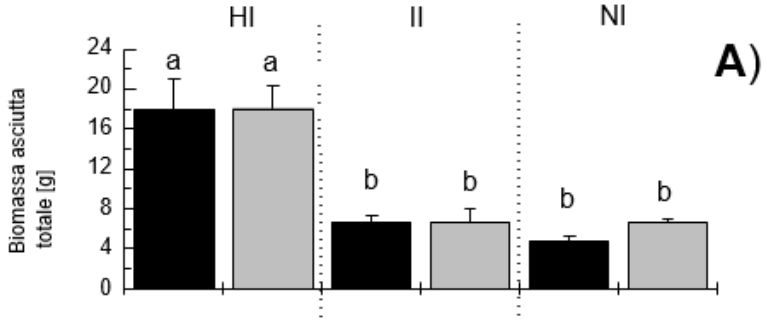
A causa delle diverse e numerose interazioni con altri fattori ambientali, si deve presumere che la risposta di crescita a lungo termine del faggio in ambiente dotato di CO_2 elevata sarà, nella maggior parte dei casi, variabile e dipenderà dalle molteplici influenze ed interazioni presenti nei popolamenti forestali naturali.

1.3.2 – Effetti della siccità

Il faggio domina molte foreste naturali, sia in condizioni moderatamente secche, sia in quelle umide, ma viene sostituito da altre specie (come *Quercus petraea* o *Quercus pubescens*) in ambienti eccessivamente asciutti, specialmente verso la parte meridionale d'Europa.

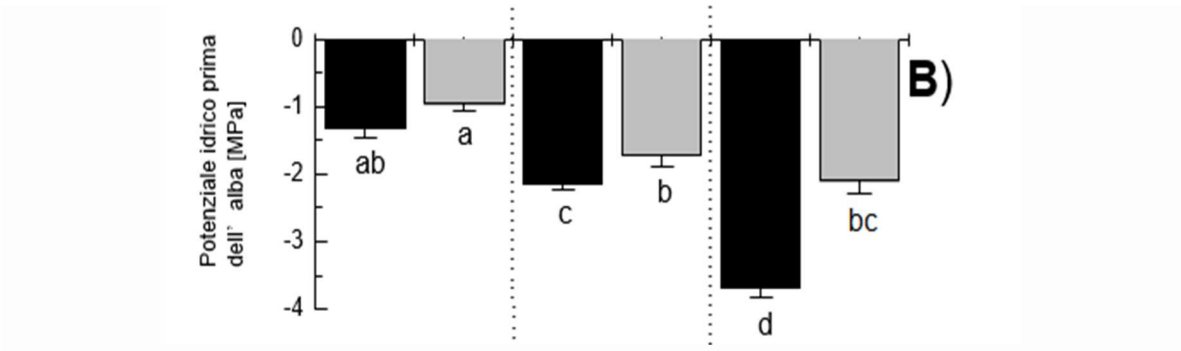
I previsti aumenti della durata e della frequenza della siccità estiva nelle parti meridionali dell'Europa centrale possono influenzare l'equilibrio idrico, la crescita, l'assorbimento dei nutrienti e la capacità competitiva del faggio, in particolare sui terreni calcarei e sui terreni sabbiosi con bassa capacità di ritenzione idrica.

La rigenerazione del faggio presenta una crescita ridotta ed una riduzione dell'assorbimento di azoto dal suolo quando si trova in condizioni di grave siccità (potenziale dell'acqua del suolo < 0,4 Mpa) per diverse settimane (Fotelli et al. 2001, 2002). Gli effetti della siccità possono essere rafforzati quando le specie di sottobosco in rapida crescita competono per l'acqua e l'azoto.



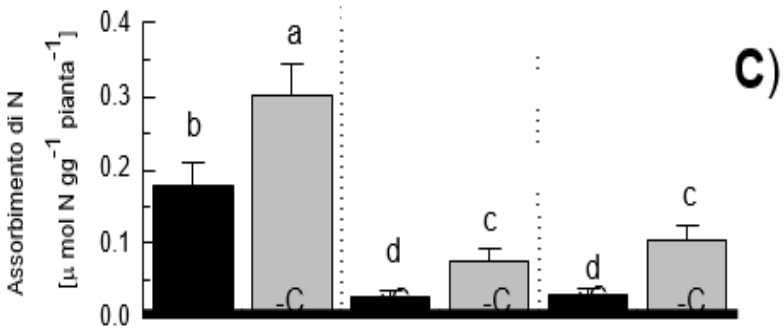
In figura, biomassa asciutta totale del faggio rispetto alla concorrenza in un periodo di siccità lungo 53 giorni. (Fonte: Geßler *et al.)*

Durante un periodo di siccità di 53 giorni, l'accumulo di biomassa di faggio è stato influenzato principalmente dal regime idrico, mentre la concorrenza ha avuto un'influenza minore (immagine A).



In figura, potenziale idrico prima dell'alba in piantine di faggio europeo in condizioni controllate. (Fonte: Geßler *et al.)*

La siccità ha anche abbassato i tassi di traspirazione (Fotelli et al. 2001) e il potenziale idrico antecedente al di sotto della soglia di embolia dello xilema di 1,9 MPa (Hacke e Sauter 1995) nelle piantine di faggio europeo in condizioni controllate (immagine B).



In figura, assorbimento di azoto da parte del faggio in condizioni di competizione con altre specie durante un periodo di siccità. (Fonte: Geßler *et al.)*

L'approvvigionamento di N (immagine C) di faggio è stato fortemente compromesso dalle interferenze delle specie concorrenti durante i periodi di siccità che si prevede si verificheranno sempre più frequentemente in futuro.

Poiché l'azoto è il principale nutriente che limita la crescita nelle regioni non inquinate e con bassi composti azotati atmosferici (Rennenberg et al. 1998), la riduzione dell'offerta di N, unitamente alla compromissione dell'equilibrio idrico, ha la potenzialità di provocare restrizioni alla crescita sotto forma di riduzione della crescita radiale e dell'altezza (Geßler et al. 2001; Spiecker et al. 2001).
Dittmar et al. (2003), tuttavia, hanno assunto dalle valutazioni delle ampiezze degli anelli degli alberi che il faggio ha un alto potenziale di resilienza ed è in grado di far fronte a periodi di ridotta disponibilità di acqua.

Concludendo, la disponibilità idrica del suolo, quindi, controlla attivamente le interazioni competitive tra le concorrenti e le piantine di faggio, spesso sfavorendo quest'ultimo, tuttavia sono necessari ulteriori studi per valutare l'effettiva capacità competitiva del faggio in differenti scenari (es. carenza idrica e/o di sostanze nutritive) ed ecosistemi naturali in condizioni ambientali variabili ed i reali impatti che queste ultime possono provocare.

1.3.3 – Effetti del ristagno e delle inondazioni

Come conseguenza del cambiamento dei modelli idrologici nella parte meridionale dell'Europa centrale, è molto probabile che in futuro si verificheranno sempre più spesso eventi alluvionali intensi, specialmente in primavera, e le zone con fiumi che scorrono in bacini idrografici alpini potrebbero esser fortemente colpite da questo fenomeno.

All'interno o nei pressi delle pianure alluvionali di questi fiumi il faggio potrà, quindi, subire inondazioni o comunque effetti di ristagno idrico notevoli, e proprio durante l'inizio della stagione di crescita. Questo fattore, unitamente alla capacità di altre specie dominanti, come per esempio la quercia, di adattarsi egregiamente a tale stress ambientale, comporta uno svantaggio non indifferente per il faggio, che è noto essere sensibile all'acqua e alle inondazioni (Ellenberg 1996; Gorzelak 2000).

Il ristagno idrico prolungato per giorni o settimane causa danni visibili alle parti epigee del faggio europeo, come lo scolorimento necrotico delle foglie, le fessure nella corteccia, fino, addirittura, alla morte dei singoli alberi. Oltre a ciò, come conseguenza aggiuntiva, i faggi esposti ad inondazioni o eccessivi ristagni risultano anche altamente suscettibili agli agenti patogeni fungini (Wargo e Houston 1974; Colin-Belgrand et al. 1991). Soprattutto le piantine e le piante giovani hanno mostrato una forte diminuzione dell'incremento della biomassa e sensibili riduzione dell'area fogliare, produzione delle gemme e della crescita radicale (Köstler et al. 1968; Kozlowski 1984; Levy et al. 1986; Lyr 1993; Dreyer 1994; Schmull e Thomas 2000).

La privazione di ossigeno nel suolo è una delle conseguenze più importanti delle inondazioni e compromette fortemente il bilancio energetico e del carbonio degli

alberi (Kozlowski 1984). Oltre alla privazione dell'ossigeno, è di rilievo anche quella dei carboidrati in quanto una carenza nel loro assorbimento comporta la repressione dei processi endoergonici, ovvero tutti quei processi che richiedono l'utilizzo di energia per potersi verificare. Al termine di un evento alluvionale, l'assorbimento da parte del faggio di nitrato ed ammonio non riprende immediatamente, come invece è stato osservato per altre piante più tolleranti ai ristagni, indicando, quindi, non solo un danno temporaneo. Al termine di un evento alluvionale, inoltre, la capacità di assorbimento del faggio non riprende immediatamente, come invece è stato osservato per le piante più tolleranti ai ristagni, bensì ha bisogno di tempo per tornare ad esser efficiente, e questo, come è facile dedurre, comporta un ulteriore svantaggio per il faggio.

1.3.4 – Conclusioni

I modelli climatici prevedono un aumento della temperatura di circa 1 °C su scala globale e fino a 2 °C per quanto riguarda la parte meridionale dell'Europa centrale entro i prossimi 40 anni. Gli alberi dovranno, dunque, resistere ai cambiamenti, anche drastici, delle condizioni ambientali come l'aumento delle precipitazioni intense durante la primavera con conseguenti inondazioni ed una maggiore frequenza di periodi di siccità estiva. Mentre i periodi di siccità intensa in estate ed il ristagno idrico hanno il potenziale di influenzare negativamente la crescita e la capacità competitiva del faggio, questa specie non sembra risentire dell'aumento della concentrazione atmosferica di CO_2. Concludendo, in futuro il faggio potrà soffrire durante i periodi poco piovosi su terreni poco profondi e con bassa capacità di stoccare l'acqua e nelle pianure alluvionali con terreni dotati di bassa capacità di drenaggio per via del conseguente ristagno idrico. Poiché è probabile che tali impatti si verifichino nel centro dell'attuale area di distribuzione del faggio, la politica forestale e la gestione devono tener conto di tali rischi quando si sviluppano piani per le transizioni forestali in quanto il faggio, in siti particolari e nel futuro prossimo, potrebbe perdere la sua dominanza a causa dei cambiamenti climatici.

Capitolo 2 – Obiettivi

Dati i sempre più frequenti, allarmanti ed inequivocabili segnali negativi che la comunità scientifica lancia al mondo riguardo il cambiamento climatico e le relative problematiche annesse alle quali l'umanità dovrà far fronte nel futuro imminente, è sorto l'interesse di studiarne gli effetti diretti ed indiretti sulla vegetazione locale, e nello specifico di questo elaborato sulla specie *Fagus sylvatica*.

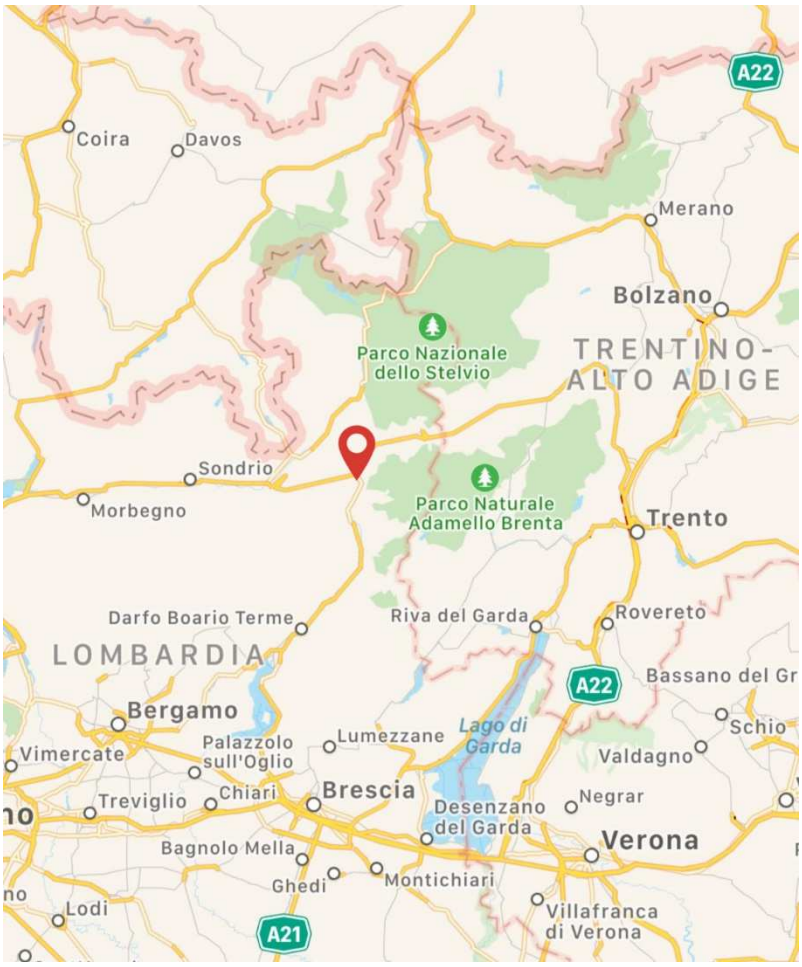
È stato scelto il faggio perché è decisamente tra le più importanti specie arboree presenti sul territorio non solo della Valcamonica, ma della maggior parte d'Europa, grazie alla sua abbondanza ed ampiezza ecologica, ai numerosi servizi ecosistemici forniti ed alle particolari caratteristiche e versatilità del suo legno, oltre ad esser sempre stata protagonista del panorama naturalistico della zona.

A tal scopo, mediante il sempre più utilizzato, preciso ed affidabile metodo della dendrocronologia, si sono analizzati gli accrescimenti legnosi di 18 faggi presso il Monte Faeto di Edolo (BS) con l'obiettivo di costruire una cronologia media dell'accrescimento per questo sito di studio, e correlare le differenti ampiezze anulari con i dati climatici relativi in cerca di trend e, quindi, dedurre eventuali legami tra il clima e la crescita degli alberi campionati.

Capitolo 3 – Materiali e metodi

3.1 – Analisi territoriale

Il presente elaborato è stato svolto al termine dell'attività di tirocinio, la cui fase pratica è stata effettuata sul campo presso il Monte Faeto di Edolo, in provincia di Brescia.



In figura, cartina geografica con segnaposto (rosso) sul Comune di Edolo. (Fonte: Apple Maps)

Il comune di Edolo è il cuore dell'Alta Valcamonica, è situato nell'estremo nord della provincia di Brescia ed è poco distante da quelle di Trento e Sondrio. Il paese è incastonato tra le montagne e rappresenta un vero e proprio crocevia: da questo luogo è possibile raggiungere dirigendosi verso ovest il passo dell'Aprica che permette di passare dalla Valcamonica alla Valtellina, mentre percorrendo la strada verso est si trovano Ponte di Legno ed il passo del Tonale, il quale permette

di oltrepassare le montagne ed arrivare in Trentino. Nei territori limitrofi ad Edolo, inoltre, sono situati due dei Parchi naturali, ovvero luoghi salvaguardati e tutelati, più importanti d'Italia: il Parco Naturale Adamello Brenta ed il Parco Nazionale dello Stelvio.

INQUADRAMENTO DEL COMUNE DI EDOLO	
NOME COMUNE	Edolo
FRAZIONI, LOCALITÀ E NUCLEI ABITATI	Baldoni, Cortenedolo, Gas, Mù, Nembra, Piantas e Vico
CLASSIFICAZIONE	Comune Montano
CODICE IDENTIFICATIVO	017068
ZONA ALTIMETRICA	Montagna
REGIONE AGRARIA	Alta Val Camonica
ENTE SOVRACOMUNALE	Comunità Montana di Valle Camonica e Parco Regionale dell'Adamello
PARCO DELL' ADAMELLO	Superficie (ha): 5.487,76 % di superficie a parco: 60
ALTIMETRIA	Compresa 640,00 e 3.534,66 m.s.l.m.
SUPERFICIE TOTALE	8.907,47 ha
SUPERFICIE TERRITORIALE 3D	10.806,05 ha
PERIMETRO	65.846,44 m
PERIMETRO 3D	167.474,70 m

In tabella, le principali caratteristiche del Comune di Edolo (Fonte: Regione Lombardia).

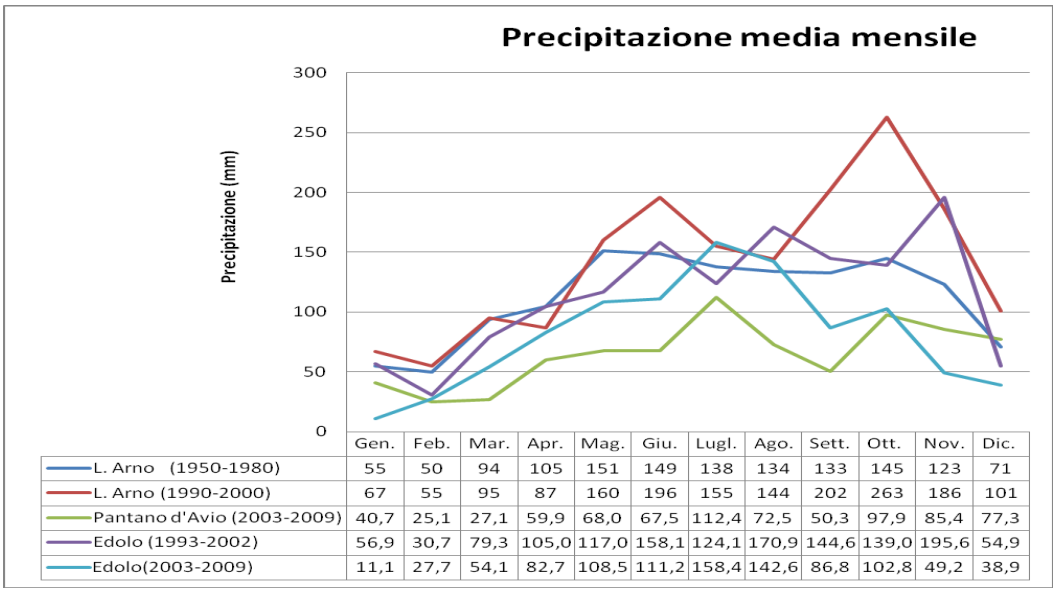
Il clima di Edolo, complici la quota contenuta e la posizione geografica, è relativamente favorevole, con inverni non eccessivamente rigidi ed estati piuttosto fresche.

I dati seguenti sono relativi a rilievi pluviometrici effettuati su tre differenti stazioni meteo dell'Arpa1, nel periodo compreso tra il 1950 ed il 2009, poste a quote differenti: lago d'Arno e Pantano d'Avio per le quote superiori con orizzonti alpino e subalpino, l'altra (Edolo) per rappresentare quelle inferiori con orizzonti montano e submontano.

MESI	STAZIONI METEO UTILIZZATE PER L'ANALISI				
	L. Arno (1950-1980) (mm) e (gg) di precipitazione	L. Arno (1990-2000) (mm) e (gg) di precipitazione	Pantano d'Avio (2003-2009) (mm) e (gg) di precipitazione	Edolo (1993-2002) (mm) e (gg) di precipitazione	Edolo (2003-2009) (mm) e (gg) di precipitazione
GENNAIO	55 - 7	67 - 6	40,7 - 6	56,9 - 8	11,1 - 5
FEBBRAIO	50 - 6	55 - 4	25,1 - 5	30,7 - 4	27,7 - 9
MARZO	94 - 8	95 - 3	27,1 - 7	79,3 - 11	54,1 - 13
APRILE	105 - 11	87 - 10	59,9 - 11	105,0 - 15	82,7 - 13
MAGGIO	151 - 15	160 - 15	68 - 14	117 - 17	108,5 - 14
GIUGNO	149 - 13	196 - 15	67,5 - 13	158,1 - 23	111,2 - 15
LUGLIO	138 - 12	155 - 12	112,4 - 13	124,1 - 18	158,4 - 16
AGOSTO	134 - 10	144 - 10	72,5 - 13	170,9 - 24	142,6 -15
SETTEMBRE	133 - 10	202 - 9	50,3 -10	144,6 - 21	86,8 - 13
OTTOBRE	145 - 9	263 -12	97,9 - 10	139 - 20	102,8 - 9
NOVEMBRE	123 - 9	186 - 9	85,4 - 9	195,6 - 28	49,2 - 12
DICEMBRE	71 - 7	101 - 7	77,3 - 8	54,9 - 8	38,9 - 5

In tabella, precipitazioni medie mensili e giorni di pioggia rilevati nelle diverse stazioni meteorologiche. (Fonte: PGT Comune di Edolo)

Inserendo i dati udometrici relativi alla tabella precedente in grafico è possibile osservare gli andamenti e comparare i dati delle differenti stazioni durante i mesi dell'anno.

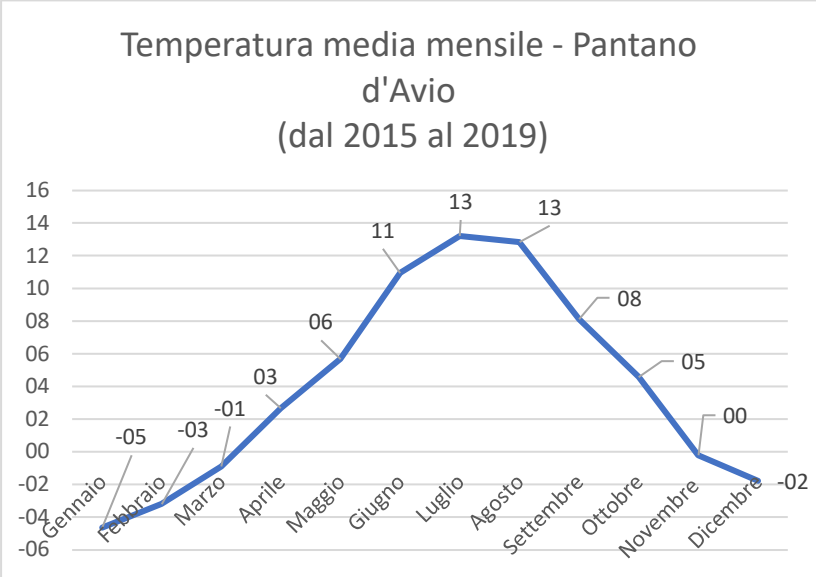


	Gen.	Feb.	Mar.	Apr.	Mag.	Giu.	Lugl.	Ago.	Sett.	Ott.	Nov.	Dic.
L. Arno (1950-1980)	55	50	94	105	151	149	138	134	133	145	123	71
L. Arno (1990-2000)	67	55	95	87	160	196	155	144	202	263	186	101
Pantano d'Avio (2003-2009)	40,7	25,1	27,1	59,9	68,0	67,5	112,4	72,5	50,3	97,9	85,4	77,3
Edolo (1993-2002)	56,9	30,7	79,3	105,0	117,0	158,1	124,1	170,9	144,6	139,0	195,6	54,9
Edolo(2003-2009)	11,1	27,7	54,1	82,7	108,5	111,2	158,4	142,6	86,8	102,8	49,2	38,9

Grafico e tabella relativi alle precipitazioni medie mensili registrate nelle stazioni L. Arno, Pantano d'Avio e Edolo. (Fonte: PGT Comune di Edolo)

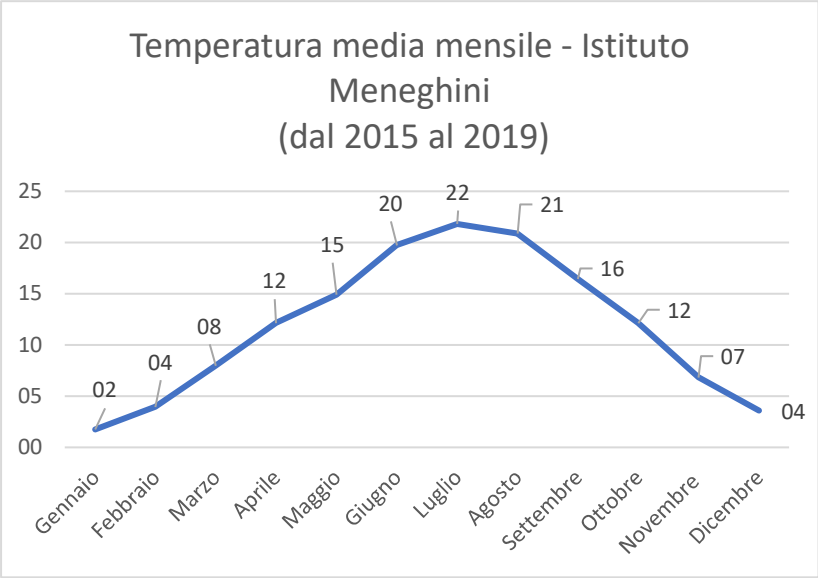
Dai risultati si intuisce che l'andamento pluviometrico delle stazioni interessate sia distribuito con una certa costanza nel periodo compreso tra maggio e settembre, che corrisponde al periodo vegetativo.

Il regime pluviometrico è, quindi, di tipo sub-equinoziale estivo e mostra una leggera influenza da parte delle correnti umide e calde risalenti dal lago d'Iseo. Queste correnti, probabilmente, sono tra i motivi principali per cui le piogge sono distribuite nei periodi primaverili/estivi (in particolar modo nei mesi di maggio e giugno) ed autunnali (ottobre e novembre). Al fine di comprendere al meglio le dinamiche di crescita del faggio, si è ritenuto necessario anche studiare le temperature recenti nel comprensorio di Edolo, perciò si è consultato il sito Arpa Lombardia, richiesti ed analizzati i dati relativi alle medie giornaliere nel periodo 01/01/2015 – 31/12/2019 di due differenti stazioni, Pantano d'Avio ed Istituto Meneghini, situate relativamente alle altitudini di 2378 e 672 metri sul livello del mare. Successivamente è stata calcolata una media mensile di temperatura per ciascun anno per entrambe le stazioni per poter, infine, ottenere le temperature medie mensili nel periodo dal 2015 al 2019 alle due differenti altitudini relative alle stazioni Pantano d'Avio ed Istituto Meneghini.
Seguono i risultati finali in grafico ed in tabella (evitando di riportare tutti i calcoli eseguiti in elaborato):



PANTANO D'AVIO 2015-2019	
MESE	°C
Gennaio	-4.6
Febbraio	-3.2
Marzo	-0.9
Aprile	2.7
Maggio	5.7
Giugno	10.9
Luglio	13.2
Agosto	12.8
Settembre	8.1
Ottobre	4.6
Novembre	-0.2
Dicembre	-1.8

Grafico e tabella relativi alle temperature medie mensili registrate presso la stazione Pantano d'Avio nel periodo 2015-2019. (Fonte: ARPA Lombardia)



ISTITUTO MENEGHINI 2015-2019	
MESE	°C
Gennaio	1.7
Febbraio	4.0
Marzo	8.0
Aprile	12.1
Maggio	14.9
Giugno	19.7
Luglio	21.8
Agosto	20.9
Settembre	16.4
Ottobre	12.1
Novembre	6.8
Dicembre	3.6

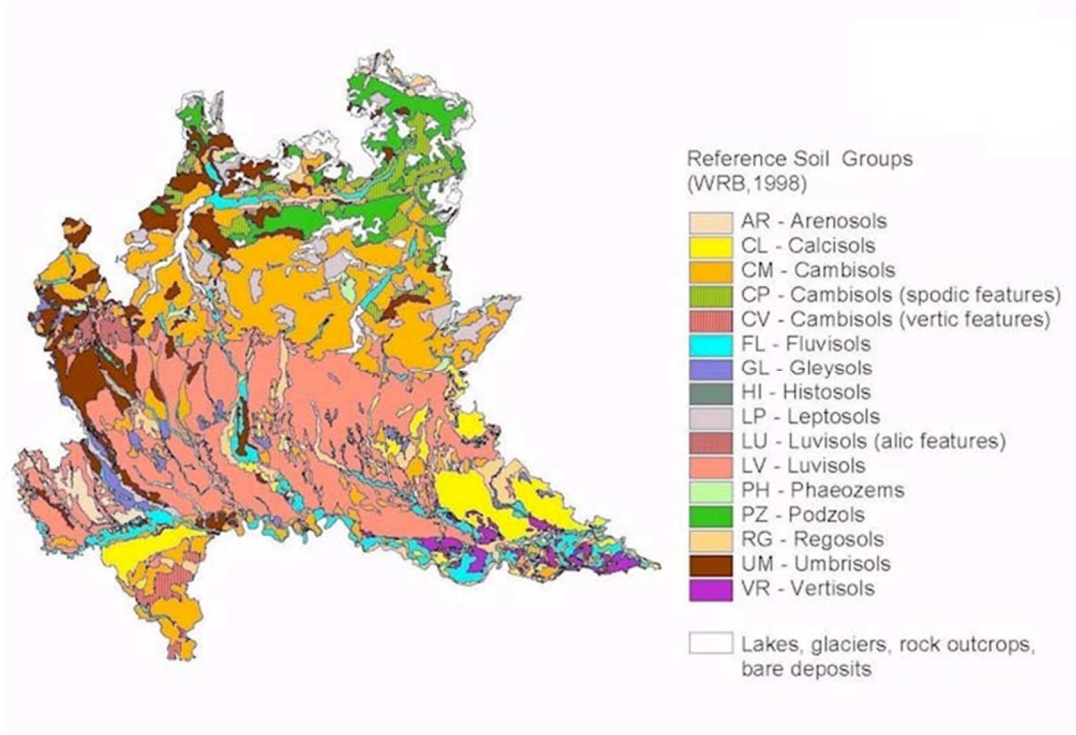
Grafico e tabella relativi alle temperature medie mensili registrate presso la stazione Istituto Meneghini nel periodo 2015-2019. (Fonte: ARPA Lombardia)

Concludendo, è emerso che:

- Stazione Pantano d'Avio: la temperatura media minima mensile è pari a -4,6 °C ed il mese più freddo è risultato essere Gennaio, mentre il più caldo Luglio, con la temperatura media massima mensile di 13,2 °C.
- Stazione Istituto Meneghini: la temperatura media minima mensile è pari a 1,7 °C ed il mese più freddo è risultato essere Gennaio, mentre il più caldo Luglio, con la temperatura media massima mensile di 21,8 °C.

Il suolo è una importantissima risorsa, le cui caratteristiche determinano le modalità con le quali si possono produrre gli alimenti, la possibilità di costruire abitazioni ed infrastrutture, così come la fruizione di acque pulite, ecc. insomma, il suolo è cruciale per poter vivere in maniera sana ed avere un ambiente ospitale nel quale potersi insediare.

Per questi motivi, la cartografia pedografica è diventata sempre più uno strumento di vitale importanza per pianificare in modo sostenibile e lungimirante l'uso di questa risorsa, al fine di preservarla dal consumo smodato e garantirne le funzionalità a lungo termine.



In figura, carta dei suoli della Lombardia (Fonte: Ersaf)

Il suolo di Edolo, secondo la carta dei suoli della Lombardia (Ersaf), risulta essere dotato di molte tipologie pedologiche, principalmente Cambisols, Podzols, Fluvisols ed Umbrisol.

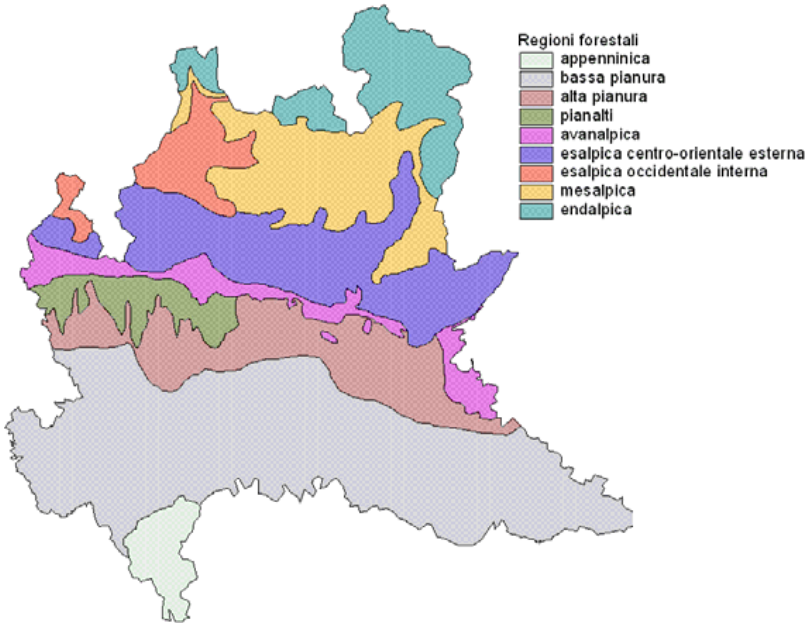
I Cambisols (CM) sono suoli con un'evoluzione media, nei quali è avvenuta un'alterazione dei costituenti minerali. Hanno un orizzonte cambico brunastro e si trovano soprattutto nel fondovalle.

I Podzols (PZ) sono caratterizzati dall'eluviazione di humus ed ossidi minerali, in ambiente acido. Sono costituiti da molti orizzonti differenti, tra cui uno albico grezzo ed uno spodico di accumulo.

I Fluvisols (FL) sono suoli caratterizzati da un processo di eluviazione ed illuviazione di argille relativamente nelle parti superiore ed inferiore del profilo.

Gli Umbrisols (UM) hanno epipedon umbrico e limitato sviluppo pedogenetico, con grandi quantità superficiali di sostanza organica desaturata in basi.

Il Comune di Edolo si trova nella regione forestale endalpica, come si può vedere consultando la carta delle regioni forestali della Lombardia riportata di seguito.



In figura, carta delle regioni forestali della Lombardia – scala 1:250.000. (Fonte: Ersaf)

I boschi costituiscono quasi tutto il patrimonio naturale di Edolo e ricoprono la maggiorità dei versanti.

Essendoci in questo comune una grande escursione altitudinale (ben 2894,66 metri, ovvero la differenza tra la quota minima di 640,00 metri del fondovalle e la massima di 3534,66 della vetta più alta), vi è la necessità di suddividere il territorio in tre principali tipologie (od orizzonti) ambientali: il sub-montano, il montano ed il subalpino.

L'orizzonte sub-montano si estende a partire dal fondovalle fino all'incirca ai 1000 metri di altitudine, ed è caratterizzato da fitocenosi più o meno termofile. L'originaria composizione floristica, ricca di faggio e specie quercine, è stata impoverita dalla sempre maggiore presenza dell'uomo e dalle sue attività.

Nel versante rivolto a nord, quello del Monte Faeto, si trovano specie generalmente tipiche dell'orizzonte montano che si sono abbassate di quota: vi è una buona quantità di faggio che, però, è sottoposto a formare il piano dominato e quindi lo ritroviamo con portamento prevalentemente arbustivo. Il motivo per

cui il faggio si ritrova in competizione è la presenza consistente di conifere quali l'abete rosso, il e, seppur in piccoli gruppi, l'abete bianco.

Per quanto riguarda il versante rivolto verso sud, invece, vi è una prevalenza di specie quercine miste al castagno ed alla betulla, accompagnate da numerose altre specie quali il frassino, il nocciolo, l'ontano verde e bianco, il salicone ed il sorbo degli uccellatori laddove la zona gode di un bilancio idrico particolarmente favorevole ed il suolo è più potente. Sono anche presenti, seppur in quantità esigue, formazioni di cedui misti di castagno, nocciolo, pioppo tremulo, betulla, salicone, ontano e robinia. In questo orizzonte sono, inoltre, presenti per disseminazione naturale in forma sporadica il pino silvestre, il larice e la picea. Nello strato erbaceo ed arbustivo si trovano di frequente il brugo, l'erica, il ginepro e la rosa canina.

L'orizzonte montano, che si estende tra i 1000 ed i 1500 metri di altitudine circa, è caratterizzato principalmente dalla pecceta, affiancata dal faggio, il larice, l'abete bianco ed il pino silvestre. Seppur con meno frequenza, alle specie appena menzionate si aggiungono anche alcune latifoglie come la betulla, l'ontano verde, il sorbo, il salicone, il frassino ed il nocciolo. I soprassuoli stanno evolvendo verso una situazione di netta prevalenza dell'abete rosso, ma sono molto diffusi in tutto l'orizzonte anche la betulla ed il larice, specialmente nelle zone dirupate ed asciutte. Al limite del piano montano superiore, attorno ai 1500 metri di altitudine, in alcune particelle il larice prende il sopravvento sull'abete rosso. Alle quote maggiori di questo orizzonte si trovano la tossilaggine alpina, il rododendro rosso ed il caprifoglio turchino, tutte specie tendenzialmente subalpine.

L'orizzonte subalpino, infine, che va dai 1500 ai 2000 metri di altitudine circa, presenta formazioni forestali a bassa densità, con alberi piuttosto distanziati l'uno dall'altro e son crescita relativamente ridotta. In questo orizzonte l'ordine vegetazionale predominante è rappresentato dalla pecceta subalpina, che è una sorta di pecceta montana mista a pascoli e praterie alpini. Al di sopra di tutti questi orizzonti e di quello sub-nivale, oltre i 2800 metri di quota, troviamo le vette con l'orizzonte nivale, colonizzato dalle briofite e da piante pulvinate dalle erbe pioniere.

3.2 – Area di studio

L'area nella quale si è deciso di raccogliere i campioni consiste in una porzione del Monte Faeto compresa tra gli 800 ed i 950 metri di altitudine.

È stata scelta questa zona perché vi si trova un buon numero di faggi dotati di condizioni ottimali ai fini della ricostruzione dendroclimatica, ovvero in salute, senza concrescimento del fusto (ad altezza < 130 cm) e situati in luoghi non scoscesi. Grazie a quest'ultima caratteristica abbiamo avuto sia la possibilità di operare in piena sicurezza, sia avere una maggiore garanzia che gli alberi siano cresciuti su di un suolo adeguato.

Le coordinate del punto centrale del luogo in questione sono le seguenti:

46°10'03.1"N 10°19'23.9"E (46.167539, 10.323297)

In figura, immagine satellitare di Edolo, con l'area di studio in evidenza (in rosso). (Fonte: Google Earth)

3.3 – La dendrocronologia

In figura, gli anelli all'interno di un tronco di albero. Si notino le bande chiare del legno primaverile e quelle scure del legno di fine stagione vegetativa. (Fonte: web)

La dendrocronologia è la scienza che utilizza gli anelli degli alberi per datare gli eventi e ricostruire le condizioni ambientali del passato.
Negli ultimi decenni questa disciplina ha subito un boom di crescita ed è passata dall'essere un metodo di portata limitata ad essere un fenomeno estremamente rilevante per una vasta gamma di ambiti.
La dendrocronologia fornisce con accuratezza dati quantitativi e qualitativi relativi alle variazioni ambientali sia su scala stagionale, fino ad arrivare anche ad archi di tempo secolari.
Le applicazioni della dendrocronologia sono molto disparate, è per esempio possibile utilizzarla per avere informazioni sul comportamento umano nel passato in un dato territorio, per scoprirne l'attitudine a sfruttare gli alberi come risorsa naturale e materia prima, dove l'uomo preferiva raccogliere la legna, in che periodi dell'anno e per quali scopi.
Un altro impiego di questa disciplina, ed è quello che ho utilizzato anche io, consiste nel ricavare informazioni ambientali archeologiche per poter risalire agli assemblaggi di specie nel sito di studio ed eseguire un'analisi dendroclimatica delle sequenze anulari degli alberi.

I principi ed i concetti alla base della dendrocronologia (Baillie 1982,1995; Bannister 1963; Dean 1986; Eckstein et al. 1984; Fritts 1976; Glock 1937; Schweingruber 1988) sono ben noti, pertanto ne sono discusse in questa sede esclusivamente le caratteristiche salienti e le novità (con eventuali sviluppi).

Al di sotto della corteccia, gli strati che nel tronco in sezione trasversale appaiono come una serie di cerchi concentrici sono gli anelli, che sono formati da due bande, una chiara ed una scura.

Quella chiara è il cosiddetto "earlywood", o legno primaverile, mentre quella scura è chiamata "latewood", ovvero quel legno che si forma a fine stagione vegetativa, completando l'anello annuale. A volte a queste due bande se ne aggiungono altre meno definite, dette "anelli falsi", che si distinguono per via dei loro bordi poco marcati. Negli alberi utilizzati nella dendrocronologia la progressione dal centro alla circonferenza stabilisce un ordine temporale inalterabile ed inequivocabile, e la produzione di un solo anello per anno fornisce una la regolarità incrementale necessaria al fine di stabilire una scala temporale fissa. Più di 180 tra alberi e arbusti (Grissino-Mayer 1995) hanno le caratteristiche necessarie al fine di una corretta analisi dei propri anelli: anelli visibili e netti, la produzione di un determinato numero di anelli per unità di tempo (un anello all'anno), una sostanziale porzione della crescita radiale controllata da uno o pochi fattori ambientali (in genere il clima) e l'esistenza di caratteristiche morfologiche (larghezza, densità, ecc.) che consenta di estrarre il "segnale ambientale" dalle sequenze anulari.

Ci sono due tipi di serie di anelli: quelle dette "complacent" e quelle sensibili. Le prime mostrano poche variazioni tra gli anelli e vengono prodotte quando vi è un basso grado di variabilità annuale per quanto riguarda i fattori che regolano la crescita, mentre quelle sensibili sono caratterizzate da un'alta variabilità tra gli anni, che deriva dalle fluttuazioni annuali dei fattori ambientali che limitano la crescita.

Al fine della dendrocronologia, queste ultime serie sono di gran lunga le più importanti, in quanto forniscono dati rilevanti che evidenziano condizioni di criticità. Uno dei principi immutabili e fondamentali della dendrocronologia sta nel fatto che tra gli alberi in una determinata zona deve esserci una certa corrispondenza nei modelli di variazione anulare, e qualsiasi analisi che non

comprenda e permetta di replicare questo concetto non è accettabile nell'ambito della dendrocronologia. Sebbene anche altri fattori possano essere utilizzati per un crossdating limitato, solo la larghezza e la densità permettono di effettuare uno studio accurato su larga scala geografica.
Le variabili climatiche che controllano la crescita radiale variano notevolmente a seconda dei modelli climatici su larga scala (Fritts 1976).
Le precipitazioni sono il fattore di limitazione principale nelle regioni aride, mentre negli habitat freddi è la temperatura. Nei luoghi con regimi climatici intermedi si ha una combinazione di questi fattori, ed è di conseguenza più difficoltoso trovare dei segnali climatici rilevanti negli anelli degli alberi presenti in queste zone rispetto a quelli in cui la crescita radiale è governata da un unico fattore forte.
Il cosiddetto "crossdating" consiste nella comparazione incrociata delle serie anulari degli alberi, ed un suo utilizzo rigoroso è necessario per tre motivi principali:

- assegna date precise a tutti gli anelli in una sequenza, pur conoscendo la data soltanto di uno di essi;
- si può datare una serie di anelli di età sconosciuta trovando un luogo in cui vi è corrispondenza nei confronti di una serie di data nota;
- incrociare i dati è l'unico modo per rilevare l'eventuale assenza di anelli da una sequenza, o la presenza di anelli "falsi".

Esistono due modi principali per effettuare il crossdating: il visivo-grafico e lo statistico. Il primo prevede che si confrontino visivamente i campioni, o le rappresentazioni grafiche delle variabilità anulari. Il metodo statistico, invece, utilizza calcoli matematici e generalmente distribuzioni di probabilità.
Per un risultato ottimale, se possibile, è consigliato utilizzarli entrambi in modo da avere la possibilità di confrontare i risultati del primo rispetto al secondo metodo ed avere, così, ulteriori conferme riguardo la correttezza del lavoro svolto.

Al fine di ottenere una datazione ed una ricostruzione ambientale accurate, bisogna fare in modo di massimizzare la variabilità comune agli alberi di una determinata area geografica (segnale) e per ottenere questo risultato bisogna eliminare il più possibile eventuali variabilità non comuni (rumori).
Questo obiettivo si può raggiungere in due modi:

- facendo una media dei dati provenienti da almeno due carote per albero, con un numero minimo di dieci alberi differenti;
- varie procedure di standardizzazione (normalizzazione) al fine di ridurre la variabilità idiosincratica dalle singole serie di anelli, riducendo, quindi, le differenze.

La variabilità di questo tipo deriva dalle capacità fisiologiche dei singoli alberi, dalle condizioni del sito e da eventuali cambiamenti dello stesso, così come da una serie di eventuali eventi traumatici specifici.
Questi fattori possono causare picchi di crescita, soppressioni o altre anomalie che inevitabilmente vanno a cambiare il segnale ambientale.

La costruzione delle serie può avvenire con metodo soggettivo o matematico. L'utilizzo della media visiva è adeguato soltanto per costruire cronologie atte all'esclusiva datazione di campioni di età sconosciuta, tuttavia il procedimento statistico necessita di cronologie quantitative, le quali si ottengono calcolando la media dell'ampiezza degli anelli, indici e valori di densità per ogni anno e per vari campioni in modo tale da ottenere dei valori medi.
Nonostante si tratti di un procedimento relativamente semplice, bisogna fare una notevole attenzione al fine di preservare nella cronologia finale importanti attributi statistici e l'intera gamma delle informazioni climatiche (Cook et al. 1995; Cook and Holmes 1986; Sheppard 1993).

3.4 – Metodi

All'interno del perimetro dell'area di studio sono state scelte 18 piante in base a criteri specifici. Come già è stato largamente trattato nei capitoli precedenti, la pianta oggetto di studio è il faggio (*Fagus sylvatica*), essendo molto diffuso e sensibile ai cambiamenti climatici ed alla competizione da parte delle conifere presenti nel medesimo orizzonte ambientale. Nonostante sia stato constatato che nella zona vi siano solamente esemplari relativamente giovani, si è comunque cercato di selezionare le piante dotate di maggiori dimensioni. Oltre alle mere altezza e larghezza del fusto, si è cercato di scegliere piante in salute, con il tronco più colonnare possibile e non concresciute (ad altezza < 130 cm).
Il luogo nel quale ho operato presentava delle zone particolarmente scoscese, che ho evitato non solo per questioni di sicurezza, ma anche per ottenere dei campioni con una certa uniformità e coerenza reciproca. Le piante, infatti, crescono in maniera estremamente differente in base a svariate condizioni, una delle quali è senza dubbio la natura del suolo sottostante.
I faggi selezionati sono stati, infine, catalogati mediante l'acronimo "FASY" che essenzialmente consiste nelle prime due lettere di *Fagus* (FA) e nelle prime due di *Sylvatica* (SY).

3.4.1 – Metodi di campionamento

Il campionamento è stato eseguito utilizzando un succhiello di Pressler, detto anche sonda incrementale, che è essenzialmente una trivella a triplo filetto in acciaio ad alta resistenza a forma di T, dotata di impugnatura in acciaio ed estrattore con copertura al teflon. Questo strumento è utilizzato, appunto, per prelevare campioni, detti "carote", nei tronchi degli alberi, con la finalità di valutarne l'età, la crescita, la densità del legno e la salute complessiva, così come poter dedurre gli eventuali influssi negativi causati dal clima o dall'inquinamento.
Al fine di ottenere campioni con un sufficiente numero di anelli, si è deciso di evitare la campionatura di faggi con tronco di raggio inferiore ai 20 cm (40 cm minimi di diametro), così come son stati tralasciati tutti gli alberi aventi condizioni non ottimali per lo studio dendrocronologico.

Per ogni albero selezionato sono state, dunque, estratte due carote differenti, entrambe all'altezza di circa 1,3 metri (il cosiddetto "petto d'uomo"), l'una, nei limiti del possibile, a 90° dall'altra.
Al fine di distinguere tra loro le due differenti carote di ciascuna pianta, sono state aggiunte all'acronimo identificativo dell'albero "FASY" (di cui abbiamo parlato in precedenza) le lettere X e Y (es. 1X FASY, 1Y FASY).
Ogni carota è stata temporaneamente inserita in una cannuccia di plastica e su ognuna di esse è stato incollato un pezzo di nastro adesivo cartaceo con la scritta FASY, preceduta dal luogo di campionamento (FAETO) e, come detto poco sopra, dal numero (da 1 a 18) e lettera (X o Y), e seguita dalla data in cui è stato effettuato il campionamento ed il diametro del tronco (es. FAETO, 1X, FASY, 25/09/2019, 42,5).
È stato deciso di inserire le carote all'interno di questi supporti provvisori per evitare che sul campo o durante il trasporto potessero essere danneggiate accidentalmente.
Appena è stato possibile, infine, sono state spostate su supporti fissi in legno, per evitare che si rovinassero a causa dell'umidità propria del legno, che l'avrebbe danneggiata con la formazione di muffe.

3.4.2 – Metodi di preparazione dei campioni

Le carote sono state quindi trasportate in un luogo sicuro ed asciutto, per poi essere estratte una ad una dai propri supporti temporanei e trasferite su quelli fissi in legno menzionati in precedenza.
Questi supporti consistono in delle listarelle in legno, dotate di una piccola scanalatura al centro atta ad adagiare ed incollare mediante l'utilizzo di una modica quantità di colla vinilica la carota al suo interno.
Al fine di eseguire una buona preparazione dei campioni, è molto importante orientare le fibre del legno carotato in senso verticale (perpendicolarmente al supporto fisso), non utilizzare troppa colla ed assicurarsi che la carota sia diritta nella sua sede, senza curvare o deviare in qualsivoglia direzione.
Nell'eventualità in cui ci fossero state fratture o distaccamenti nei campioni, si è posta molta attenzione nella fase di incollaggio in modo tale da ricomporre con più precisione possibile le porzioni discontinue e si è scelto di incollare anche la

parte di corteccia, seppur separata dal resto della carota di pochi millimetri. Nei pochi casi in cui è risultata poco leggibile (perché danneggiata) la porzione iniziale del campione, si è annotata in un file la possibilità che mancassero uno o più, seppur pochi, anelli in modo tale da aver meno complicazioni durante la fase di analisi dei campioni.

Una volta terminata la fase di incollaggio, si è utilizzato del nastro adesivo alle estremità dei campioni in modo tale da farli aderire maggiormente ai relativi supporti per fare asciugare al meglio la colla vinilica ed evitare, così, che le carote o porzioni di esse si potessero distaccare dal supporto in legno.

Su ogni supporto è stato scritto, poi, in matita (e successivamente in penna nera) il "codice identificativo" del campione ad esso incollato, con gli stessi criteri riportati nel capitolo precedente.

In figura, supporto in legno con carota, riportante le scritte identificative "FAETO 15X FASY 26/09/19 48,3".

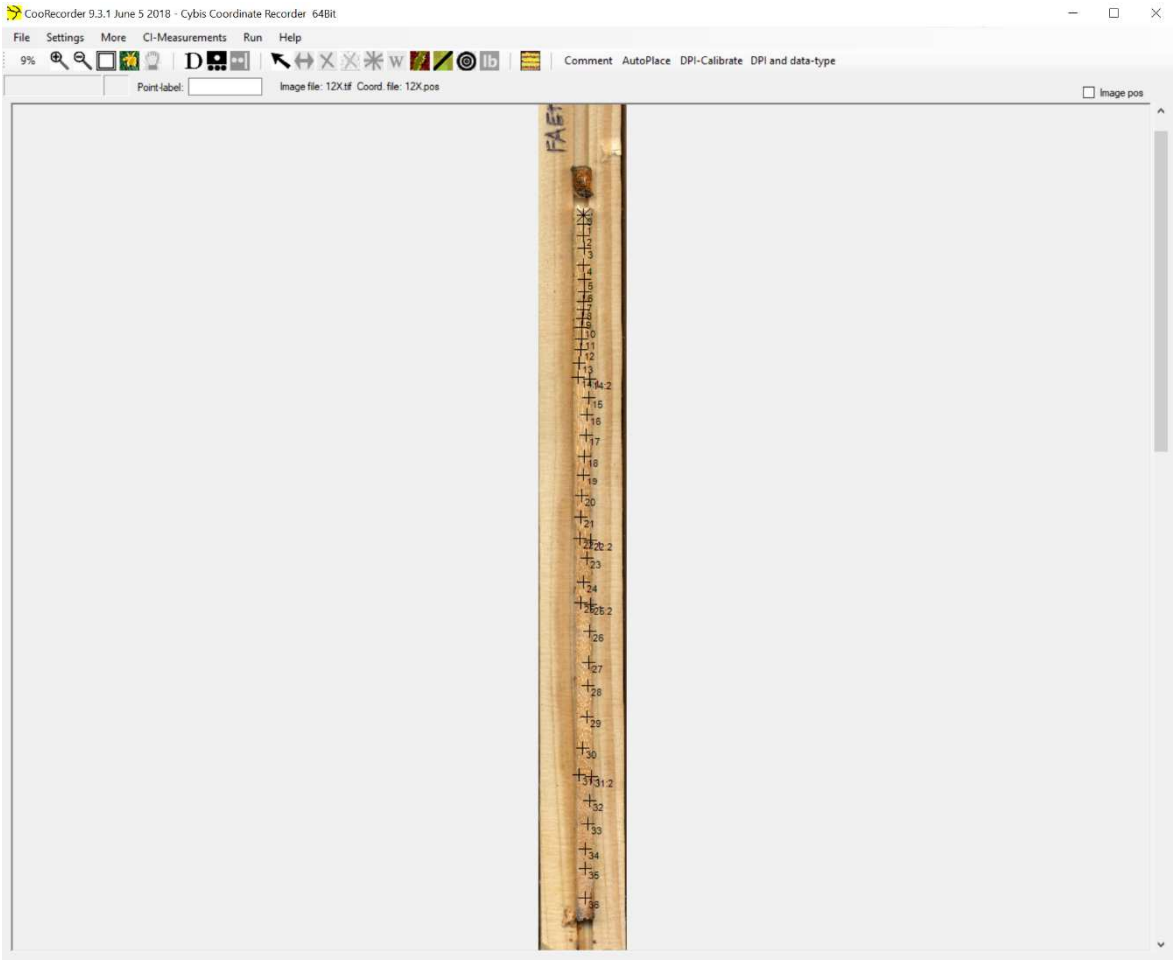
L'ultima fase di preparazione dei campioni è consistita nella levigazione degli stessi, mediante lamette professionali dotate di elevate robustezza ed affilatura. I campioni sono stati, dunque, bagnati con l'acqua per ammorbidirli al fine di evitare che le forti sollecitazioni trasversali della lametta potessero causarne un distacco dal supporto e scongiurare l'eventualità di una possibile rottura della carota.

Una volta ottenute superfici ben lisce e piane, si sono evidenziati gli anelli di ciascuna carota cospargendola con acqua e gesso ed è stato, infine, utilizzato uno scanner ad alta risoluzione (2400 px) presso il Centro di Ricerca Ge.S.Di.Mont. per ottenerne delle scansioni dotate di elevata qualità, caratteristica molto importante al fine di svolgere i passaggi successivi del lavoro (specialmente l'individuazione dei singoli anelli) con meno possibilità di errore possibile.

Concluso questo passaggio, la fase di preparazione dei campioni è terminata e si è proceduto con l'analisi degli stessi mediante l'utilizzo dei software CooRecorder e CDendro.

3.4.3 – Metodi di analisi dei campioni

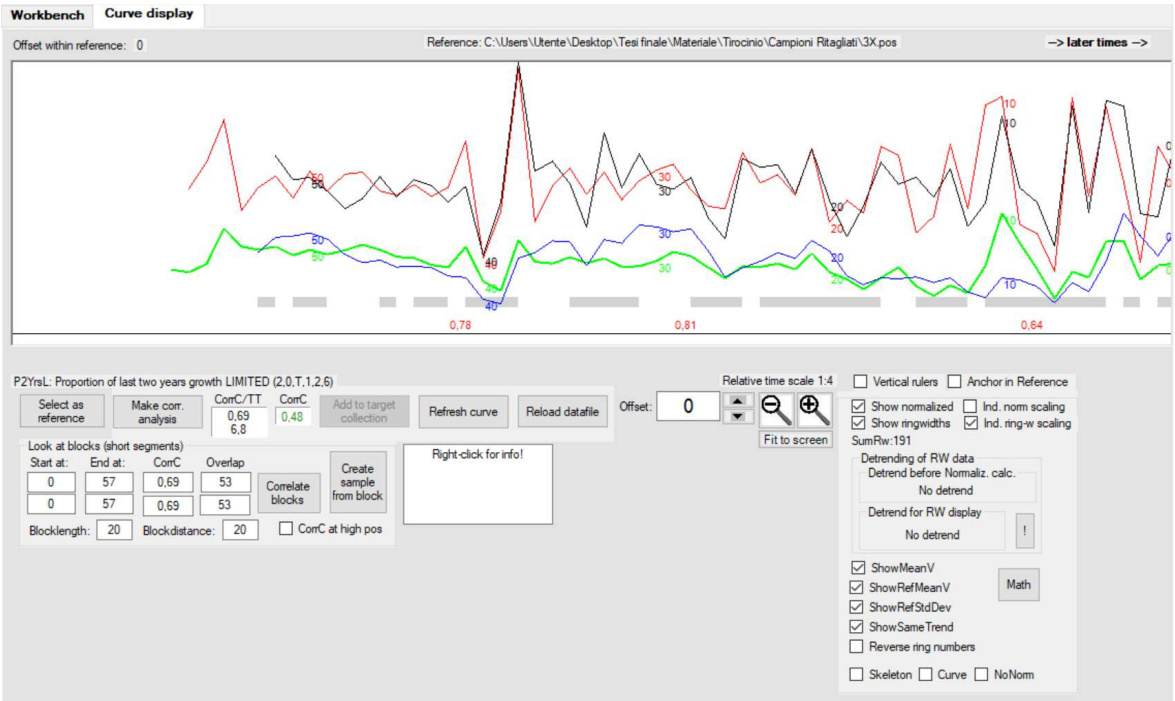
L'analisi dei campioni è stata eseguita utilizzando un computer ed il primo passo è consistito nel creare una serie dendrocronologica univoca e singola per ciascun campione grazie all'ausilio del software CooRecorder, un programma professionale concepito e sviluppato appositamente per la dendrocronologia.
La funzione principale di questo software consiste nella possibilità di ingrandire le immagini senza perdere risoluzione e potervi apporre dei punti numerati in corrispondenza degli anelli, in modo tale da poterne misurare il numero e l'ampiezza con estrema precisione (fino a 0,01 mm). È possibile, inoltre, stimare visivamente la posizione del centro dell'albero ed avere come output una stima del numero di anelli mancanti.



In figura, un esempio di una serie dendrocronologica singola creata mediante il software CooRecorder.

Compiere errori in questa fase, tuttavia, è molto facile in quanto è molto frequente imbattersi in falsi anelli o, addirittura, in anelli mancanti o poco leggibili che possono trarre facilmente in inganno gli operatori, specialmente se poco esperti del mestiere. Per ridurre al minimo l'eventualità che questi errori potessero verificarsi, durante la fase di campionamento si ha avuto la cura di eseguire due carotaggi per pianta, in modo tale da poterne confrontare direttamente le caratteristiche ed usare l'uno per verificare la correttezza analitica dell'altro ed evidenziarne eventuali incongruenze.
Per confrontare le cronologie delle singole carote con la loro "gemella" è stato utilizzato il software CDendro, un programma spesso usato in coppia con CooRecorder e creato dal medesimo sviluppatore.
La funzione principale di questa applicazione è proprio quella di permettere di caricare i file relativi a molteplici campioni, in modo tale da poterne confrontare in maniera rapida, visuale ed efficace le curve dendrocronologiche che appaiono a schermo, sia visualmente cercando di far combaciare l'andamento delle curve sovrapposte, sia statisticamente con l'ausilio di alcuni indici di correlazione riportati dal programma.
Per quanto riguarda la parte visiva del lavoro è stato possibile, infatti, impostare una delle cronologie come "reference", ovvero come riferimento e, utilizzando le frecce della tastiera verso sinistra e destra, far traslare di uno o più anni ognuna delle altre, in cerca di eventuali errori commessi nelle fasi precedenti e/o mancanza di anelli, individuandone le posizioni sul relativo campione.
Nel caso di questa eventualità si è utilizzato nuovamente CooRecorder per fare un ulteriore controllo in prossimità delle porzioni di carota le cui ampiezze anulari sono risultate anomale e/o erronee e, una volta trovato il problema, porvi rimedio talvolta aggiungendo, a volte rimuovendo oppure spostando la posizione degli anelli. Spesso, infatti, è bastato verificare e correggere leggermente la perpendicolarità tra marker anulari ed anelli per risolvere ed ottenere, una volta tornato su CDendro a controllare la bontà della correzione, indici di correlazione elevati. Al fine di verificare l'affidabilità dei dati, infatti, a supporto della fase visiva si sono sempre tenuti d'occhio gli indici di correlazione forniti in tempo reale dal programma, in particolar modo si è riposta l'attenzione all'indice "CorrC/TT", dove CorrC è la correlazione tra le due serie che si stanno

confrontando e TT è il valore di un test di T sull'ipotesi nulla che le due serie siano statisticamente simili. Sono da considerare affidabili e prive di sostanziali errori le cronologie che, una volta confrontate, presentano un indice CorrC/TT almeno superiore a 0,4 come valore numerico, ma nella realizzazione di questo lavoro si sono spesso ottenuti valori anche superiori allo 0,65 (nella figura seguente, per esempio, il CorrC/TT tra i campioni 3X e 3Y è risultato pari a 0,69) i quali confermano l'attendibilità dei dati.



In figura, un esempio di due curve dendrocronologiche a confronto sul software CDendro.

Una volta verificata la corrispondenza tra le coppie di campioni relativi a ciascuna pianta, si è effettuata una media dell'ampiezza degli anelli di ogni anno in modo tale da poter utilizzare un singolo file per pianta, sotto forma di media (in formato wid), nelle fasi successive di analisi.

Questa fase, fondamentalmente, è consistita nell'effettuazione del cosiddetto crossdating, sia visuale che statistico e le cui finalità e caratteristiche sono già state spiegate nel capitolo relativo la dendrocronologia, delle singole cronologie di ciascuna coppia di carote per ottenerne una media, per poi confrontare le medie tra loro ed ottenere, in conclusione, un unico file atto a rappresentare

statisticamente tutti i faggi dell'area di studio i cui dati si sono rivelati coerenti ed attendibili fino alla fine della procedura.
Nel corso delle varie fasi del lavoro, a partire dal campionamento fino al termine dell'analisi, infatti, dalle 36 carote (18 coppie X/Y) che inizialmente sono state prelevate, preparate ed analizzate, si è giunti ad utilizzare i dati di solamente 19 campioni, ovvero di 7 coppie e di 5 carote singole che durante la fase di confronto con la propria "gemella" hanno evidenziato errori operativi e/o difetti naturali della loro controparte. Per questo motivo, al fine di non inquinare i dati della media finale, si è scelto di escludere tutte quelle carote i cui dati e relative curve dendrocronologiche siano risultati troppo discordanti con la maggioranza.

La fase finale del processo analitico, ovvero l'elaborazione vera e propria dei dati, è stata effettuata utilizzando le grandi potenzialità del programma Rstudio che è un programma open source, cioè a licenza gratuita, che vanta di un ambiente di sviluppo integrato in cui lo spazio di lavoro è formato da quattro parti: l'editor, la console, l'import dataset/history ed un menù orizzontale composto da files, plotes, pacchetti, aiuto ed il viewer.
Fondamentalmente Rstudio è un pacchetto statistico di R che permette di elaborare dati, eseguire calcoli di varia natura e complessità, ottenere rappresentazioni grafiche e molto altro.
Per prima cosa, dunque, sono state utilizzate le cronologie stazionali una per una e con esse è stato fatto un report statistico essenziale sulle stesse.
Le statistiche ottenute come output sono il numero di serie e di misurazioni, la lunghezza media di ciascuna serie, il suo range e la sua durata, così come l'intercorrelazione e l'autocorrelazione.
L'intercorrelazione serve per confrontare serie diverse tra loro in cerca di relazioni di dipendenza tra piante diverse, mentre l'autocorrelazione confronta la correlazione di una serie con sé stessa, ma con uno o più anni di ritardo.
Visto che con l'avanzare dell'età le piante tendono ad accrescersi in misura minore rispetto a quanto avviene durante l'età giovane, si è deciso di eliminare il trend dovuto all'età. Un altro motivo per cui si è deciso di fare questa scelta sta nel fatto che alcune ricerche hanno dimostrato che la fisiologia degli alberi con l'avanzare dell'età va incontro a cambiamenti notevoli e ciò potrebbe andare ad

alterare il feedback che otteniamo per quanto riguarda i segnali climatici legati alla crescita. È infatti noto che gli individui più anziani siano maggiormente vulnerabili a condizioni climatiche avverse e stressanti, in quanto si tratta di alberi più fragili e sensibili. Si è proceduto, quindi, "purificando" i nostri dati legati all'accrescimento effettuando un detrend esponenziale negativo ed un successivo detrend con linea flessibile (spline) impostando la frequenza e la lunghezza d'onda rispettivamente di 0,5 e di 0,67 volte la lunghezza di ciascuna serie.
Una volta fatto ciò, si è proseguita l'analisi calcolando il parametro rbar, che rappresenta la correlazione tra il trend ripulito e le nostre serie. I valori possibili vanno da 0 ad 1, dove l'1 significa che i differenti alberi sono perfettamente legati tra loro. Sono stati calcolati anche altri parametri come l'eps e il snr, che sono rispettivamente quando sia affidabile la cronologia ed il rapporto tra il segnale climatico e l'eventuale rumore, ovvero la variabilità non legata al clima.
Si è conclusa l'analisi cronologica utilizzando i dati relativi le cronologie medie al fine di creare dei grafici (chiamati ACF e PACF, sono utili per visualizzare le correlazioni globale e parziale, rispettivamente) ritraenti sia la cronologia standard, comprensiva di autocorrelazione, sia quella residua, ovvero quella che ne è priva. Come ultimo calcolo è stato ricavato l'indice di sensitività che essenzialmente indica la capacità degli alberi di reagire celermente ad eventuali stimoli esterni.
L'ultima parte del lavoro si è concentrata sull'analisi climatica. Al fine di ottenere ed utilizzare dati climatici corretti ed affidabili, si sono ricavati dal dataset climatico cru ts 3.1 della University of East Anglia (relativo al periodo 1900-2018) i dati climatici delle precipitazioni mensili e delle temperature medie mensili relativi ad un'area geografica di raggio pari a 0,05° il cui centro corrisponde esattamente alla nostra area di studio. La cronologia media standard del sito è stata correlata alle serie climatiche relative al periodo compreso tra il mese di giugno dell'anno precedente e luglio dell'anno in corso utilizzando la correlazione univariata di Pearson e la conclusione del lavoro di analisi dei dati è consistita nell'esaminazione della stabilità delle correlazioni climatiche nel tempo. A questo fine si sono calcolate le funzioni di risposta mobili tra le cronologie stazionali, la temperatura e le precipitazioni mensili su una finestra mobile di 25 anni con la cosiddetta procedura "bootstrap".

Capitolo 4 - Risultati

Come già accennato in precedenza, sono state scelte per questo studio 18 piante di *Fagus sylvatica*, di cui, però, sono arrivate alla fase analitica del lavoro solamente 12 serie valide ai fini dendrocronologici. Si è ottenuta, così, una cronologia stazionale di 65 anni, rappresentante il periodo 1955-2019 che è stato il più lungo (> numero di anelli) tra le piante campionate e relativo alla n° 7.

Numero di serie	Numero di misurazioni	Lunghezza media delle serie	Range	Durata	Intercorrelazione media delle serie (std dev)	Autocorrelazione media delle serie (std dev)
12	635	52,91667	65	1955-2019	0.46 (0.1)	0.7 (0.14)

In tabella, i risultati ottenuti elaborando i dati relativi le cronologie stazionali con Rstudio

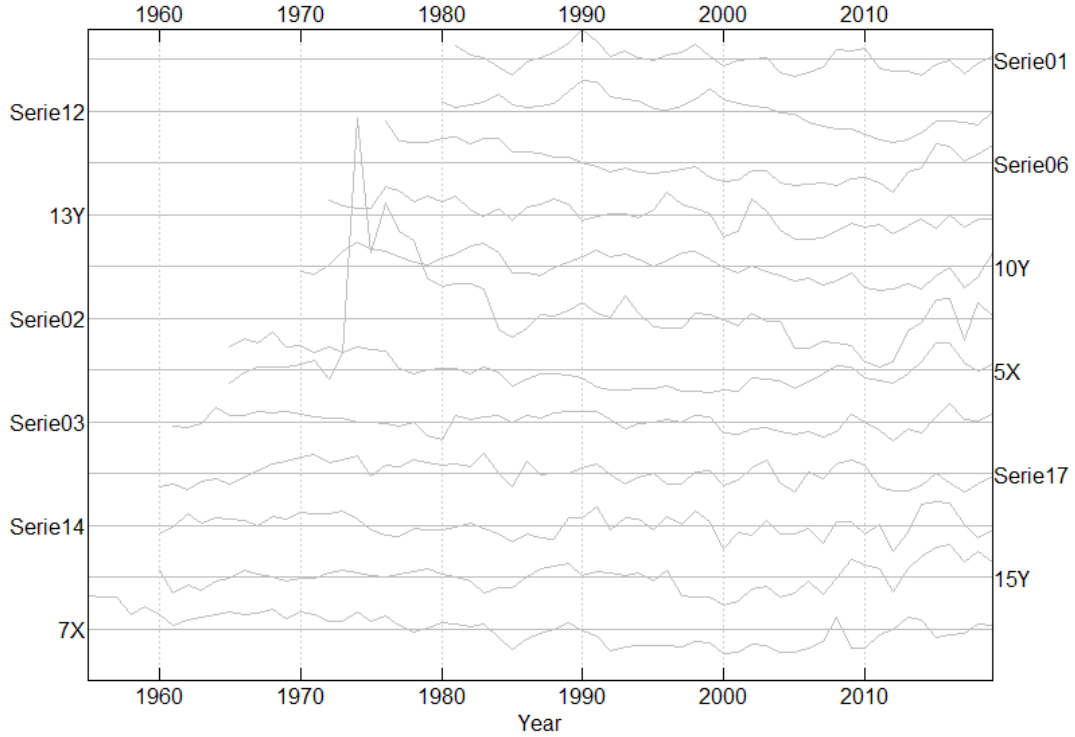
Come riportato in tabella, il numero di misurazioni è risultato essere pari a 635, con intercorrelazione media delle serie pari a 0,46 ed autocorrelazione media delle serie pari a 0,7.

Questi risultati confermano il fatto che all'interno di ogni cronologia individuale c'è un forte effetto di "memoria" sulle ampiezze degli anelli e che, come ovvio che sia, tra le diverse piante, seppur situate a poca distanza l'una dall'altra, queste correlazioni siano meno evidenti.

Le deviazioni standard dell'intercorrelazione e dell'autocorrelazione sono risultate essere piuttosto simili e pari rispettivamente a 0,1 e 0,14, il che conferma l'omogeneità dei dati utilizzati.

Successivamente sono state ricavate le cronologie stazionali, a partire dalla media delle cronologie, grazie alle quali si è poi proceduto con l'analisi climatica. Nel grafico che segue è possibile notare come si abbiano avuto molte informazioni relative al periodo più recente, dagli anni '70 in poi, mentre riguardo il periodo precedente (1955-1970) si ha avuto meno disponibilità di dati.

Il motivo di ciò sta nel fatto che la faggeta presa in esame è composta da alberi disetanei e di conseguenza alcuni di essi sono risultati essere meno anziani di altri.



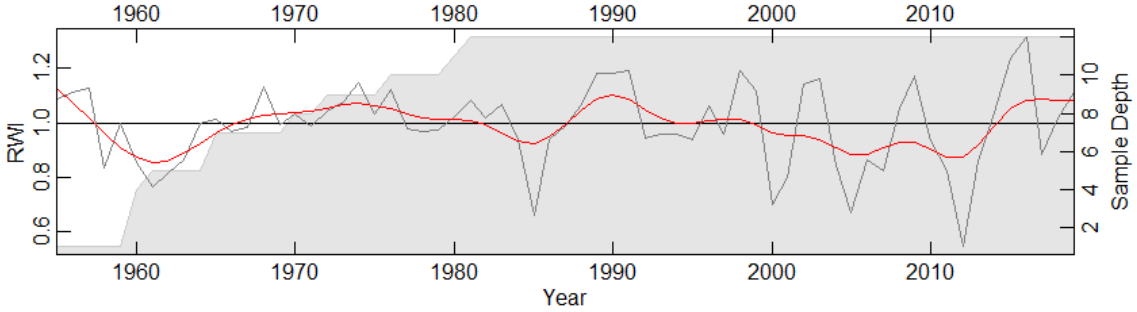
In grafico, le cronologie individuali dei faggi.

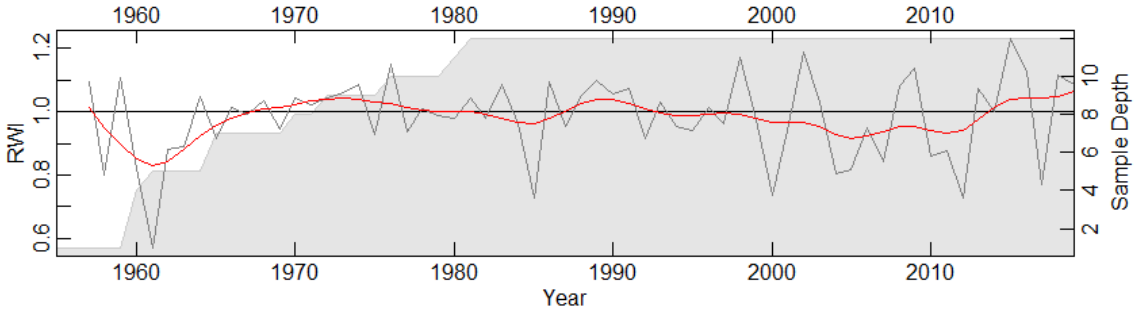
Utilizzando le cronologie stazionali come dati di partenza sono stati poi calcolati altri parametri importanti ai fini dello studio dendroclimatico, quali il rbar, l'EPS (expressed population signal) ed il SNR (signal to noise ratio).

Il parametro rbar è risultato essere piuttosto basso rispetto a quanto si avrebbe sperato, con il valore di 0,264, l'EPS è risultato essere pari a 0,778 e questo indica che le piante hanno risposto alle variabili esterne con modalità analoghe, mentre il valore SNR è risultato essere pari a 3,512, che denota una consistente presenza di variabilità non dovuta al clima (rumore).

La cronologia media dei nostri campioni va dall'anno 1955 all'anno 2019, con il numero massimo di 12 differenti serie di campioni a partire dal 1981.

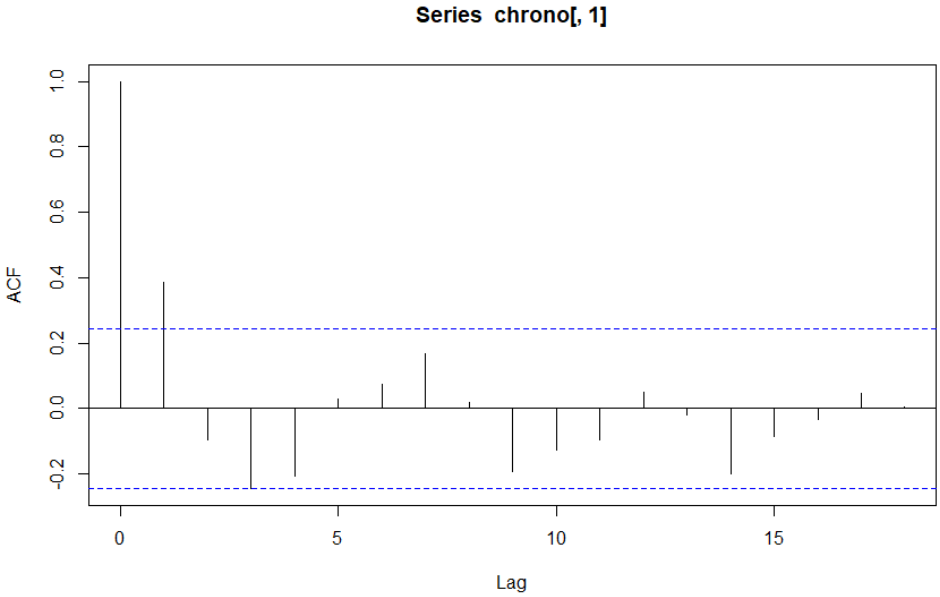
Nei grafici seguenti, di cui il primo è relativo alla cronologia standard, mentre il secondo si riferisce alla cronologia residua senza autocorrelazione, si possono notare una linea rossa ed uno sfondo grigio. La prima consiste in un "ammorbidimento" delle serie, mentre il secondo indica il numero totale di campioni che formano la cronologia in un dato anno.



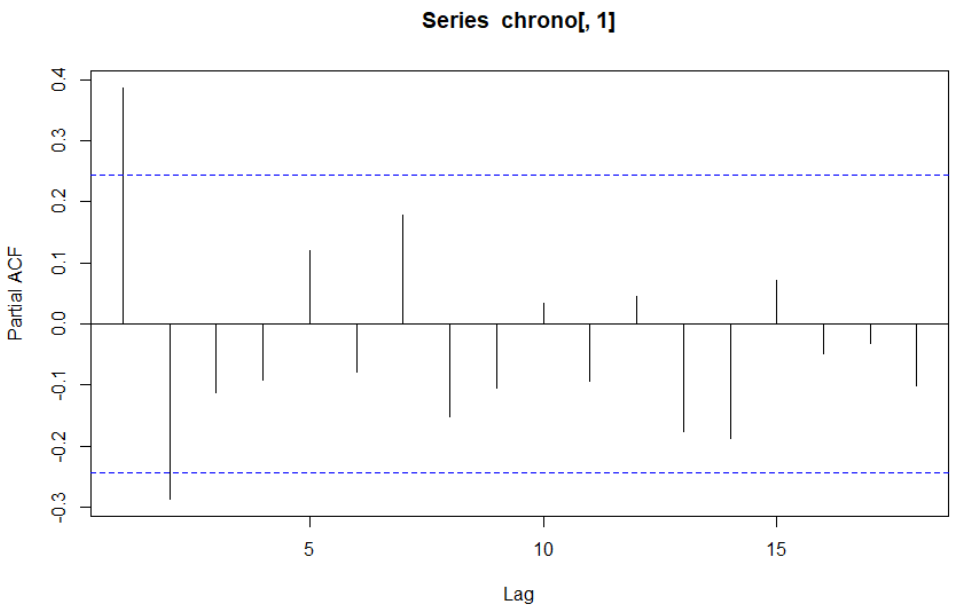


Nei grafici, in alto la cronologia standard, seguita dalla cronologia residua.

Successivamente sono stati elaborati i grafici relativi agli indici di correlazione globale ed autocorrelazione parziale delle piante di faggio, nei quali le linee tratteggiate di colore blu delimitano le zone del grafico in cui i dati hanno correlazione significativa (p<0,05).



In grafico, l'indice di correlazione globale.



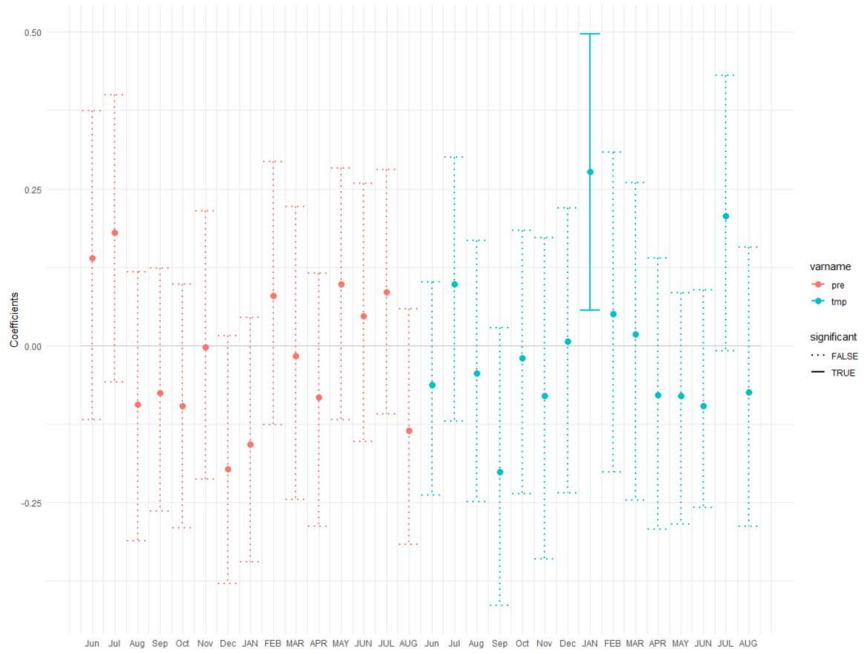
In grafico, l'indice di autocorrelazione parziale.

Come si può notare, non pare esserci alcuna autocorrelazione degna di nota nel primo anno, mentre nel successivo inizia ad esserci: leggendo i grafici da sinistra verso destra, si noti come nel primo tratto le linee verticali oltrepassino le orizzontali tratteggiate in blu, per poi proseguire entro i loro limiti.

Tra i due indici si è scelto di considerare più affidabile e, quindi, utilizzare l'indice di autocorrelazione parziale PACF in quanto l'indice di correlazione globale ACF indica solamente se un anello sia correlato ad un altro anello, mentre l'indice PACF ci mostra come un anello sia correlato o meno ad un altro anello di uno degli anni precedenti, bypassando l'ACF.

Il grafico seguente relativo le correlazioni climatiche è stato ottenuto correlando i dati relativi al RWI (ring width index, ovvero l'ampiezza degli anelli post standardizzazione e crossdating), le temperature medie (in blu) e le precipitazioni medie (in rosso) con funzioni di risposta multivariate.

I dati climatici sono relativi al periodo da giugno dell'anno precedente ad agosto dell'anno in corso.



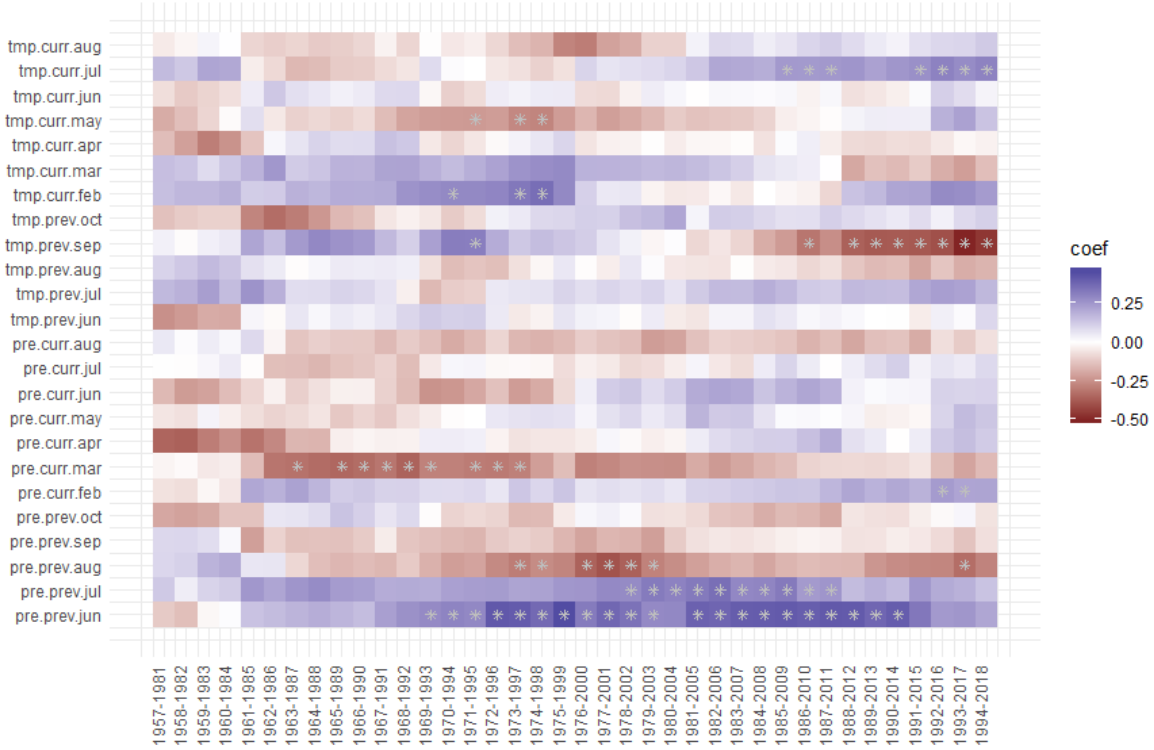
In grafico, correlazioni climatiche tra RWI, precipitazioni (rosso) e temperature (blu). Le linee continue esprimono correlazioni significative, quelle tratteggiate che si trovano quasi sopra o sotto la linea dello 0 possono comunque avere rilevanza statistica, mentre le correlazioni delle rimanenti linee tratteggiate non sono da considerare statisticamente significative. I mesi scritti in maiuscolo si riferiscono a quelli dell'anno in corso, mentre quelli in minuscolo a quelli dell'anno precedente.

L'osservazione di questo grafico ha evidenziato come le temperature di gennaio dell'anno corrente siano state, tra tutte, le più significative in termini di correlazione positiva. Sono da menzionare anche le temperature di luglio, sempre dell'anno corrente, che sono risultate essere molto vicine alla significatività statistica ed i cui output si sono distinti nei confronti di quelli relativi agli altri mesi, sia dell'anno precedente che di quello corrente. Per quanto riguarda la correlazione negativa, sempre riguardo le temperature, invece, è degno di nota solamente il mese di settembre dell'anno precedente che, tuttavia, raggiunge quasi la soglia della significatività.

In tema di precipitazioni, invece, non si ha avuto alcun riscontro pienamente significativo se non per quanto riguarda il mese di dicembre dell'anno precedente che, sebbene il suo output non risulti del tutto al di sotto della linea dello 0 in grafico, si è distinto rispetto agli altri mesi con la sua tendenza spiccata verso una correlazione negativa.

Come ultimo passaggio sono state calcolate le funzioni di risposta mobili, basate sul concetto che la correlazione clima-accrescimento può variare nel tempo e si

può osservare questo fenomeno utilizzando una finestra scorrevole di dati di 25 anni. Nel seguente grafico è possibile vedere come si dispongano nei mesi dell'anno precedente ed in corso le correlazioni positive (in blu), le correlazioni negative (in rosso) e, laddove siano presenti asterischi, si ha una correlazione pari o superiore al 95%, pertanto dotata di significatività.



In grafico, le funzioni di risposta mobili tra le variabili climatiche considerate e la cronologia stazionale dei faggi.

Relativamente al grafico di questo elaborato, si può notare come le temperature del mese di luglio dell'anno in corso abbiano un'influenza positiva, mentre sia risultato che quelle del mese di settembre dell'anno precedente abbiano una correlazione significativamente negativa.

Sono degni di nota anche il mese di febbraio (in corso) e quello di maggio (in corso) che hanno avuto una particolare influenza rispettivamente positiva e negativa, ma solo nel periodo 1970-1998.

Per quanto riguarda le precipitazioni, si sono riscontrate sostanziali correlazioni positive nei mesi di giugno e luglio dell'anno precedente nei tempi recenti, negative nei mesi di agosto dell'anno precedente e marzo dell'anno in corso nel periodo compreso tra il 1963 ed il 2003.

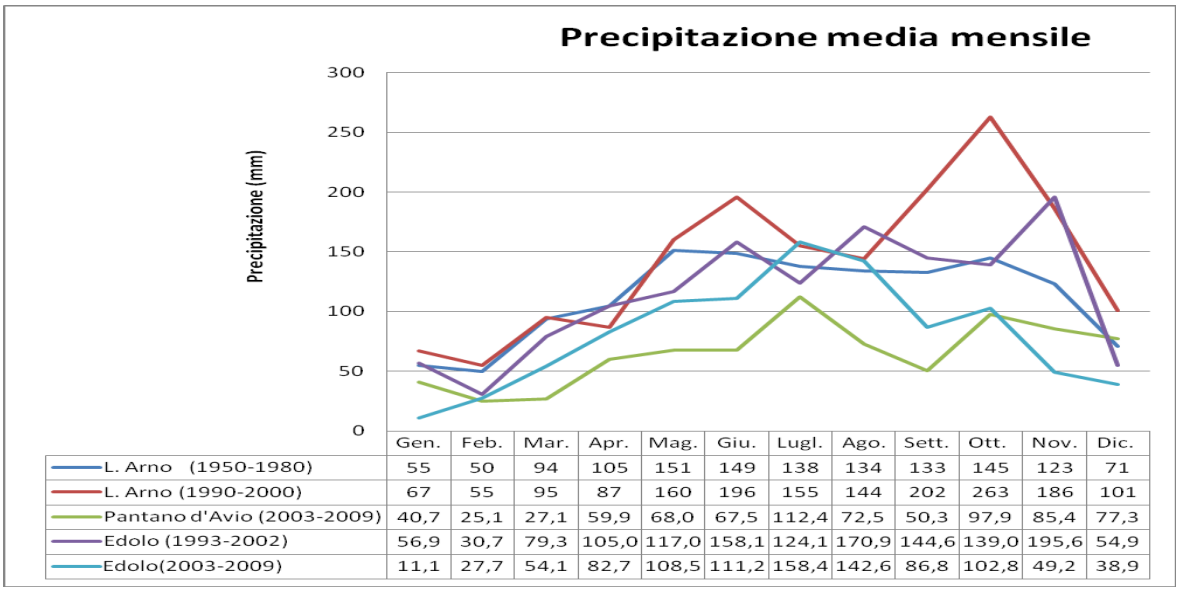
Sia relativamente alle temperature che alle precipitazioni, sono risultate esserci anche altre correlazioni sparse nei mesi e negli anni più disparati, ma ciò è considerabile meno rilevante rispetto alle evidenze menzionate in precedenza, in quanto questi fenomeni non rappresentano un trend consistente, bensì si tratta molto probabilmente di casualità non significative ai fini del nostro studio.

Capitolo 5 – Discussione

Dai risultati relativi alle correlazioni climatiche è emerso che le temperature dei mesi di gennaio e di luglio dell'anno corrente abbiano avuto un'influenza positiva sulla crescita del faggio, mentre per quanto riguarda una possibile influenza negativa sull'accrescimento di questa specie bisogna porre l'attenzione sul mese di settembre dell'anno precedente, i cui riscontri negativi sono spiccati in entrambe le analisi effettuate.
In tema di precipitazioni, invece, non è stata riscontrata alcuna significatività particolare, fatta eccezione per quella negativa relativa al mese di dicembre dell'anno precedente che, però, non dovrebbe avere particolare rilevanza.

La temperatura media del mese di gennaio nei pressi dell'area di studio, situata su di un versante esposto verso nord e quindi spesso ombreggiato in particolar modo durante i periodi estivo ed invernale e, quindi, soggetta ad un'escursione termica piuttosto contenuta, è risultata essere relativamente mite (con un valore medio registrato nei tempi recenti pari a 1,7 °C) in confronto a quella registrata a quote maggiori dove, invece, le piante devono far fronte a condizioni climatiche decisamente più estreme.
Una risposta positiva indica che più le temperature sono alte in un dato periodo, e meglio la pianta crescerà nella stagione successiva. Questo risultato lo si può spiegare considerando che la mineralizzazione della sostanza organica nel suolo, complici le temperature relativamente miti di gennaio nei pressi dell'area di studio, può aver permesso ai faggi campionati di preparare in anticipo la propria ripresa vegetativa nei mesi seguenti. Sempre in tema della relazione positiva che è risultata esserci relativamente alle temperature del mese di gennaio, si può anche ipotizzare il "contrario", ovvero che più sono basse le temperature e meno il faggio avrà la possibilità di crescere, a causa di eventuali danni da gelo diretti ed indiretti, come per esempio la possibile rottura delle cellule ipogee della pianta con conseguenti disidratazione, carenza di ossigeno ed aumento delle concentrazioni in termini di CO_2.
Le temperature medie del mese di luglio dell'anno corrente sono risultate essere favorevoli ai fini dell'accrescimento del faggio, in contrapposizione a quelle

riscontrate nel mese di settembre dell'anno precedente. Anche le funzioni di risposta mobili, infatti, hanno confermato l'influenza positiva sulla crescita del faggio delle temperature di luglio ed hanno evidenziato come anche le precipitazioni relative ai mesi di giugno e luglio siano positive in tal senso.



	Gen.	Feb.	Mar.	Apr.	Mag.	Giu.	Lugl.	Ago.	Sett.	Ott.	Nov.	Dic.
L. Arno (1950-1980)	55	50	94	105	151	149	138	134	133	145	123	71
L. Arno (1990-2000)	67	55	95	87	160	196	155	144	202	263	186	101
Pantano d'Avio (2003-2009)	40,7	25,1	27,1	59,9	68,0	67,5	112,4	72,5	50,3	97,9	85,4	77,3
Edolo (1993-2002)	56,9	30,7	79,3	105,0	117,0	158,1	124,1	170,9	144,6	139,0	195,6	54,9
Edolo(2003-2009)	11,1	27,7	54,1	82,7	108,5	111,2	158,4	142,6	86,8	102,8	49,2	38,9

Grafico e tabella relativi alle precipitazioni medie mensili registrate nelle stazioni L. Arno, Pantano d'Avio e Edolo nel corso del tempo. (Fonte: PGT Comune di Edolo)

MESE	Pantano d'Avio 2015-2019, °C medi	Istituto Meneghini 2015-2019, °C medi
Gennaio	-4.6	1.7
Febbraio	-3.2	4.0
Marzo	-0.9	8.0
Aprile	2.7	12.1
Maggio	5.7	14.9
Giugno	10.9	19.7
Luglio	13.2	21.8
Agosto	12.8	20.9
Settembre	8.1	16.4
Ottobre	4.6	12.1
Novembre	-0.2	6.8
Dicembre	-1.8	3.6

In tabella, temperature medie mensili relative al periodo 2015-2019 nelle stazioni Pantano d'Avio e Istituto Meneghini. (Fonte: ARPA Lombardia)

Come si può osservare nel grafico e nella tabella sopra riportati relativi alle precipitazioni medie mensili delle stazioni L. Arno, Pantano d'Avio e Edolo (Istituto Meneghini) e alle temperature medie mensili relative al periodo 2015-2019 delle stazioni Pantano d'Avio ed Istituto Meneghini, in prossimità dei mesi di giugno e luglio si nota una generalizzata tendenza ad avere abbondanti precipitazioni, accompagnate, però, da temperature relativamente elevate.
Gli elevati apporti idrici, che sappiamo essere molto importanti per il faggio ai fini di un buon accrescimento, da parte di precipitazioni brevi ed intense tipiche di questi mesi estivi, in combinazione al fatto che l'area di studio presenti, a tratti, una certa acclività e pietrosità, non fanno escludere l'eventualità che possano aver luogo fenomeni di ruscellamento durante i mesi estivi.
Considerato il fatto che il faggio sia estremamente sensibile ai ristagli ed agli allagamenti, questo fattore può esser ritenuto positivo e può avere, quindi, una buona influenza sulla crescita del faggio perché fa sì che l'acqua non permanga troppo a lungo e che quindi non si possa accumulare in prossimità delle piante creando ristagni potenzialmente pericolosi.

Nel caso di settembre dell'anno precedente è risultato come le temperature di questo mese abbiano avuto un effetto negativo per la crescita dei faggi campionati. Ragionando sulle possibili motivazioni per cui ci sia stato questo riscontro negativo, sono giunto ad ipotizzare che potrebbe essersi verificato il fenomeno del "masting", o "pasciona" in italiano, che consiste in annate con produzioni particolarmente abbondanti di semi e di frutti da parte di tutti, o quasi, gli individui arborei di un dato popolamento forestale. In genere questa condizione successivamente si alterna ad una o più annate con fruttificazione molto più scarsa rispetto alla media. È stato dimostrato come la pasciona nel faggio possa verificarsi in seguito ad un'estate relativamente calda e secca, con un effetto diretto che si traduce in un'induzione alla fioritura ed alla fruttificazione ingenti nel corso dell'anno successivo. Si pensa che le temperature di settembre siano risultate esser sfavorevoli per la crescita del faggio in quanto il fenomeno della pasciona comporta l'utilizzo di ingenti risorse da parte dell'albero, le quali sono sottratte principalmente dall'accrescimento.

Considerato il fatto che i faggi campionati si trovano a quote inferiori ai 1000 metri (nell'orizzonte sub-montano), al di sotto del loro orizzonte naturale ottimale che sarebbe in realtà quello montano (che va circa dai 1000 ai 1500 metri di quota), è presumibile che, complici le temperature estive leggermente più elevate (mediamente superiori ai 20 °C) rispetto a quelle alle quali è sottoposta normalmente questa specie, possano spesso verificarsi questi fenomeni di pasciona che comportano un dirottamento delle risorse delle piante verso la produzione di fiori, frutti e semi.

Le funzioni di risposta mobili, oltre a confermare quanto detto in precedenza, non hanno evidenziato particolari cambiamenti od inversioni di tendenza nel corso del tempo, ma hanno fatto emergere anche altre significatività interessanti, anche se probabilmente meno importanti ai fini del nostro studio e relative a periodi limitati di tempo, come l'influenza positiva delle temperature del mese di febbraio e la negativa di maggio in corso nel periodo 1970-1998, così come l'influenza negativa delle precipitazioni di marzo dell'anno in corso e dell'agosto precedente nel periodo 1963-2003.
L'assenza di variabilità nel tempo delle funzioni di risposta può esser spiegata dal fatto che il cambiamento climatico potrebbe non aver avuto un impatto decisivo sulla crescita dei faggi campionati, perciò si è ipotizzato che potessero trovarsi in condizioni non particolarmente limitanti.
Questo fattore spiegherebbe il perché non ci sia stata una vera e propria risposta da parte degli alberi ai cambiamenti climatici, e ciò è giustificabile introducendo la legge del minimo di Liebig, un principio ecologico che sostiene che in presenza di un processo naturale la cui velocità è regolata da una serie di fattori differenti, essa è principalmente influenzata da quello più limitante tra tutti.
È facile intuire, quindi, che all'aumentare del numero dei fattori climatici limitanti e della loro intensità corrisponda un riscontro sempre maggiore in prossimità degli anelli, come risposta ai cambiamenti climatici. Da questo si deduce che il feedback sia tanto più preciso quanto più si portano le piante al limite e che, dunque, nel nostro caso i faggi considerati non si trovassero in condizioni estremamente limitanti.

Un'altra motivazione che potrebbe spiegare la mancata variabilità risultata dall'analisi delle finestre mobili può essere il fatto che, a differenza di altri studi simili che hanno datato alberi secolari, avendo campionato una popolazione di faggi relativamente giovane, non si abbia avuto a disposizione dati a sufficienza per accorgersi di effettivi cambiamenti od inversioni di tendenza nel corso del tempo, dato che il periodo oggetto di studio è stato piuttosto limitato (solamente 65 anni). È stato dimostrato in altri lavori simili al mio, infatti, che determinate inversioni di tendenza si siano verificate solamente in periodi di tempo superiori ai 100 anni.

Non si esclude, infine, anche l'eventualità che si possa aver commesso alcuni errori durante i molteplici passaggi effettuati, e che questi possano aver contribuito ad inquinare i dati. L'indice di sensitività, purtroppo, è risultato più basso di quanto auspicato (0,15) e ci sono state alcune difficoltà in particolar modo nello svolgimento dei passaggi relativi alla datazione delle carote ed al crossdating. Il colore molto chiaro del legno del faggio, infatti, ha spesso contribuito a rendere piuttosto difficoltoso il riconoscimento degli anelli ed a volte la sua grande durezza mi ha obbligato ad imprimere molta forza e torsione nella fase di estrazione delle carote, causandone l'inevitabile rottura della parte più esterna in molti campioni. Questi ultimi sono stati incollati con più cura possibile per porvi rimedio, ma a volte non è stato possibile ricostruire perfettamente le carote, con un effetto diretto sulla qualità dei dati ottenuti essendo stato necessario, seppur in rari casi, stimare l'ampiezza di determinati anelli iniziali al posto di poterla comodamente osservare ad occhio.

Capitolo 6 – Conclusioni

Con il lavoro di tirocinio svolto si è cercato di analizzare gli accrescimenti dei faggi in un'area circoscritta del Monte Faeto di Edolo (BS) con il fine di determinare in che misura e con quali modalità i principali fattori e cambiamenti climatici possano avere effetto sulla crescita di questa specie.

Si hanno avuto, infatti, riscontri inequivocabili riguardo l'influenza positiva delle temperature e delle precipitazioni estive sull'accrescimento del faggio, in particolar modo nei mesi di giugno e luglio.

Dallo studio è emersa anche una significativa correlazione positiva relativa al mese di gennaio dell'anno corrente le cui temperature relativamente miti hanno permesso una buona mineralizzazione della sostanza organica nel suolo che favorisce la ripresa vegetativa delle piante nel corso dei mesi seguenti.

Il fatto che a queste ultime temperature, quasi mai al di sotto di 0 °C, siano corrisposti risultati positivi, ha permesso anche di confermare il fatto che più sono basse le temperature e meno il faggio riesca ad accrescersi, in quanto potenzialmente soggetto a danni da freddo.

Le temperature di settembre dell'anno precedente, invece, risultano avere influenza negativa per la crescita dei faggi campionati. Si ritiene che la spiegazione più plausibile di questo riscontro sia da ricondurre al fenomeno del "masting", o "pasciona" in italiano, che si può verificare alla fine di estati calde. L'utilizzo di massicce risorse per la fioritura e la fruttificazione può, dunque, aver comportato una deviazione delle stesse dal processo vegetativo. Considerando che l'area di studio sia situata ad una quota inferiore rispetto a quella in cui usualmente si trova *Fagus sylvatica*, si spiega come gli alberi campionati possano essere stati sottoposti a temperature leggermente più alte rispetto a quelle abituali nel periodo estivo.

Le funzioni di risposta mobili, oltre a confermare quanto detto in precedenza, non hanno evidenziato particolari cambiamenti od inversioni di tendenza nel corso del tempo.

I motivi di questi risultati possono essere molteplici, ma il più probabile è il fatto che i faggi considerati non si trovino in condizioni particolarmente limitanti, dando quindi una risposta debole o assente ai cambiamenti climatici.

Un altro motivo che potrebbe aver contribuito ad avere una mancata variabilità nel corso del tempo potrebbe identificarsi nella durata del periodo di tempo considerato, fin troppo breve per questo genere di studio essendo i faggi studiati relativamente giovani (il più anziano è risultato avere 65 anni).
Non si esclude, infine, che si possa aver commesso alcuni errori nel corso del lavoro, in quanto il legno del faggio si è rivelato essere di difficile lettura e dotato di una durezza considerevole, entrambi fattori che hanno complicato le varie fasi di raccolta dei dati.

Il cambiamento climatico, ormai oggetto di numerosi studi da parte della comunità scientifica, sta rapidamente cambiando il mondo che conosciamo.
È previsto ed assodato che le temperature medie globali siano destinate ad aumentare e che si verificheranno in futuro sempre più fenomeni estremi come grandi allagamenti e siccità prolungata.
Questi eventi saranno di certo deleteri per l'intero mondo vegetale, e non solo, ma in particolar modo per la specie *Fagus sylvatica* che è stato dimostrato essere estremamente vulnerabile in situazioni di carenze od eccessi di acqua prolungati nel tempo.
Secondo le previsioni e gli studi, infatti, il faggio sarà destinato a perdere sempre più la sua dominanza naturale all'interno degli ecosistemi in cui attualmente domina e costituisce la specie più importante della vegetazione naturale potenziale, rischiando di esser forzato ad occupare il piano dominato ed assumere un portamento arbustivo o, addirittura, a scomparire.

Capitolo 7 – Bibliografia e sitografia

7.1 - Bibliografia

Abramo E., Michelutti G., 1998. Guida ai suoli forestali, Regione autonoma Friuli-Venezia Giulia Direzione Regionale delle Foreste Servizio della Selvicoltura, Udine, Italia.

Baillie M.G.L., 1982. Tree-Ring Dating and Archaeology. University of Chicago Press, Chicago, Illinois.

Baillie M.G.L., Pilcher R., 1973. A simple crossdating program for tree-ring research. Tree-Ring Bulletin 33: 7-14.

Bannister B., 1962. The interpretation of tree-ring dates. American Antiquity, 27, 508-514.

Blasi C., Boitani L., La Posta L., Manes F., Marchetti M., 2005. Stato della biodiversità in Italia, Ministero dell'Ambiente della Tutela del Territorio, D.P.N. e S.B.I., Palombi, Roma, Italia.

Conti F., Abbate G., Alessandrini A., Blasi C., 2005. An Annotated Checklist of the Italian Vascular Flora, Ministero dell'Ambiente della Tutela del Territorio, D.P.N. e Dip. di Biologia Vegetale, Università degli Studi di Roma "La Sapienza", Palombi, Roma, Italia.

Dean J.S., 1997. Chronometric Dating in Archaeology, Advances in Archaeological and Museum Science Volume 2, 31-55. Springer-Verlag US, Springer, Boston, MA.

Del Favero R., Poldini L., 1998. La vegetazione forestale e la selvicoltura nella regione Friuli-Venezia Giulia, Regione autonoma Friuli-Venezia Giulia Direzione Regionale delle Foreste Servizio della Selvicoltura, Udine, Italia.

Dittmar C., Zech W., Elling W., 2002. Growth variations of Common beech (Fagus sylvatica L.) under different climatic and environmental conditions in Europe – a dendroecological study, Forest Ecology and Management, 173, 1-3, 63-78.

Eckstein D. and Bauch J., 1969. Beitrag zur Rationalisizierung eines dendrochronologischen Verfahrens und zur Analyse seiner Aussagesicherheit. Forstwissenschaftliches Centralblatt 88, Jahrgang 4: 230-250.

Ferrari M., Medici D., 2003. Alberi e arbusti in Italia, Edagricole, Bologna, Italia.

Fritts H.C., 1985. The Southern Oscillation and tree rings: 1600-1961. Journal of Climate and Applied Meteorology, 24, 952-966.

Fritts H.C., Swetnam T.W., 1989. Dendroecology: A Tool for Evaluating Variations in Past and Present Forest Environments, Advances in Ecological Research, 19, 111-188.

Gellini R., Grossoni P., 1997. Botanica forestale I e II, Cedam, Padova, Italia.

Gentilesca T., Todaro L., 2008. Tree-ring growth and climate response of silver fir (Abies alba Mill.) in Basilicata (Southern Italy), Journal of Silviculture and Forest Ecology, 5, 47-56.

Geßler, A., Keitel, C., Kreuzwieser, J. et al., 2007. Potential risks for European beech (Fagus sylvatica L.) in a changing climate, Trees, 21, 1-11.

Glock W.S., 1937. Principles and methods of tree-ring analysis. Carnegie Institution of Washington, Publication 486. Washington, D.C..

Grissino-Mayer H. D., 1996. Tree Rings, Environment, and Humanity (eds Dean, J. S., Meko, D. M. & Swetnam, T. W.), Radiocarbon, 191–204.

IPCC, Cambridge 2014. Fifth Assessment Report, United States Global Change Research Program “Global Climate Change Impacts in the United States”, Cambridge University Press 2009.

Lean J., 2010. Cycles and trends in solar irradiance and climate, WIREs, 1, 1, 111-122.

Lebourgeois, F., Bréda, N., Ulrich, E. et al. 2005. Climate-tree-growth relationships of European beech (Fagus sylvatica L.) in the French Permanent Plot Network (RENECOFOR), Trees 19, 385–401.

Lecchi A., 2019. Analisi dendroclimatologica 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.

Lockwood M., 2009. Solar Change and Climate: an update in the light of the current exceptional solar minimum, Proceedings of the Royal Society, 466, 2114.

Oreskes N., 2004. The Scientific Consensus on Climate Change, Science, 306, 5702, 1686.

Park Williams A., Allen C., Macalady A. et al., 2013. Temperature as a potent driver of regional forest drought stress and tree mortality. Nature Clim Change 3, 292–297.

Parmesan, C., Yohe, G., 2003. A globally coherent fingerprint of climate change impacts across natural systems. Nature 421, 37–42.

Peltier D.M.P., Ogle K., 2020. Tree growth sensitivity to climate is temporally variable, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey.

Peretto P., 2019. Relazioni tra clima e accrescimento su *Larix decidua* in Val Malenco, Facoltà di Scienze Agrarie e Alimentari, Università degli Studi di Milano.

Pignatti S., 1982. Flora d'Italia, Edagricole, Bologna, Italia.

Pirola A., 1999. Elementi di fitosociologia, CLUEB, Bologna, Italia.

Schweingruber F.H., 2012. Tree Rings: Basics and Applications of Dendrochronology, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, Netherlands.

Schweingruber F.H., 1988. Tree Rings: Basics and Applications of Dendrochronology. D. Reidel Publishing Company, Dordrecht, Netherlands.

Scoppola A., Blasi C., 2005. Stato delle conoscenze sulla Flora Vascolare d'Italia, Ministero dell'Ambiente della Tutela del Territorio, D.P.N. e Dip. Agrobiologia e Agrochimica Università degli Studi della Tuscia, Palombi, Roma, Italia.

Tevini M., 2012. PGT Comune di Edolo, 8-15.

Ubaldi D., 2003. Flora, fitocenosi e ambiente, CLUEB, Bologna, Italia.

Ubaldi D., 2003. La vegetazione boschiva d'Italia, CLUEB, Bologna, Italia.

Vieri W., 2018. Studio dendrocronologico e analisi delle relazioni clima-accrescimento nella foresta periurbana di Monte Morello (FI), Università degli Studi di Firenze.

7.2 - Sitografia

https://www.agraria.org/

https://www.epa.gov/

https://climate.nasa.gov/

https://www.waldwissen.net/

https://www.arpalombardia.it/

http://www.comune.edolo.bs.it/

https://www.ersaf.lombardia.it/

Ringraziamenti

Vorrei dedicare qualche riga a tutti coloro che mi hanno supportato e sopportato nel corso di questo lungo capitolo della mia vita.

Vorrei innanzitutto ringraziare il mio relatore Giorgio Vacchiano, che mi ha seguito ed aiutato, pazientemente, in questo percorso, condividendo la sua grande esperienza e dedicandomi il suo tempo prezioso.

Ringrazio con tutto il cuore mia mamma Deborah, mio papà Stefano e mio nonno Gianangelo, che mi sono stati accanto ed hanno creduto in me, grazie ai quali ho avuto la possibilità di proseguire e portare a termine il mio percorso di studi.

Ringrazio la mia fidanzata Desi che, nonostante la lontananza, mi è stata vicina, dandomi ogni giorno amore, sicurezza e motivazione.

Grazie anche ai miei compagni di studio, in particolar modo al mio collega ed amico Anthony con il quale ho condiviso innumerevoli ore di studio e fatica.

Un ringraziamento speciale va a mia nonna Giulia che, più di ogni altra persona al mondo, mi ha dato la forza di affrontare la vita ed il coraggio di credere in me stesso. **Sempre**.