



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA

Dip. TERRITORIO E SISTEMI AGRO-FORESTALI

Corso di laurea magistrale in Scienze Forestali e Ambientali

# Dinamiche di ricolonizzazione al limite superiore del bosco nelle Dolomiti Ampezzane

Relatore

Prof. Marco Carrer

Laureando

Giulio Zampiron

Matricola n.

1206556

ANNO ACCADEMICO 2020/21



# Indice

<b>Riassunto</b> .....	1
<b>Abstract</b> .....	3
<b>1. Introduzione</b> .....	5
<b>2. Descrizione sito e area di studio</b> .....	7
<b>2.1 Inquadramento geografico-fisico</b> .....	7
<b>2.2 Aspetti geo-pedologici</b> .....	9
<b>2.3 Clima</b> .....	10
<b>2.4 Descrizione area di studio</b> .....	11
<b>3. Materiali e metodi</b> .....	15
<b>3.1 Esecuzione del campionamento</b> .....	15
<b>3.2 Analisi statistica dei dati non spaziali</b> .....	17
<b>3.3 Analisi spaziale</b> .....	18
<b>4. Risultati</b> .....	25
<b>4.1 Caratteristiche strutturali</b> .....	25
<b>4.1.1 Caratteristiche strutturali popolazione 2020</b> .....	25
<b>4.1.2 Confronto caratteristiche strutturali 2004-2020</b> .....	28
<b>4.2 Point pattern analysis</b> .....	34
<b>4.2.1 Confronto 2004-2020</b> .....	38
<b>4.3 Surface pattern analysis</b> .....	43
<b>4.3.1 Altezza</b> .....	44
<b>4.3.2 Diametro</b> .....	48
<b>4.3.3 Età</b> .....	52
<b>5. Discussione e conclusioni</b> .....	55
<b>Bibliografia</b> .....	59



## Riassunto

Nel seguente lavoro è stata analizzata una delle tre aree di monitoraggio permanenti presenti nelle Dolomiti Ampezzane, più precisamente sulle pendici nord-orientali del gruppo dolomitico Croda da Lago. L'area, di 1 ha di superficie, è composta da un popolamento misto di larice (*Larix decidua*), pino cembro (*Pinus cembra*), pino mugo (*Pinus mugo*) e abete rosso (*Picea abies*). Questo sito, trovandosi alla treeline, è di particolare interesse in quanto la vegetazione è fortemente influenzata dalle condizioni climatiche limitanti e ciò permette di identificare chiaramente l'influenza delle variazioni del clima sul popolamento presente. Altra caratteristica peculiare è la mancanza di utilizzazioni significative dal XIX secolo, il popolamento ha quindi avuto la possibilità di evolversi liberamente per lungo tempo.

Nell'area sono state analizzate le caratteristiche strutturali, la distribuzione degli individui e la struttura spaziale del popolamento, considerando tutti i soggetti con altezza superiore a 1.30 m. Si è quindi proceduto a un confronto tra il medesimo popolamento censito nel 2004 e quello attuale.

I risultati hanno evidenziato come la vegetazione stia rispondendo ai cambiamenti climatici in misura sempre maggiore. Sono stati rilevati dei notevoli incrementi sia in diametro sia in altezza per tutte le specie arboree e anche la composizione specifica mostra segni di evoluzione. Infatti, la presenza di individui di abete rosso, di dimensioni anche rilevanti (oltre 5 metri), può essere ritenuta un primo segnale di come il popolamento si stia modificando sotto l'effetto delle temperature sempre più elevate.

L'utilizzo di metodi di analisi spaziale ha consentito di ottenere una visione più oggettiva della distribuzione degli individui e della struttura esaminati, permettendo un confronto tra le dinamiche e i processi evolutivi in atto. I risultati hanno indicato un'assenza della tipica aggregazione degli individui nei popolamenti di alta quota, dovuta probabilmente alla riduzione degli effetti limitanti del clima e una differenziazione per quanto riguarda la struttura spaziale della popolazione. Gli individui di maggiori dimensioni si concentrano nella porzione ad est dell'area mentre quelli di dimensioni inferiori nella zona ad ovest che corrispondono rispettivamente alle aree di minore e maggiore altitudine. Differenziazione che potrebbe essere dovuta anche alle differenze microstazionali nei caratteri pedologici e all'esposizione.

Grazie a questo studio mi è stato possibile osservare come le dinamiche dei popolamenti di alta quota stiano procedendo a ritmi tutt'altro che ridotti, soprattutto negli ultimi anni, non rispettando più strettamente le caratteristiche peculiari di un popolamento alla treeline.

## **Abstract**

In the present investigation, I analysed one of the three permanent plots in the Ampezzo Dolomites. The area of 1 ha is located at the treeline.

Here I analyzed the structural characteristics and the stand spatial distribution and structure to compare the present state with the conditions documented in 2004, when the permanent plot has been established.

The results showed that trees are increasingly responding to climate change. I noticed significant increases both in diameter and height for all the species and even the composition shows signs of evolution. In fact, the presence of spruce, even with a few individuals, but with relevant dimensions (over 5 meters), can be considered as a first sign of how the population is changing under the effect of rising temperatures.

Spatial analysis methods permitted to reach an objective view of the spatial distribution and structure of the individuals, allowing a comparison between ongoing dynamics and evolutionary processes. The results showed an absence of the aggregation of individuals typical of high-altitude populations. The biggest individuals are concentrated in the eastern portion of the area, while the smaller ones in the western one that correspond respectively to the lower and higher altitude parts.

No significant differences between the previous survey and the new one were noticed through spatial analysis.



## 1. Introduzione

L'influenza dell'uomo è stata ed è ancora oggi un elemento molto importante nell'evoluzione delle foreste in alta quota. In passato queste avevano principalmente una funzione produttiva, cioè di produzione di legname, e di pascolo per il bestiame. Ora si possono attribuire al bosco anche altre funzioni. Le foreste montane garantiscono, con la loro presenza, protezione idrogeologica e da valanghe per gli insediamenti posti nel fondovalle e una serie di servizi ecosistemici come la regolazione del ciclo dell'acqua, conservazione della natura e della biodiversità e stoccaggio della CO<sup>2</sup>, ma anche funzioni paesaggistiche e ricreative.

La pressione antropica nelle Alpi ha raggiunto il proprio culmine durante il periodo tra la Prima e la Seconda Guerra Mondiale, mentre dalla metà del Novecento si è registrata una notevole riduzione delle attività umane in foresta. Negli ultimi decenni, però, stiamo assistendo al progredire di una forma di pressione inedita, si sta infatti facendo sempre più forte l'influenza dei cambiamenti climatici.

Il ruolo che il clima esercita sulla distribuzione dei principali tipi di vegetazione è determinante. Le fasce vegetazionali, che a partire dalle zone più calde vedono il passaggio dai boschi sempreverdi mediterranei, a quelli temperati caducifogli, fino a quelli composti da conifere microterme, sono l'espressione più diretta dei rapporti che ci sono fra la vegetazione forestale ed il clima (Pignatti G. 2010).

Negli ultimi decenni le temperature medie sono cresciute all'incirca di 0.2°C ogni 10 anni e si stima che entro la fine del prossimo secolo la temperatura del bacino del Mediterraneo possa crescere di ulteriori 2-4°C. Infatti, a causa dell'aumento delle temperature medie annuali, ma anche dell'alterazione delle precipitazioni e di eventi meteorologici sempre più estremi per intensità e frequenza, il cambiamento climatico del pianeta sta già avendo effetti importanti sulle foreste, come, ad esempio, la modificazione della distribuzione delle specie e l'aumento del rischio di incendio.

I cambiamenti climatici influenzano in modo significativo la biodiversità forestale, sia per quanto riguarda la composizione specifica di un popolamento, sia i loro processi di migrazione e la loro variabilità genetica ma hanno conseguenze anche sulla fisionomia e sulla struttura delle biocenosi forestali, con effetti anche sull'ecosistema e sul paesaggio (Bordighetti M. et al, 2012).

Come conseguenza ai rapidi cambiamenti del clima, oltre alle condizioni ambientali, vengono a modificarsi anche gli obiettivi della gestione forestale, questa infatti non si trova più a operare con condizioni ambientali stabili nel tempo, ma si trova di fronte sempre più frequentemente a eventi imprevedibili, in uno scenario di incertezza e di rapido mutamento (Pignatti G. 2010).

Alcuni dei cambiamenti più importanti sono: l'anticipo dello scioglimento della neve in primavera; la diminuzione dello spessore del permafrost per l'aumento della temperatura del suolo; lo spostamento del limite superiore del bosco verso altitudini o latitudini più elevate. Per avere dei modelli predittivi più precisi è necessario quindi conoscere la dinamica delle foreste al limite superiore del bosco e il loro possibile accrescimento con le nuove condizioni ambientali (Anfodillo T. 2007).

Per questo motivo, in tale contesto, è molto importante, ancor di più che in passato, lo studio e la corretta comprensione delle dinamiche spaziali e temporali del bosco e in particolare della rinnovazione. È infatti la rinnovazione naturale a rendere possibile la continuità della foresta, sia nello spazio che nel tempo.

Al giorno d'oggi, per far fronte a queste sfide, diventano sempre più importanti le analisi spaziali per definire le strutture delle foreste e, di conseguenza, comprenderne le dinamiche. Questo tipo di analisi, è possibile principalmente mediante l'istituzione di aree di monitoraggio permanenti in cui tutti o la maggior parte degli alberi sono mappati all'interno di un sistema di coordinate, al fine di creare un'immagine del popolamento dove eseguire diverse analisi quantitative. Infatti, grazie alla creazione di parcelle di monitoraggio permanenti all'interno di foreste naturali è possibile, ripetendo le analisi negli anni e valutando l'attuale struttura forestale, stabilire in modo del tutto oggettivo come tale struttura si evolva nel tempo.

Il presente studio è stato condotto su una delle tre aree di monitoraggio permanente situate a diverse altitudini nell'area delle dolomiti Ampezzane, dove è stato avviato un progetto di monitoraggio a lungo termine nel 1994. Portando avanti un confronto con i dati e le analisi svolte nella medesima area nel 2004, l'obiettivo dello studio è stato quello di analizzare le dinamiche e la struttura spaziale della rinnovazione, e quindi, l'evoluzione del popolamento nell'arco degli ultimi 15 anni.

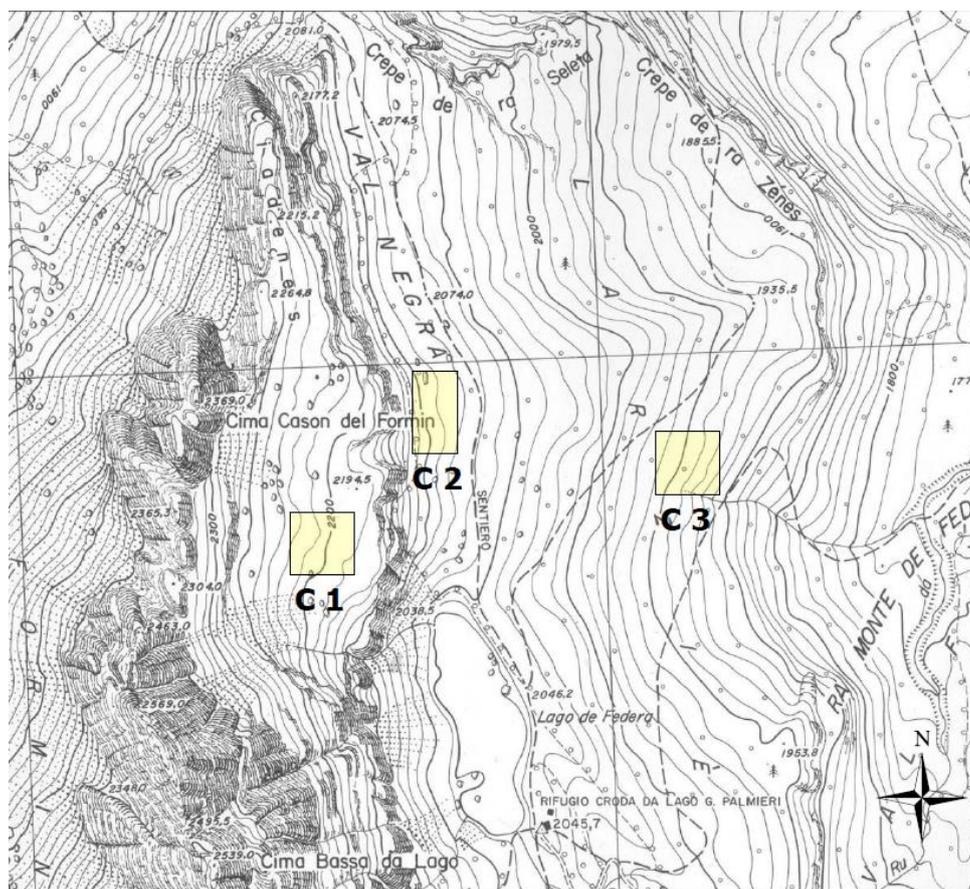
## 2. Descrizione sito e area di studio

### 2.1 Inquadramento geografico-fisico

Le aree di studio permanenti sopracitate si trovano sulle Dolomiti Ampezzane, una sezione delle Dolomiti, e si trovano in Veneto, più precisamente nella provincia di Belluno, prendendo il nome dal territorio dell'Ampezzo, di cui Cortina d'Ampezzo è il comune principale. In particolare ci troviamo sulle pendici nord-orientali del gruppo dolomitico Croda da Lago (Coordinate U.T.M. 5153250 N; 278000 E) a quote comprese tra 1900 e 2250m s.l.m.

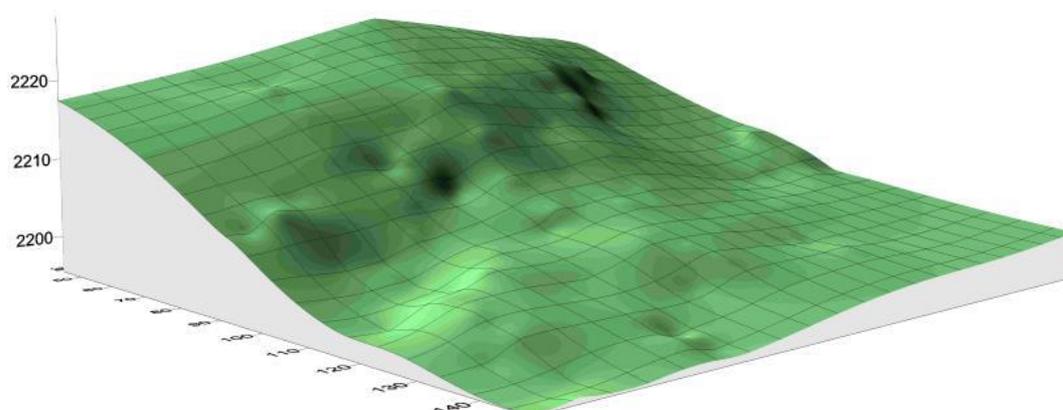


Fig. 1- Inquadramento generale dell'area



**Fig. 2 – Localizzazione delle tre aree su Carta Tecnica Regionale, Regione Veneto. Scala 1:10.000**

L'area denominata C1 è situata sulla sommità della piattaforma rocciosa posta alla base della cima Cason del Formin, si trova ad un'altitudine compresa tra 2190 e 2250 m s.l.m. e ha un'estensione di circa 1 ha con pendenza media superiore al 30%.



**Fig. 3 – Modello digitale del terreno dell'area C1**

La seconda area, denominata C2, è posta alla base della sopraindicata piattaforma in località Val Negra ed è delimitata inferiormente dal sentiero CAI n° 434 che conduce al Rifugio Croda da Lago. La quota è compresa tra 2070 e 2110 m s.l.m.

La terza area (C3), si trova in località Larziè a valle del sentiero CAI n° 431, a una quota compresa tra 1910 e 1960 m s.l.m. La morfologia è regolare, con una pendenza media circa del 20%.

Tutti e tre i siti distano l'uno dall'altro meno di due km e condividono la stessa esposizione prevalentemente a nord-est.

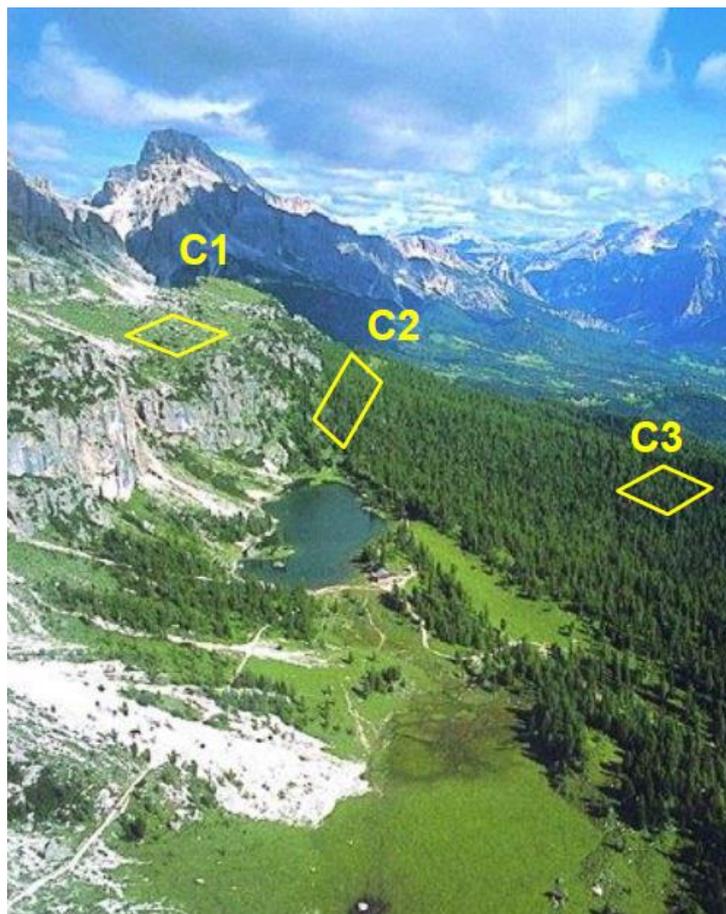


Fig. 4 – Fotografia aerea delle tre aree

## 2.2 Aspetti geo-pedologici

La regione dolomitica è caratterizzata da una grande variabilità di paesaggi, legata alla struttura geologica abbastanza giovane, alla dinamica morfologica e alla litologia degli affioramenti.

La dinamica morfologica, ad esempio, determinata dal concorso di condizioni geologiche, climatiche e dall'attività antropica, rappresenta un processo in continua evoluzione che modifica continuamente il paesaggio montano e influenza i processi di formazione e trasformazione dei suoli.

Inoltre, la notevole eterogeneità geologica della regione dolomitica, caratterizzata da rocce calcareo-dolomitiche molto resistenti all'erosione e da rocce vulcaniche e terrigene più facilmente erodibili (Carta dei suoli del Veneto, ARPAV 2005), associata alle condizioni climatiche differenti da una zona all'altra (ad esempio, le Dolomiti esterne sono più piovose di quelle interne che hanno minori precipitazioni) si può considerare come principale causa di un paesaggio molto vario (Neri & Gianolla 2007).

Quest'area in particolare si trova, secondo la carta dei suoli della provincia di Belluno, nella categoria DA che indica: "Alti e ripidi versanti e porzioni sommitali dei rilievi alpini, con estese coperture glaciali, su rocce appartenenti alla successione stratigrafica calcarea e terrigena dolomitica. Diffusi affioramenti rocciosi. Fasce subalpina e alpina. Quote: >1.900 m".

Più precisamente possiamo inserirla nella categoria DA1: "Suoli formati da litotipi carbonatici molto competenti. Sono localizzati su alti versanti e sommità di catene montuose principali, ad alta energia del rilievo, con comuni coperture di depositi glaciali e di versante. Suoli sottili, molto ghiaiosi, a bassa differenziazione del profilo e con accumulo di sostanza organica in superficie (*Rendzic Leptosols*)".

Possiamo dire quindi che il substrato roccioso è dolomitico e calcareo con suoli rendzici leptosol poco profondi alle quote più elevate e suoli marroni più profondi più comuni al livello subalpino.

### **2.3 Clima**

Il clima è caratterizzato da inverni secchi, con la maggior parte delle precipitazioni che si verificano durante l'estate e in autunno. Le precipitazioni annue sono in media attorno a 1175 mm.

Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic
48.8	50.8	67.8	96.0	121.0	130.9	135.3	123.5	104.5	121.3	113.9	61.1

Tabella 1 – Media mensile di precipitazione cumulata tra il 1900 e il 2019

La temperatura media annuale è di circa 2°C e i valori estremi di temperatura variano tra -13°C e 14°C, il mese più freddo e quello più caldo sono rispettivamente gennaio e luglio.

Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic
-5.7	-5.2	-3.1	-0.1	4.0	7.6	9.9	9.5	6.7	3.0	-1.8	-4.5

Tabella 2 – Media mensile di temperatura tra il 1900 e il 2019

L'evapotraspirazione media annua è di 395 mm con un massimo nei mesi estivi, in particolare in luglio, e quasi nulla o nulla negli altri mesi.

Gen	Feb	Mar	Apr	Mag	Giu	Lug	Ago	Set	Ott	Nov	Dic
0.0	0.0	0.5	8.5	48.5	76.2	92.1	82.6	56.0	28.7	1.3	0.1

Tabella 3 – Media mensile di evapotraspirazione tra il 1900 e il 2019

La stagione vegetativa si protrae tipicamente da giugno ad agosto.

Tali informazioni sono il prodotto della ricostruzione climatica realizzata dal dott. Michele Brunetti (ISAC-CNR) per il periodo 1900-2019.

## 2.4 Descrizione area di studio

Delle tre aree permanenti in questa tesi è stata analizzata l'area C1.

Si tratta di un popolamento misto di larice (*Larix decidua*), pino cembro (*Pinus cembra*), pino mugo (*Pinus mugo*) e abete rosso (*Picea abies*). La formazione può essere considerata un larici-cembreto a netta prevalenza di larice secondo la classificazione tipologica proposta da Del Favero (Del Favero e Lasen 1993).

L'area, tracciata nel 2004, rappresenta una delle non frequenti situazioni nelle nostre Alpi in cui il bosco è lasciato alla libera evoluzione da più di un secolo. Le indicazioni fornite dalle Regole d'Ampezzo escludono, infatti, utilizzazioni significative almeno dal secondo

dopoguerra, ma il periodo può essere esteso fino all'inizio del XIX secolo, grazie alla datazione di alcune ceppaie e fusti atterrati rinvenuti nell'area (Carrer M. 1997).



**Fig. 5 – Ceppaie e fusti atterrati rinvenuti nell'area C1**

L'area C1 si trova alla treeline, dove la copertura comincia a ridursi notevolmente e troviamo prevalentemente individui isolati o gruppi di poche piante definiti collettivi.

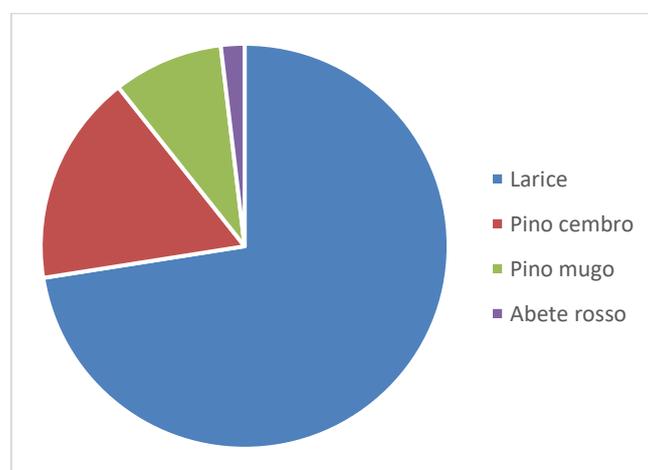
La treeline può essere definita come la linea che unisce gli individui eretti più alti di 2 m. Per albero si è quindi inteso indicare una pianta normalmente a portamento arboreo dell'altezza di almeno 2 m, anche se di forma irregolare. Si è scelta l'altezza di 2 m come valore discriminante per la classificazione degli alberi sulla base delle definizioni di Elleberg e Wardle (Körner, Christian, 2012) che fanno riferimento alla protezione esercitata dal manto nevoso in alta montagna su piante mediamente più piccole di questa misura.

Tale limite è importante in quanto la presenza di alberi sparsi ci indica che, in questa zona, l'intensità dei fattori climatici avversi non è tale da compromettere l'insediamento di alberi con portamento eretto e quindi l'esistenza di un bosco. Per questo motivo, la treeline può essere utilizzata come indice per definire il "limite potenziale del bosco".



**Fig. 6 – Aspetto generale dell'area**

La composizione specifica vede una netta prevalenza del larice con 116 individui (72%), segue il pino cembro con 27 (18%), poi il pino mugo 14 (9%) e l'abete rosso 3 (2%). Le poche piante di abete rosso rilevate appartengono tutte alla rinnovazione cresciuta negli ultimi anni. Nel precedente rilievo risalente al 2004, infatti, non erano state censite piante di questa specie.



**Fig. 7 – Distribuzione delle specie nell'area**

Di seguito è stata riportata una mappa con la posizione delle piante all'interno del plot.

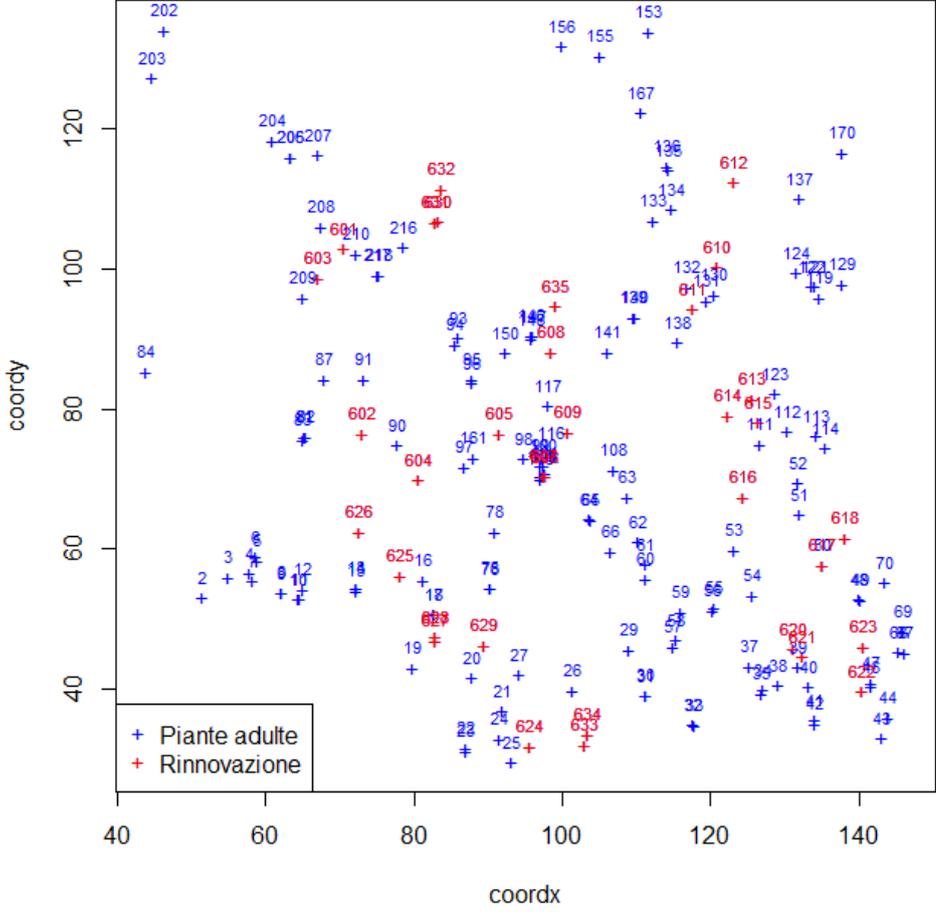


Fig. 8 – Mappa distribuzione delle piante divise in adulte e rinnovazione

### 3. Materiali e metodi

#### 3.1 Esecuzione del campionamento

Il campionamento ha coinvolto tutti gli individui arborei con altezza uguale o superiore a 1.30 m.

La raccolta dei dati è stata eseguita utilizzando come base di partenza i dati dei rilievi eseguiti nel 2004, dove erano riportati, oltre la specie e un numero di riferimento, le caratteristiche biometriche della pianta (altezza e diametro) e le coordinate utili per il riconoscimento e collocazione spaziale. Le coordinate erano state determinate con un rilievo topografico effettuato tramite teodolite elettronico, dotato di distanziometro a raggi infrarossi e registratore interno di dati.

Su tutte le piante è stata affissa nella corteccia una targhetta in metallo con riportato il codice identificativo della pianta. Per le piante già censite nel precedente rilievo sono stati utilizzati gli stessi codici numerati progressivamente, mentre per la rinnovazione ne sono stati usati di nuovi proseguendo con la numerazione.

Per misurare l'altezza è stato utilizzato un Trupulse. Strumento che comprende un sensore laser di portata, un sensore di inclinazione integrato, e un processore digitale. Lo strumento permette di eseguire misure come: distanza in pendenza, distanza orizzontale, distanza verticale, inclinazione, azimuth e altezza (procedura in tre passaggi).

Il diametro è stato misurato con una cordella metrica.

Tutte le piante aggiunte con il presente rilevamento sono state considerate come rinnovazione.



Fig. 9 – Trupulse 360 e schermata dello strumento

### Aggiornamento dei dati e censimento nuove piante

Il database del 2004 è stato quindi aggiornato al 2020 misurando altezza e diametro attuali degli individui precedentemente censiti e con l'aggiunta di tutti gli individui che, all'interno dell'area, avessero superato 1.30 m di altezza.

Il rilevamento della rinnovazione ha riguardato tutte le piante più alte di 1.30 m di altezza e che non erano presenti nel precedente censimento perché non presenti e/o di dimensioni inferiori a 1.30 m. Di queste sono state riportate:

- n° etichetta
- specie;
- coordinate;
- età;
- diametro a 1.30 m;
- altezza totale;
- altezza di inserzione della chioma;
- dimensioni della chioma,

Le coordinate sono state calcolate appoggiandosi alle piante già presenti. Per ogni nuova pianta sono state scelte due piante di riferimento, dalle quali, misurando la distanza dalla pianta da aggiungere, prima utilizzando il trupulse e poi con una cordella metrica come conferma, è stato possibile determinare le coordinate x e y.

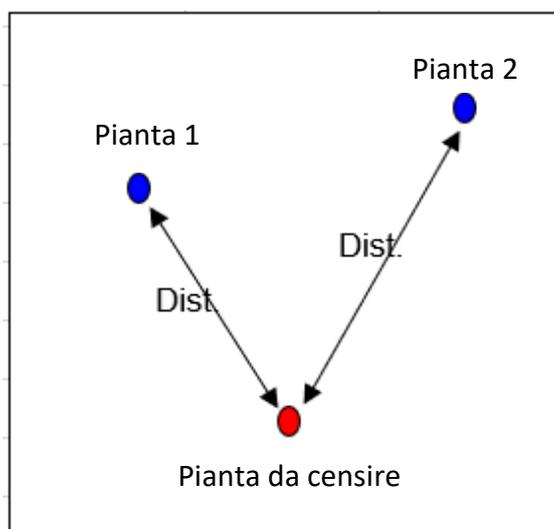
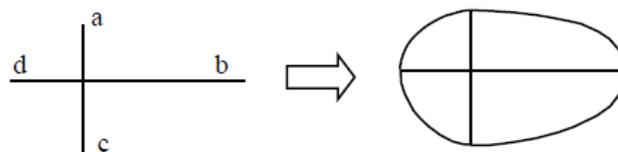


Fig. 10 – Illustrazione metodo per il calcolo delle coordinate

Inizialmente le coordinate sono state calcolate anche attraverso un altro metodo per poter ottenere un confronto. Si è optato di non utilizzare per il calcolo delle coordinate la distanza e l'azimut presi da una sola pianta di riferimento poiché l'area è caratterizzata da un'anomalia magnetica che non permette di determinare con precisione il Nord.

L'età è stata calcolata contando il numero di palchi partendo da 1.30 m.

Il diametro e l'altezza di inserzione della chioma sono stati misurati con una cordella metrica. Per le dimensioni della chioma sono state prese le proiezioni dei quattro raggi: a destra, a sinistra, a monte e a valle.



**Fig. 11 – Proiezioni dei quattro raggi della chioma**

### **3.2 Analisi statistica dei dati non spaziali**

#### Media

Nel presente elaborato quando parliamo di diametro ed altezza medi non sono stati utilizzati i valori medi solitamente intesi in campo forestale, dove il diametro medio è il diametro corrispondente all'albero di area basimetrica media e l'altezza media quella della pianta con volume medio. Qui infatti la media utilizzata è quella aritmetica, che permette uno studio più specifico a livello ecologico sulle dinamiche evolutive del popolamento.

#### Coefficiente di correlazione:

Il coefficiente di correlazione assume valori compresi tra -1 e 1. Quando è positivo significa che esiste una relazione tra i valori delle due serie di misure prese in considerazione. Perciò all'aumentare di una si osserva anche un aumento dell'altra. In caso di correlazione negativa alla variazione di una variabile corrisponde, in senso contrario, quella dell'altra.

Un coefficiente di correlazione prossimo a 0 indica assenza di relazione tra le variabili.

$$\text{Correl}(X, Y) = \frac{\sum(x - \bar{x})(y - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x - \bar{x})^2 \sum(y - \bar{y})^2}}$$

### 3.3 Analisi spaziale

L'analisi spaziale prevede che ogni evento o variabile oggetto di studio sia univocamente individuata nello spazio dalle proprie coordinate e comprende principalmente due categorie di metodi:

- Point pattern analysis: si occupa dello studio della distribuzione che i punti assumono nello spazio;
- Surface pattern analysis: in questo caso la disposizione dei punti non è più l'oggetto principale delle analisi. Infatti risulta essere solo un'informazione complementare ai dati quantitativi associati ai punti che rappresentano misurazioni discrete di un fenomeno. Lo scopo delle analisi è quindi comprendere il processo che genera i valori osservati in modo da prevedere, attraverso l'utilizzo di modelli, i valori che le variabili considerate assumono in qualunque altro punto dell'area di studio.

Questi due metodi ci permettono di analizzare il popolamento da due punti di vista diversi.

La point pattern analysis si concentra sulla distribuzione spaziale degli individui, solitamente confrontando la reale distribuzione degli individui con quella teorica per una distribuzione casuale.

La surface pattern analysis invece analizza la variabilità dei dati quantitativi nello spazio.

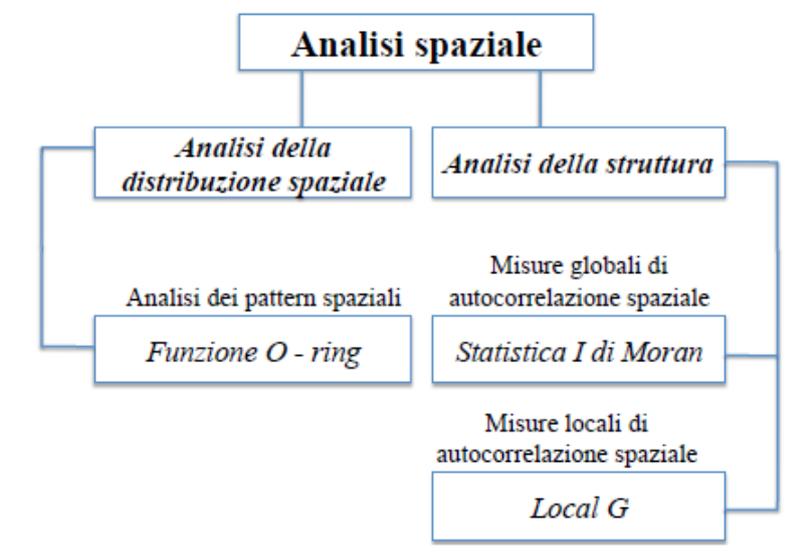


Fig. 12 – Metodologie di analisi spaziale utilizzate

### Point pattern analysis (analisi della distribuzione spaziale)

L'analisi per punti (point pattern analysis) permette di stabilire quantitativamente l'intensità della distribuzione dei punti all'interno dell'area presa in esame, confrontando per determinate scale spaziali, il numero di eventi atteso in condizioni di completa casualità con il numero di eventi della distribuzione osservata, deducendo così se gli eventi siano più o meno concentrati rispetto al valore casuale atteso (Renzaglia, 2008).

È possibile applicare due metodi: la Ripley's K-function  $K(d)$ , e la O-ring statistic  $G(r)$ . Entrambi indicano la presenza di aggregazione o dispersione nella distribuzione spaziale e si differenziano nella diversa valutazione della distribuzione degli individui all'interno del popolamento.

Il metodo di Ripley considera il numero di individui che si trovano entro una stabilita distanza da un individuo  $i$ . Perciò, tale statistica, rappresenta il numero stimato di punti in un'area circolare di raggio  $r$ , avente il centro in un punto casuale, quantificando l'intensità spaziale del pattern (Wiegand, 2004).

$$K(r) = \frac{\lambda^{-1} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n I_t(e_i, e_j)}{n}$$

Il metodo O-ring, invece, conta solo il numero di individui a una certa distanza. Quindi, a parità di raggio, il metodo di Ripley esegue l'analisi all'interno di un'area circolare, mentre il metodo O-ring conta soltanto gli individui che si trovano all'interno di una corona circolare di raggio  $r$ .

$$L(r) = \sqrt{\frac{K(r)}{\pi}} - r$$

La funzione  $K$  cumulativa può rilevare l'aggregazione o la dispersione fino a una data distanza  $r$  ed è quindi appropriata se il processo in questione può influire solo fino a una certa distanza (ad esempio l'effetto negativo della concorrenza), mentre la statistica dell'O-ring può rilevare aggregazione o dispersione a una data distanza  $r$  (Wiegand & Moloney 2004).

In questa analisi è stato scelto di utilizzare il metodo O-ring. Il metodo di Ripley ha infatti il limite di non discriminare fra gli individui trovati a distanze minori o maggiori, ma vengono

contati allo stesso modo tutte le piante presenti all'interno dell'area di raggio  $r$ . Con l'analisi ad anelli si ha il vantaggio di poter isolare una specifica classe di distanza.

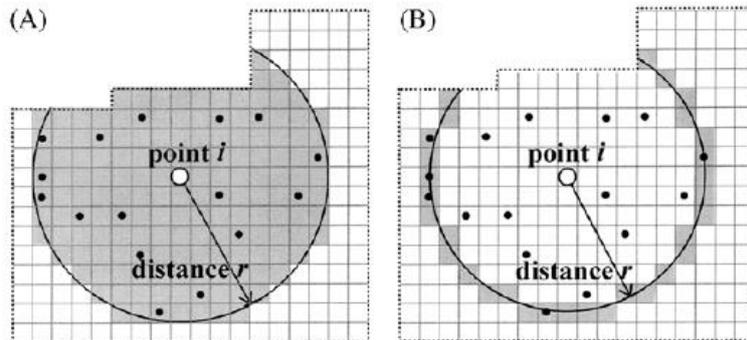


Fig. 13 – Rappresentazione della funzione K di Ripley e della O-ring statistic (Wiegand & Moloney 2004)

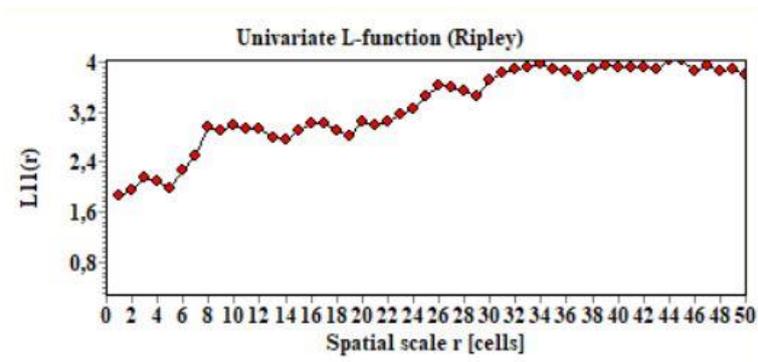


Fig. 14 – Esempio di grafico ottenuto con la funzione K di Ripley

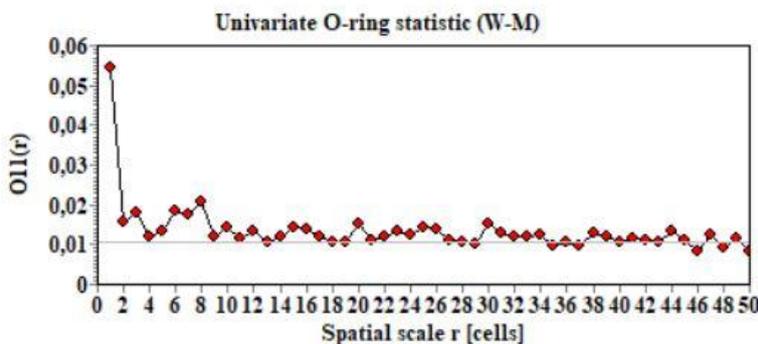


Fig. 15 – Esempio di grafico ottenuto con la statistica O-ring

L'analisi è stata eseguita tramite il software "Programita" sviluppato da Thorsten Wiegand. Questo può eseguire la point pattern analysis utilizzando sia il metodo di Ripley che O-ring. Il calcolo della statistica dell'O-ring implica una decisione tecnica sulla larghezza degli anelli e la distanza massima  $d$ , entro la quale elaborare i dati. Chiaramente, l'uso di anelli di dimensioni

eccessivamente ridotte produrrà risultati poco stabili poiché spesso un numero insufficiente di punti ricadrà nelle diverse classi di distanza. D'altra parte, se gli anelli sono troppo larghi si rischia di non essere in grado di isolare classi di distanza specifiche e potenzialmente interessanti.

Anche la misura del lato della griglia utilizzata nell'analisi è un elemento importante, visto che tanto più larga è la maglia, tanto maggiore risulta il numero dei singoli individui che ricadono all'interno della singola cella. Per le aree oggetto di studio, si è ritenuto opportuno scegliere un lato di griglia di 1 metro.

Il software è in grado di calcolare il livello di significatività del test confrontando i dati reali con i risultati ottenuti con ripetizioni multiple tramite il metodo di Monte Carlo. È possibile modificare il numero di ripetizioni e altri parametri delle simulazioni.

È possibile anche creare un'analisi bivariata, per confrontare due gruppi con caratteristiche differenti come specie diverse o differenti classi di altezza, diametro o età. Fornisce il numero atteso di punti del pattern 2 alla distanza  $r$  da un punto arbitrario del pattern 1. I valori positivi al di sopra delle curve di significatività esprimono attrazione tra due gruppi, mentre quelli al di sotto repulsione e quelli compresi tra i limiti di significatività indicano la mancanza di interazione tra gli stessi e quindi una distribuzione di tipo casuale. L'attrazione o la repulsione tra i due gruppi viene letta come una propensione delle piante dell'area considerata a distribuirsi in maniera aggregata, indipendente o repulsiva sulla base del parametro scelto.

Per tutte queste analisi è sempre necessario utilizzare il modello nullo appropriato, in relazione alle ipotesi biologiche da verificare.

#### Surface pattern analysis (analisi della struttura)

Lo scopo di questa categoria di metodi è di determinare e quantificare l'autocorrelazione spaziale delle variabili prese in esame. Se i valori di una variabile in una determinata località dipendono dai valori che la stessa variabile presenta nelle localizzazioni contigue si è in presenza di autocorrelazione spaziale (Legendre e Fortin 1989).

Le strutture spaziali possono essere descritte da funzioni strutturali attraverso elaborazioni statistiche che permettono di quantificare la dipendenza spaziale della variabile considerata in relazione alla distanza. Tra le più comunemente usate ci sono i correlogrammi. Un correlogramma è un grafico nel quale i valori di autocorrelazione vengono posti in ordinata, mentre in ascissa le classi di distanza.

- Autocorrelazione spaziale globale

Quando analizziamo una variabile, le classiche statistiche descrittive forniscono informazioni sintetiche sulle caratteristiche quantitative della variabile stessa nel suo complesso. Gli indici di autocorrelazione spaziale, invece, permettono di determinare la dipendenza dei valori espressi in un determinato ambito, da una variabile rispetto a quelli che la stessa variabile produce in ambiti vicini. Consente inoltre di valutare, statisticamente, la tipologia distributiva degli individui nello spazio bidimensionale, in funzione di un loro carattere quantitativamente o qualitativamente definito (Beretta, 2016).

I principali indici statistici utilizzati per testare il grado di autocorrelazione spaziale sono l'indice I di Moran (Moran 1950) e l'indice c di Geary (Geary 1954). Nel presente studio è stato utilizzato l'indice di Moran.

$$I(d) = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{W \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}$$

Dove:

- $n$  è il numero di eventi
- $x_i$  il valore della variabile considerata nel punto "i"
- $x_j$  il valore della variabile considerata nel punto "j"
- $\bar{x}$  la media della variabile considerata
- $w_{ij}$  fattore di ponderazione per la coppia di piante  $i$  e  $j$  1 se le piante  $i$  e  $j$  ricadono nella stessa classe di distanza, 0 negli altri casi
- $W$  somma ricavata dalla matrice dei pesi:  $\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}$

Applicando l'indice di Moran si ottiene un valore di autocorrelazione, che indica la relazione tra gli individui per ogni classe di distanza. Esso varia tra -1 e +1, ma non di rado può anche superare tali valori. Valori positivi esprimono autocorrelazione spaziale positiva, sono indice di aggregazione di eventi con valori simili della variabile quantitativa analizzata, mentre valori negativi esprimono autocorrelazione spaziale negativa, indicano cioè la relazione tra valori tendenzialmente dissimili nella classe di distanza considerata.

- Autocorrelazione spaziale locale

Per misurare il grado di autocorrelazione spaziale a livello locale vengono utilizzate statistiche apposite che consentono di quantificare il contributo di ogni evento rispetto al comportamento globale della distribuzione. L'analisi locale scompone le statistiche globali nei loro elementi locali, permettendo di evidenziare più le eccezioni che l'andamento generale e producendo statistiche mappabili per le coordinate di ogni singolo evento. Questo tipo di statistica permette di evidenziare la presenza di cluster.

Per determinare l'autocorrelazione spaziale locale è stata utilizzata la statistica  $G$  di Getis e Ord, che fornisce un indice di associazione spaziale di un set di osservazioni che ricadono entro una distanza critica scelta, a partire da ciascun evento all'interno dell'area di studio.

$$G_i^* = \frac{\sum_j c_{ij}(d)X_j}{\sum_j X_j} \quad i = j \qquad G_i = \frac{\sum_j c_{ij}(d)X_j}{\sum_j X_j} \quad i \neq j$$

Dove:

- $C_{ij}$  è il fattore di ponderazione per la coppia di piante  $i$  e  $j$ , 1 se le piante  $i$  e  $j$  ricadono nella stessa classe di distanza, 0 negli altri casi
- $X_j$  valore della variabile in oggetto di studio nella localizzazione  $j$

La differenza tra la prima e la seconda equazione sta nell'inclusione o meno nell'algoritmo del punto centrale  $i$  attorno alla quale è fatta la misura. Non esiste un metodo per definire quale delle due formule sia più opportuno usare ma la differenza nei risultati tra le due espressioni è estremamente ridotta.

Chiamando  $X$  la variabile presa in considerazione possiamo affermare che se tendono ad aggregarsi valori elevati di  $X$  attorno ad  $i$ , il valore di  $G_i^*$  o  $G_i$  risulterà elevato, se i valori sono bassi, anche il valore di  $G_i^*$  o  $G_i$  sarà basso.

Per determinare la presenza o meno di significatività dei risultati sono stati utilizzati come limiti di +1.96 e -1.96, associati ad una significatività pari al 95%. I risultati vengono considerati attendibili con un numero di osservazioni superiori a 30.

Valori positivi e significativi indicano la presenza di aggregazione dei valori più alti della variabile  $X$ . Viceversa, valori negativi e significativi indicano la presenza di aggregazione di valori bassi della variabile  $X$ .

È stato scelto di utilizzare per tutte le analisi la statistica  $G_i^*$ .

Correzione dei margini:

I cerchi o gli anelli utilizzati nell'analisi spaziale, se calcolati su individui in prossimità dei bordi esterni dell'area di studio, cadranno parzialmente al di fuori della regione di studio e possono alterare i risultati. In questi casi si parla di effetto margine. Per ovviare a questo problema si possono usare diversi correttivi. Un metodo utilizzato consiste nel campionare anche una zona cuscinetto aggiuntiva che circonda l'area di studio, oppure creando la zona cuscinetto all'interno del plot stesso, riducendo però l'area analizzata. Solo i punti che si trovano all'interno dell'area di studio principale verranno utilizzati come centri nel calcolo delle statistiche della point pattern analysis (Wiegand & Moloney 2004).

I margini acquistano peso al diminuire delle dimensioni e in relazione al rapporto tra superficie e perimetro dell'area di studio. Nel nostro caso si è scelto di non utilizzare nessuna correzione dei margini essendo l'area di superficie abbastanza elevata e di forma quadrata. Le dimensioni dei margini, infatti, con questa figura geometrica sono ridotti quasi al minimo.

## 4. Risultati

### 4.1 Caratteristiche strutturali

#### 4.1.1 Caratteristiche strutturali popolazione 2020

Nell'area sono state censite, all'anno 2020, 160 piante vive contro le 137 del precedente rilevamento. Esse sono rappresentate da 116 larici (*Larix decidua*), 27 cembri (*Pinus cembra*), 14 mughi (*Pinus mugo*) e 3 abeti rossi (*Picea abies*).

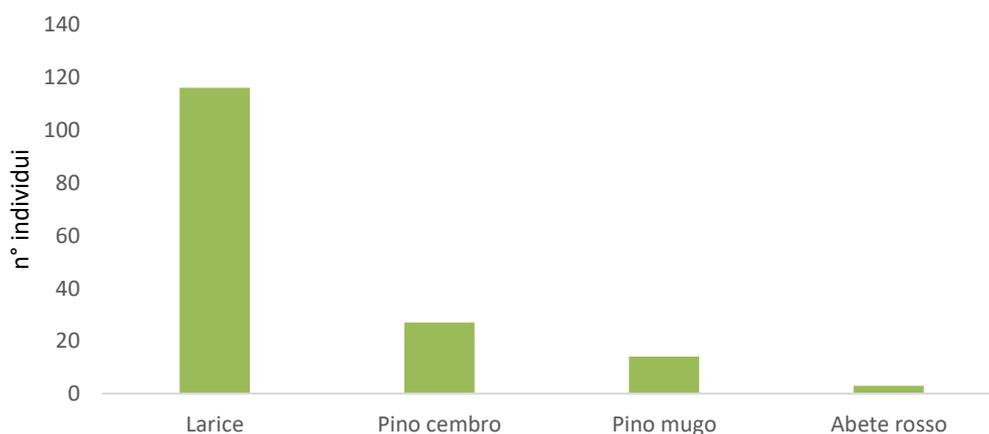


Fig. 16 – Numero di individui suddiviso per specie all'interno dell'area

La rinnovazione osservata, ovvero i nuovi individui entrati nel censimento sono rappresentati da 22 individui larici, 9 cembri e 3 abeti.

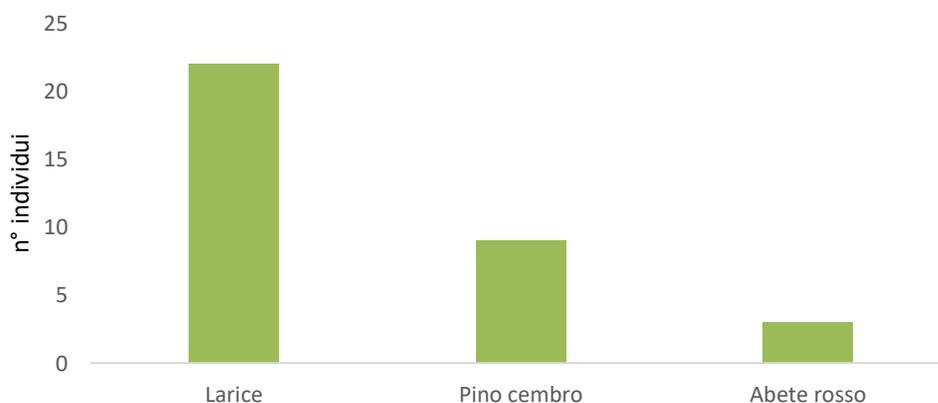
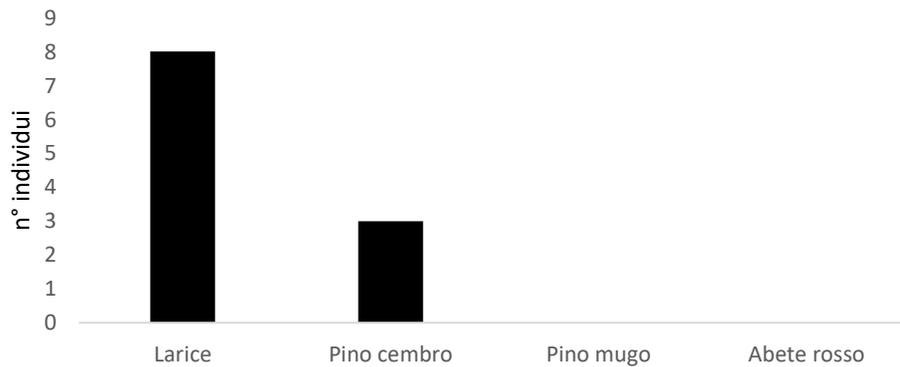


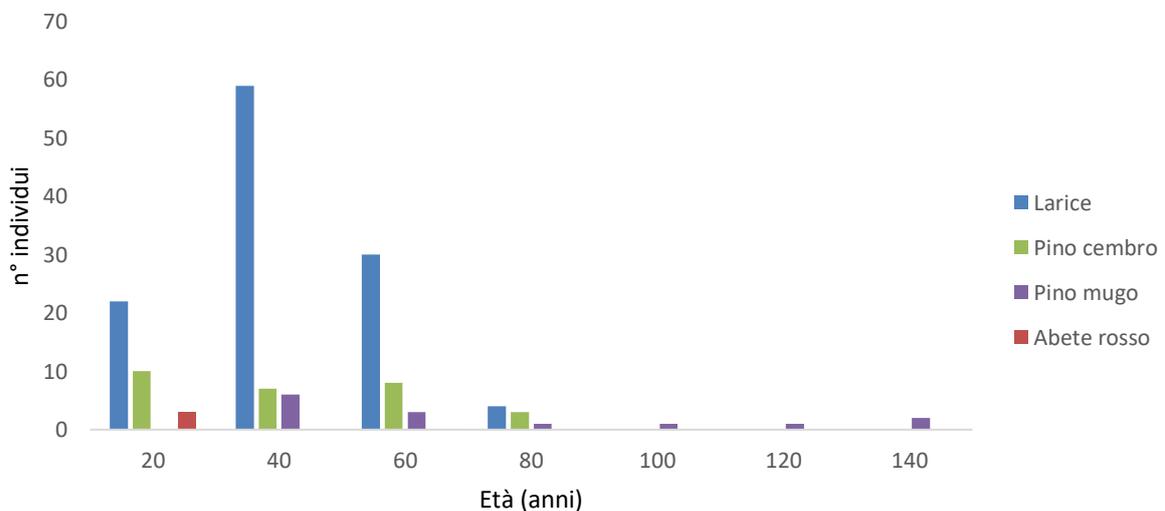
Fig. 17 – Numero di nuovi individui censiti nel 2020 suddiviso per specie

Si è registrata la morte di 11 piante, 8 di larice e 3 di pino cembro.



**Fig. 18 – Numero di individui morti nell'intervallo intercorso tra i due censimenti (2004-2020), suddiviso per specie.**

## Età

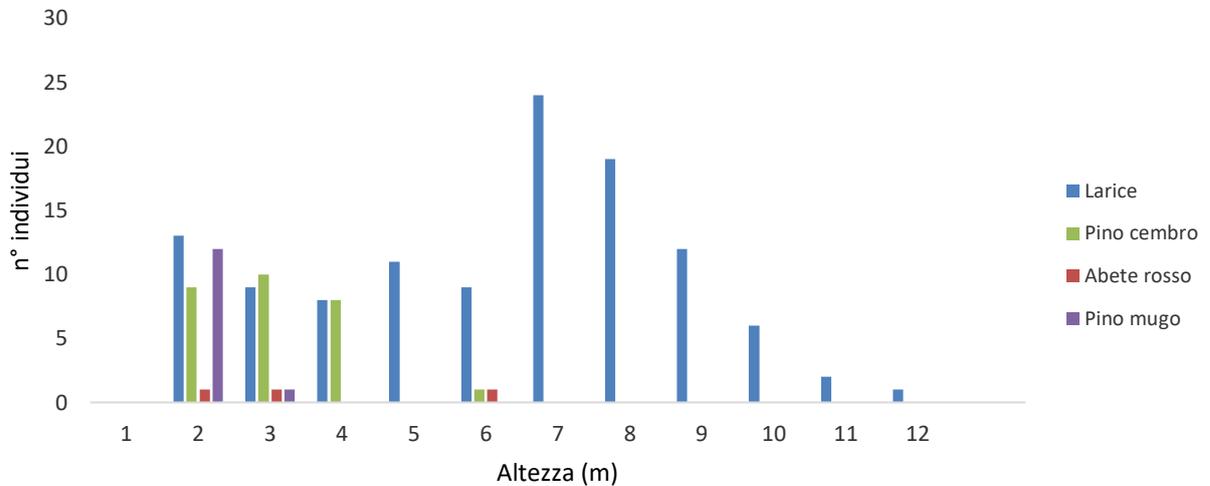


**Fig. 19 – Distribuzione delle età per specie in classi di 20 anni**

Osservando la distribuzione delle età distribuite in classi di 20 anni possiamo notare che per il larice c'è una prevalenza per le classi intermedie (soprattutto per quanto riguarda la classe tra i 21 e 40 anni), il cembro è distribuito più uniformemente mentre l'abete rosso occupa soltanto la prima classe (1-20 anni). Il pino mugo è la specie che raggiunge l'età più elevata, 132 anni. Il mugo è stato riportato solo nella descrizione dell'area e non nelle analisi perché, in quanto arbusto, ha delle caratteristiche diverse dalle altre specie: essendo policormico e con un

habitus arbustivo, non è possibile definire con precisione e in modo univoco il diametro e l'altezza.

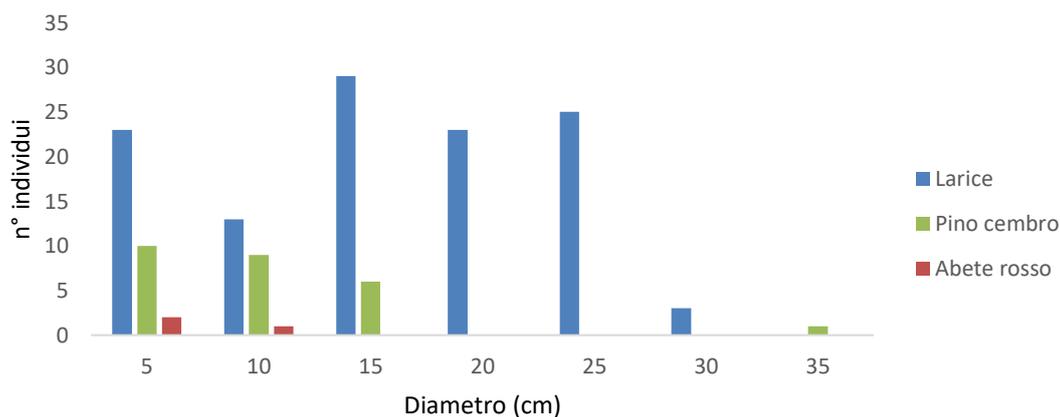
### Altezza



**Fig. 20 – Distribuzione delle altezze per specie in classi di 1m**

La distribuzione delle altezze indica che la specie a raggiungere le altezze maggiori è il larice arrivando quasi a 12 m e la maggiore frequenza la osserviamo sempre nelle classi centrali. Il pino cembro non supera i 6 m e si distribuisce principalmente nelle classi di 2, 3, 4 metri. Il pino mugo, essendo una specie arbustiva, occupa quasi solamente la classe di 2 metri. L'abete rosso, pur avendo solo piante di giovane età, arriva anche a quasi 6 metri di altezza con un individuo.

## Diametro



**Fig. 21 – Distribuzione dei diametri per specie in classi di 5 cm**

Nella distribuzione dei diametri, invece, è il pino cembro a raggiungere il valore più elevato, anche se con un solo individuo, mentre gli altri raggiungono al massimo 15 cm. Il larice evidenzia una distribuzione abbastanza uniforme nelle varie classi fino a 25 cm e conta pochi individui nella classe maggiore (30 cm).

### **4.1.2 Confronto caratteristiche strutturali 2004-2020**

Di seguito sono stati riportati i dati relativi alle caratteristiche principali del popolamento nel 2004 e nel 2020.

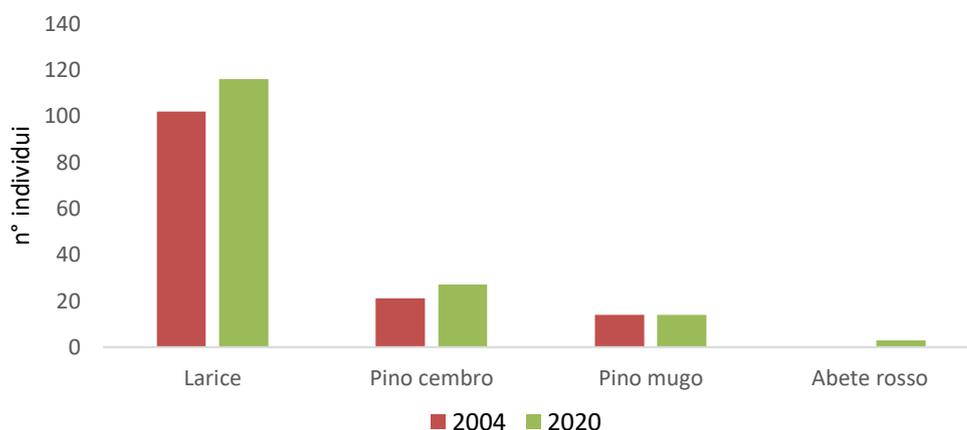
	<b>2004</b>	<b>2020</b>
<b>Altezza media</b>	3.40 m	5.20 m
<b>Diametro medio</b>	5.5 cm	12 cm
<b>Età media</b>	23 anni	33 anni
<b>Altezza massima</b>	8 m	11.20 m
<b>Diametro massimo</b>	20 cm	33 cm
<b>Età massima</b>	64 anni	80 anni

**Tabella 4 – Caratteristiche strutturali del popolamento rilevate durante le analisi del 2004 e del 2020**

È stata poi riportata la distribuzione del numero di piante per specie del precedente e nuovo rilevamento con i relativi incrementi per ciascuna specie.

	2004 (n piante)	2004 (%)	2020 (n piante)	2020 (%)	Incremento
<b>Larice</b>	102	74%	116	73%	14%
<b>Pino cembro</b>	21	15%	27	17%	29%
<b>Pino mugo</b>	14	10%	14	9%	0%
<b>Abete rosso</b>	0	0%	3	2%	-
<b>Totale</b>	137		160		17%

**Tabella 5 – Confronto della composizione specifica tra i due rilevamenti**



**Fig. 22 - Confronto della composizione specifica all'interno dell'area tra i due rilevamenti**

Anche se in numero assoluto la rinnovazione è principalmente di larice, osserviamo che l'incremento di individui di pino cembro è il doppio rispetto al larice (29% contro 14%) e che complessivamente il popolamento si sta espandendo, con un aumento del 17%.

In ogni caso, eseguendo il test del  $\chi^2$  non risultano esserci variazioni significative nella mescolanza di specie tra i due censimenti.

## Rapporti tra le variabili

	<b>Diametro/altezza</b>	<b>Diametro/età</b>	<b>Altezza/età</b>
<b>Tot 2004</b>	0.82	0.35	0.34
<b>Tot 2020</b>	0.85	0.48	0.49
<b>Ld 2004</b>	0.82	0.47	0.59
<b>Ld 2020</b>	0.87	0.55	0.60
<b>Pc 2004</b>	0.89	0.41	0.38
<b>Pc 2020</b>	0.71	0.37	0.65

**Tabella 6 –Coefficienti di correlazione tra le diverse variabili analizzate per l'anno 2004 e 2020. Tutti i valori sono significativi almeno per  $p < 0.05$ .**

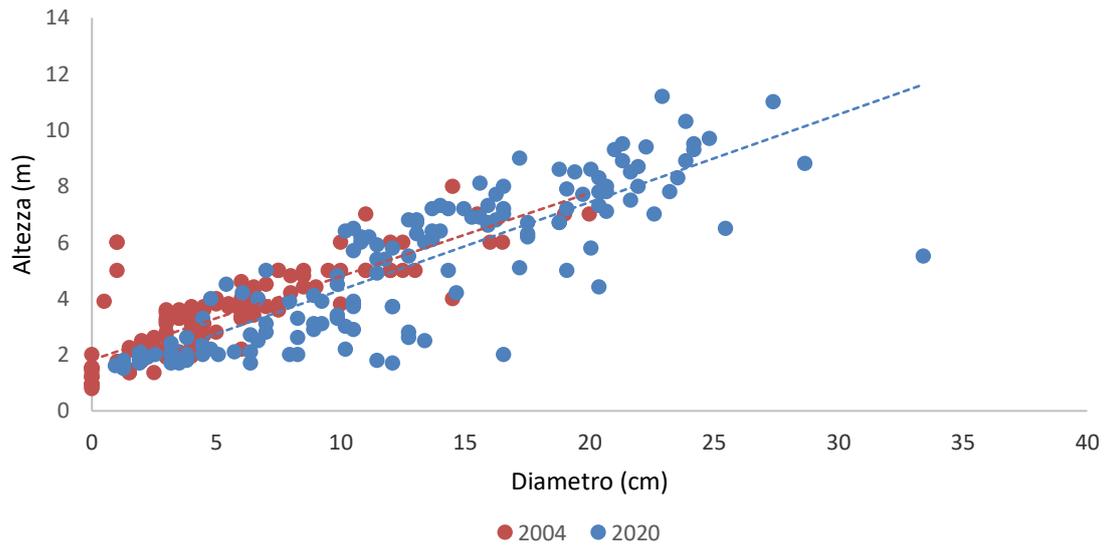
È stato eseguito il calcolo della correlazione tra il diametro con l'altezza, il diametro con l'età e l'altezza con l'età con i dati del 2004 e del 2020 di tutto il popolamento e successivamente per le due specie principali: larice e cembro.

Tutte le correlazioni risultano essere significative, anche se alcune in modo più marcato. Quella tra altezza e diametro è, infatti, molto vicina ad 1, indicando una forte correlazione tra i due parametri.

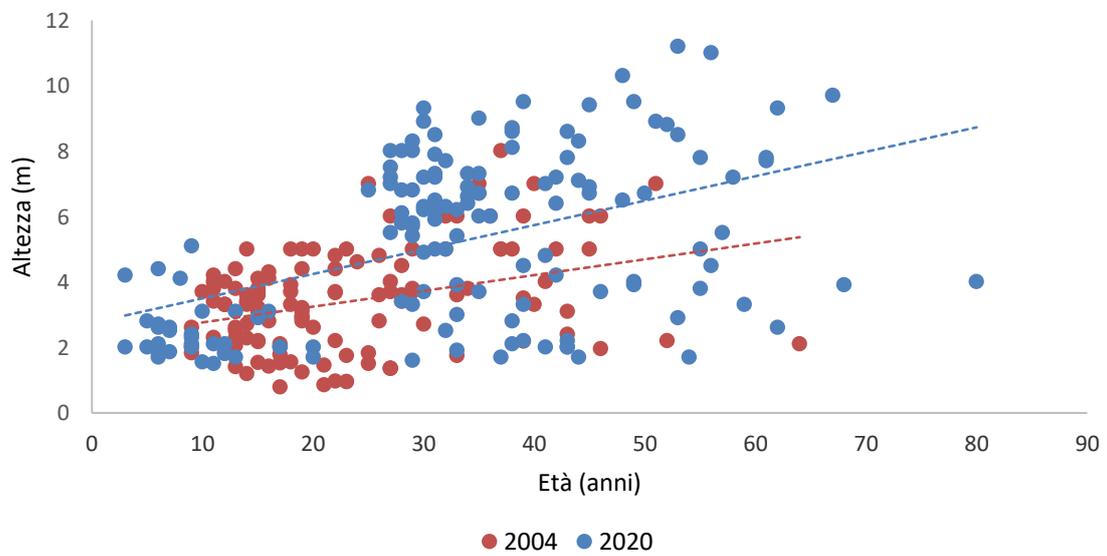
Osserviamo per tutte le coppie di variabili analizzate, un aumento del valore di correlazione del popolamento totale e del larice (che costituisce la maggior parte del popolamento).

Per il cembro, invece, c'è stata una riduzione della correlazione tra diametro e altezza e una riduzione di minore entità anche per diametro ed età. Il rapporto tra altezza ed età ha subito un importante incremento.

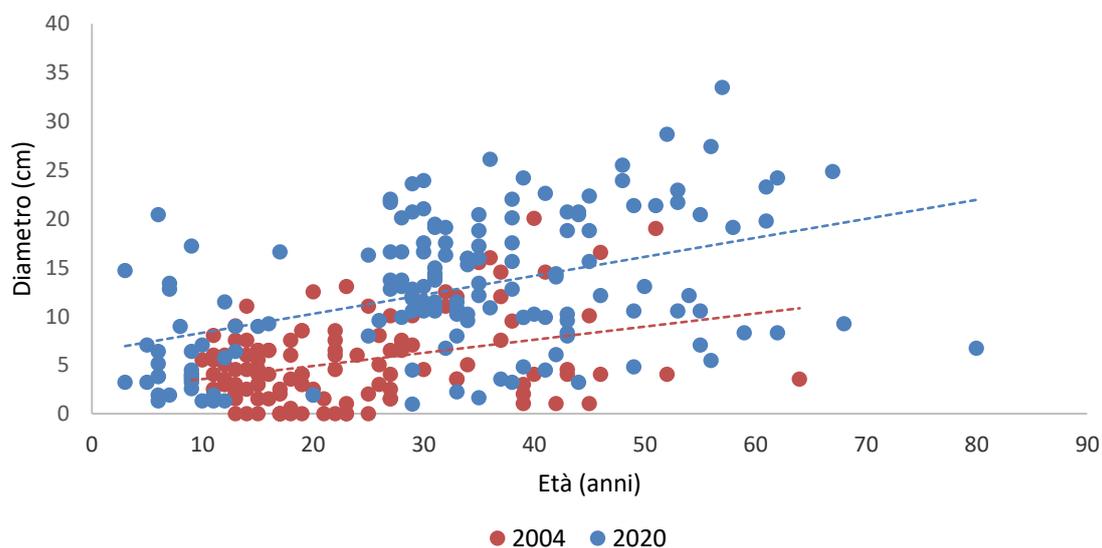
Sono stati riportati successivamente in grafico il rapporto tra le tre variabili, sia per il 2004 che per il 2020.



**Fig.23 – Rapporto tra diametro ed altezza per il 2004 e il 2020. Le linee tratteggiate rappresentano le regressioni calcolate per le due variabili.**



**Fig. 24 – Rapporto tra età ed altezza per il 2004 e il 2020. Le linee tratteggiate rappresentano le regressioni calcolate per le due variabili.**

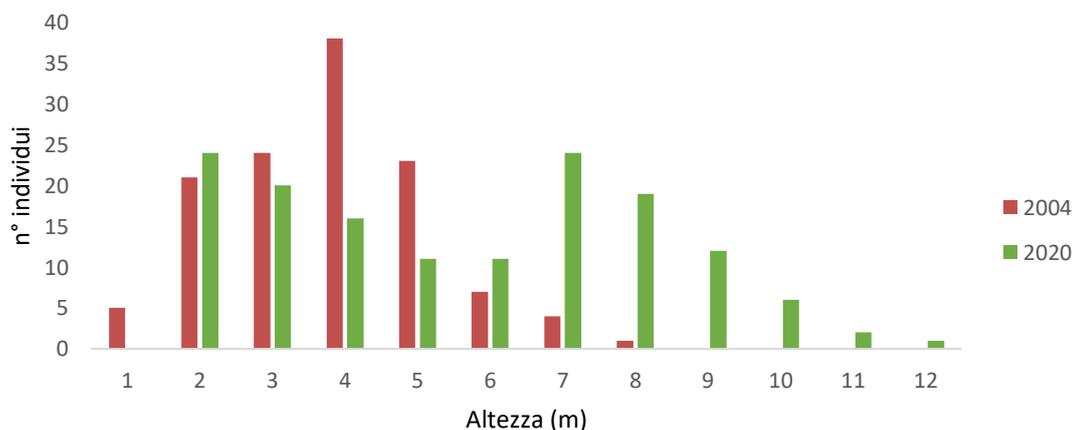


**Fig. 25 – Rapporto tra età e diametro per il 2004 e il 2020. Le linee tratteggiate rappresentano le regressioni calcolate per le due variabili.**

Da questi grafici possiamo osservare che, coerentemente con quanto calcolato con i coefficienti di correlazione, le relazioni tra età e altezza o diametro sono più stringenti indicando una maggiore correlazione tra i due parametri, mentre il rapporto tra l'altezza e il diametro è rimasto stabile.

Altro elemento che possiamo osservare è che per gli ultimi due grafici la linea del 2020 si trova sopra quella del 2004 indicando che altezza e diametro sono oggi maggiori a parità di età rispetto a quelli registrati nel precedente rilevamento. Il primo grafico, invece, non presenta sostanziali variazioni tra il rapporto di altezza e diametro.

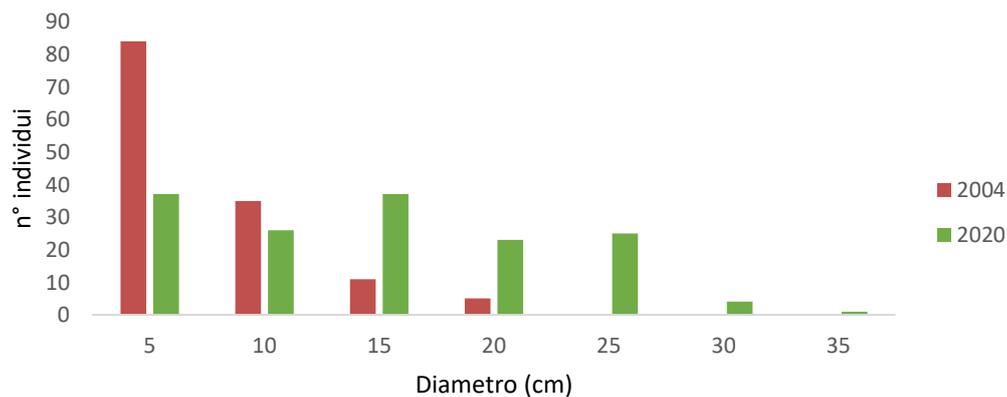
### Altezza



**Fig. 26 – Distribuzione delle altezze per il 2004 e il 2020**

Costruendo il grafico della distribuzione delle altezze per classi di 1 metro, vediamo come in questi 16 anni le piante siano cresciute molto rapidamente. La distribuzione si è infatti spostata verso le classi maggiori e se prima la pianta più alta era di 8 metri ora si raggiungono quasi 12 m. Anche la distribuzione nelle varie classi è cambiata, in passato era maggiore per le classi medie, ora è più uniforme.

### Diametro



**Fig. 27 – Distribuzione dei diametri per il 2004 e il 2020**

Per quanto riguarda la distribuzione dei diametri possiamo dire la stessa cosa. La distribuzione si sta sempre più spostando verso le classi di diametro maggiori raggiungendo diametri molto più elevati, 35 cm contro 20 cm del 2004. Anche qui la distribuzione è cambiata, prima la maggior parte delle piante si concentrava nella classe di 5 centimetri, ora sono distribuiti in modo abbastanza uniforme fino a 25 cm.

### Incrementi

Per determinare quantitativamente l'accrescimento medio delle piante sono stati calcolati gli incrementi percentuali in altezza e diametro per tutto il popolamento e per le due specie principali.

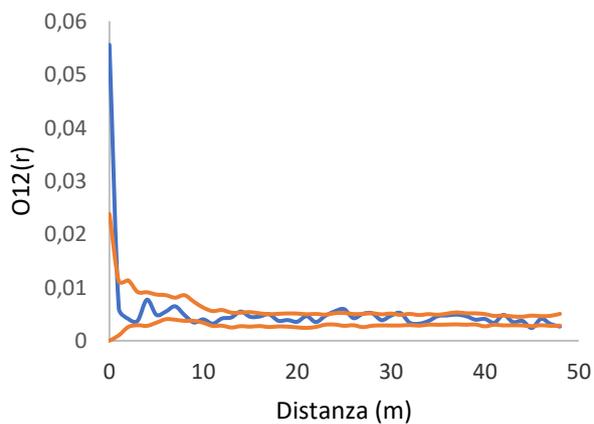
	Altezza	Diametro
<b>Totale</b>	86%	281%
<b>Larice</b>	90%	291%
<b>Pino cembro</b>	69%	221%

**Tabella 7 – Incrementi percentuali in altezza e diametro per il periodo trascorso tra il 2004 e il 2020**

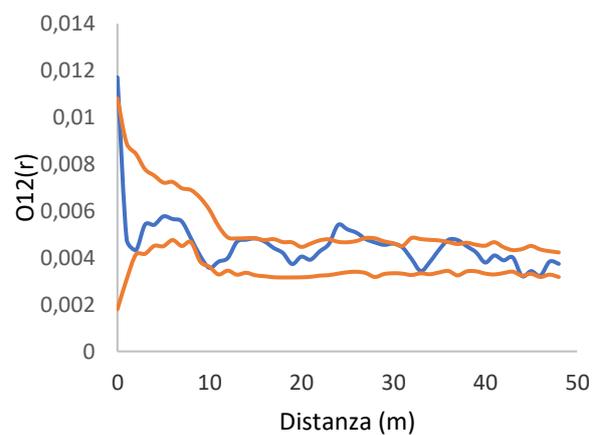
Il risultato ottenuto ci indica che dall'ultimo rilevamento ci sono stati dei notevoli accrescimenti in altezza ma soprattutto nel diametro.

#### 4.2 Point pattern analysis

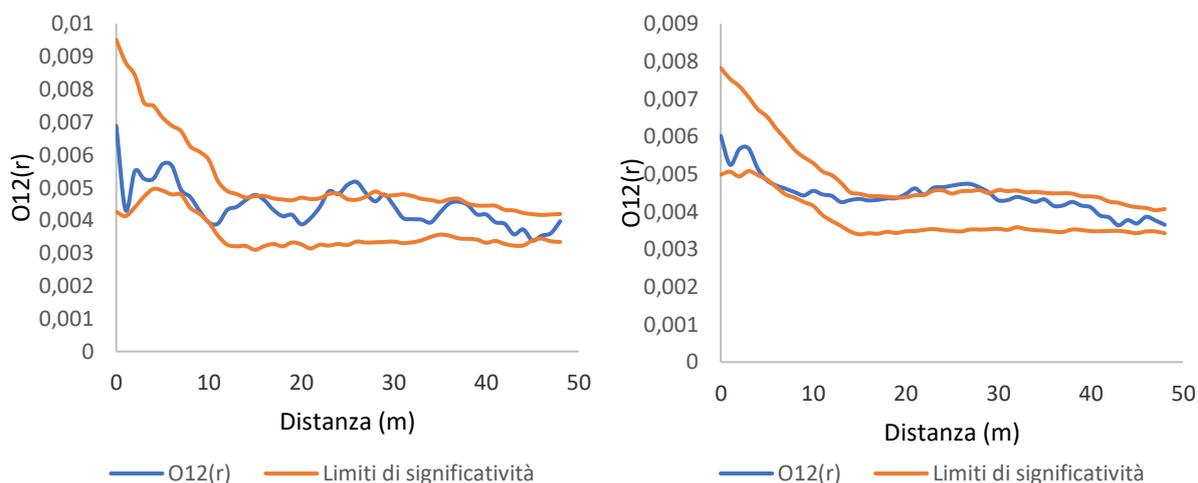
Nell'analisi della distribuzione spaziale attraverso l'analisi O-ring uno dei primi elementi da determinare è stata l'ampiezza dell'anello. Sono stati eseguiti quindi vari tentativi con diverse ampiezze: 1, 3, 5 e 10 metri.



— O12(r) — Limiti di significatività



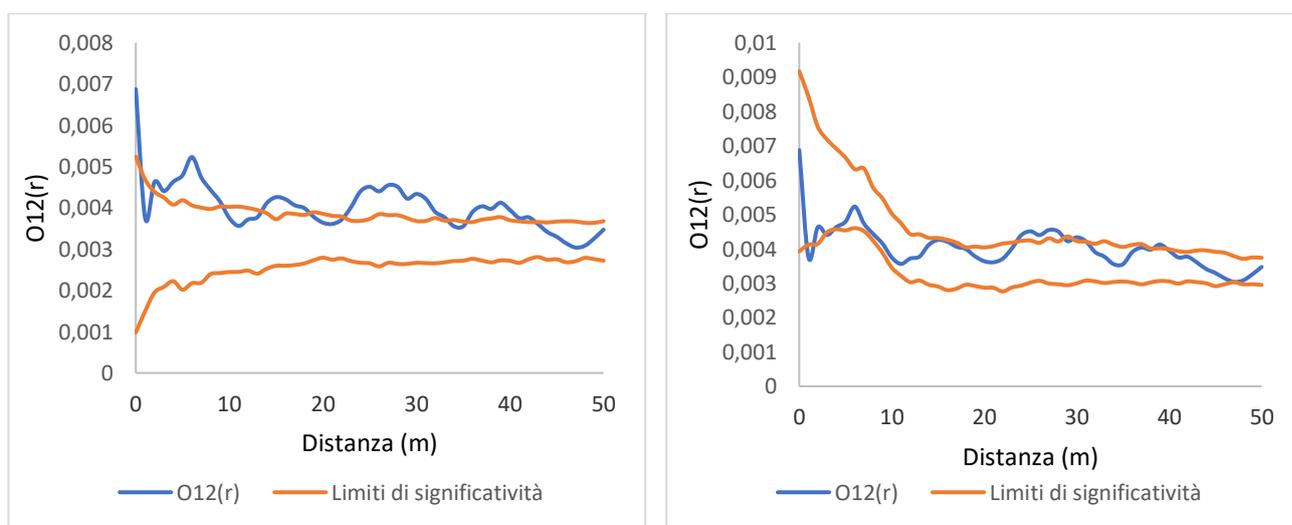
— O12(r) — Limiti di significatività



**Fig. 28 - Statistica bivariata O-ring con raggio anello a) 1 m, b) 3 m, c) 5 m, d) 10 m**

È stato scelto di utilizzare in tutte le analisi un'ampiezza dell'anello di 5 metri. Le ampiezze minori perché troppo ridotte, comprendono un numero limitato di individui portando a risultati erratici mentre con ampiezza 10 metri abbiamo una curva poco rappresentativa perché l'area di analisi risulta essere di dimensioni eccessive.

Successivamente si sono eseguite delle simulazioni con e senza la distribuzione di Poisson per valutare l'influenza di questa funzione sul risultato.



**Fig. 29 - Statistica bivariata O-ring a) distribuzione completamente casuale nell'area, b) distribuzione di Poisson**

La prima analisi è stata condotta con un'ampiezza dell'anello di 5 metri e facendo una simulazione casuale della distribuzione della rinnovazione, mantenendo fisse le piante adulte, e senza utilizzare la distribuzione di Poisson. Osserviamo dal grafico come emerga una netta aggregazione delle piante giovani verso quelle adulte, soprattutto intorno a 5-7 metri.

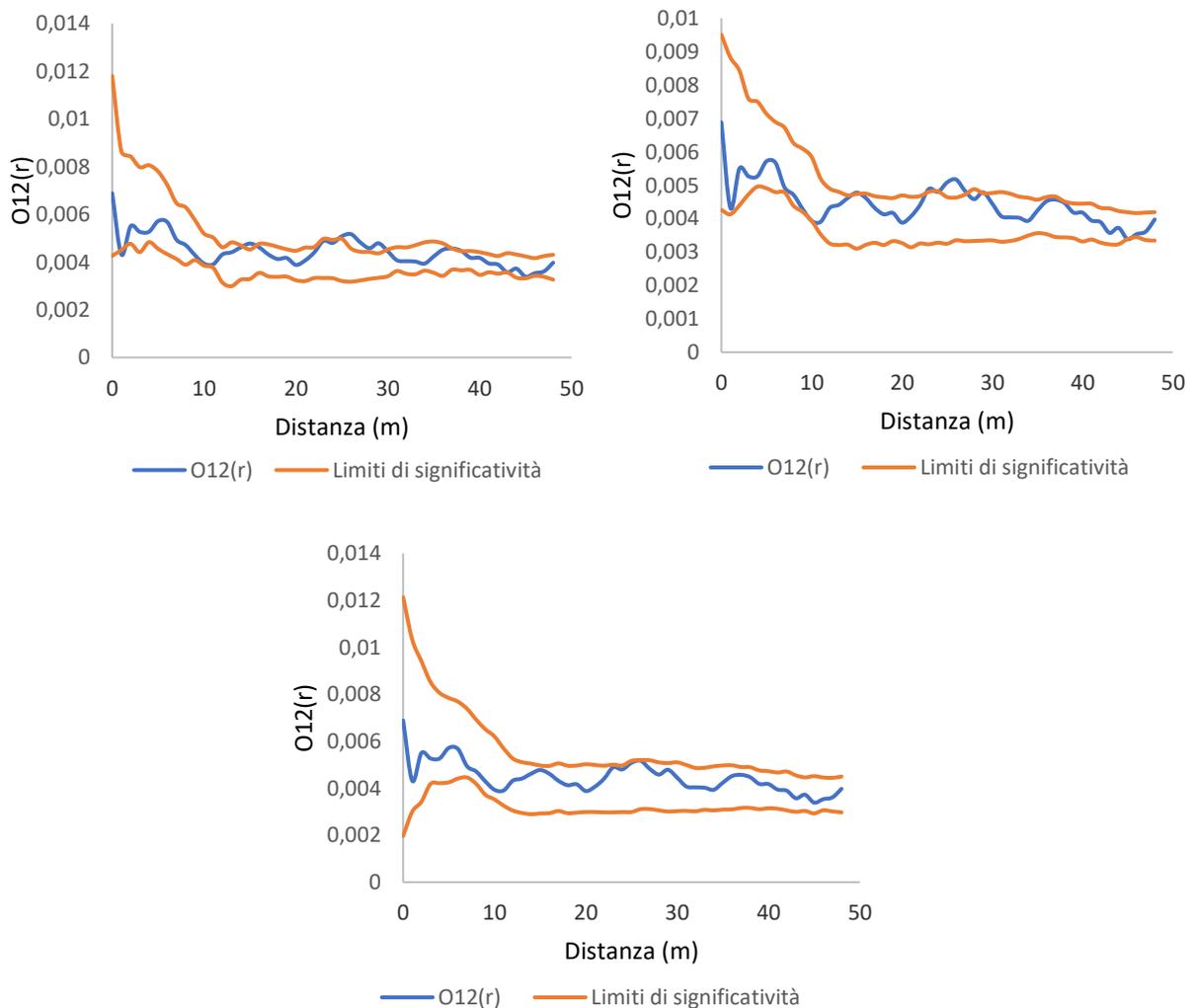
Questo risultato potrebbe sembrare corretto perché spesso le piante, soprattutto a quote elevate, tendono a formare collettivi, però non tiene conto della morfologia del terreno perché distribuisce le distribuzioni randomizzate su tutta l'area indistintamente. L'area però è caratterizzata da diverse rocce affioranti e fenditure nel terreno, che non consentono l'insediamento delle piante.

Eseguendo le simulazioni utilizzando la distribuzione di Poisson si tiene in parte conto di queste caratteristiche nella distribuzione legate alla morfologia. Infatti in questo modo la distribuzione delle piante nelle simulazioni casuali avviene secondo uno schema che le posiziona con una maggiore probabilità in alcune zone e minore in altre sulla base della distribuzione osservata. È così possibile ottenere dei risultati più corretti e interpretabili dal punto di vista ecologico. Di contro, però, bisogna porre attenzione a non escludere dalla simulazione aree in cui al momento non è presente rinnovazione solo per motivi di limitata diffusione delle piante (ad esempio per le condizioni climatiche limitanti in alta quota) e non per motivi morfologici, quindi zone dove potenzialmente potrebbe esserci rinnovazione ma al momento non si è ancora insediata.

Da questo secondo grafico si osserva come cambino in modo considerevole i limiti di significatività. Se nel primo la curva dell'indice si trovava spesso sopra i limiti di confidenza indicando aggregazione, in questo caso è quasi sempre all'interno, indicando una casualità nella distribuzione della rinnovazione rispetto alle piante adulte.

Essendo il terreno dell'area piuttosto eterogeneo e caratterizzato da affioramenti rocciosi e fessurazioni, è stato scelto nelle successive analisi di utilizzare sempre la distribuzione di Poisson.

Infine per determinare il miglior numero di simulazioni per la definizione dei limiti di confidenza sono state fatte prove con 19, 99 e 999 ripetizioni.



**Fig. 30 - Statistica bivariata O-ring con a) 19, b) 99, c) 999 ripetizioni**

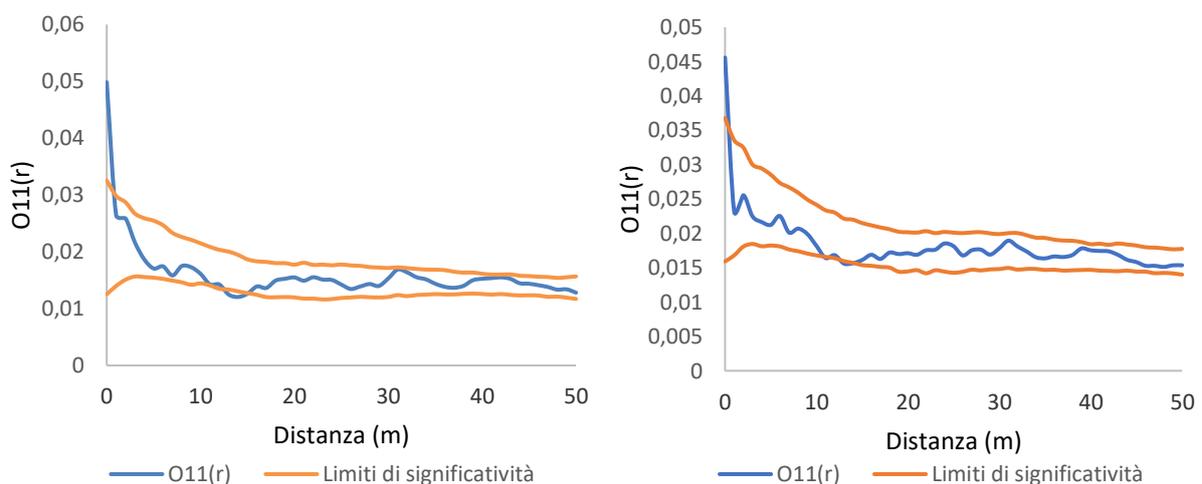
Aumentando il numero di simulazioni notiamo come le curve dei limiti di confidenza si allarghino mantenendo sempre più al loro interno la curva dell'indice. Osservando soltanto i primi due grafici sembrerebbe che a certe distanze ci siano valori significativi di aggregazione o repulsione, cosa che non succede nel terzo, dove la curva si trova completamente all'interno dei limiti di confidenza. Con un numero più alto di simulazioni si hanno dei limiti di significatività più solidi che permettono un'analisi più affidabile. È stato scelto pertanto di utilizzare per tutte le analisi 999 ripetizioni.

#### 4.2.1 Confronto 2004-2020

Le seguenti analisi sono state sviluppate in modo analogo sia per i dati raccolti nel 2004 sia per quelli attuali allo scopo di confrontare e apprezzare le modificazioni del popolamento a distanza di 16 anni.

È stata eseguita un'analisi bivariata per altezza, diametro, età e specie, creando due pattern. Nel caso di dati quantitativi, come altezza, diametro ed età, utilizzando la mediana come divisore, mentre nel caso delle specie sono state poste a confronto soltanto le due specie principali, larice e cembro.

#### Point pattern analysis totale



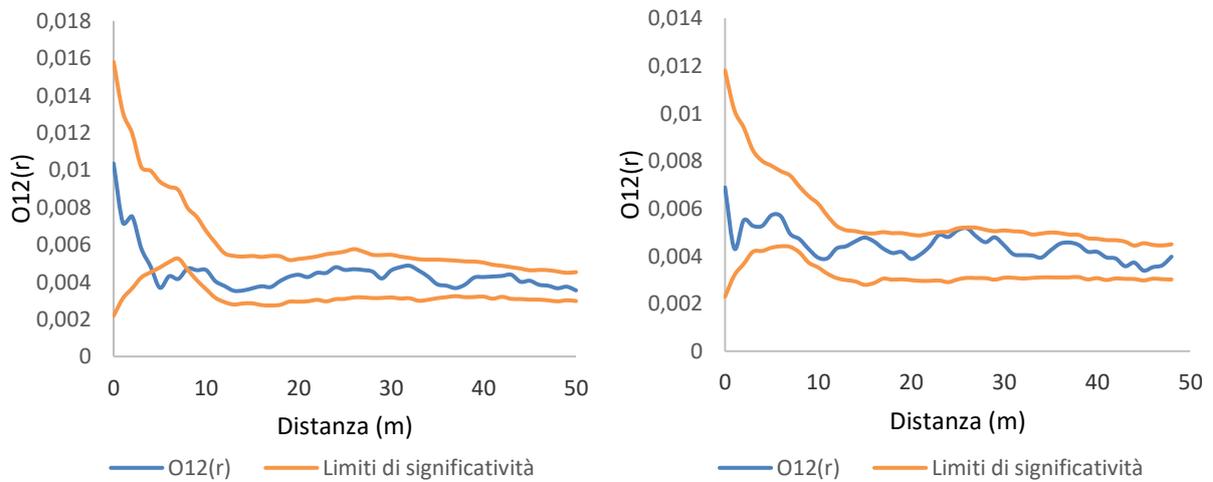
**Fig. 31 - Statistica univariata O-ring dell'intero popolamento per il 2004 a) e per il 2020 b)**

Per prima cosa è stata eseguita un'analisi univariata dell'intero popolamento per valutare la distribuzione complessiva delle piante nell'area. Osserviamo sia per il 2004 che per il 2020 aggregazione fino al primo metro ma già dal secondo risulta essere casuale in quanto rientra nei limiti di confidenza e perciò non c'è significatività.

#### Rinnovazione

Per il confronto della rinnovazione è stata eseguita un'analisi bivariata separando le piante adulte dalla rinnovazione. Sono state considerate come rinnovazione per il 2020 le piante censite nel presente rilevamento, mentre come rinnovazione del popolamento del 2004 tutte le piante fino a 15 anni di età compresi, per poter essere confrontata con quella attuale.

L'analisi è stata eseguita mantenendo fisso il pattern comprendente le piante adulte e lasciando libero quello della rinnovazione.



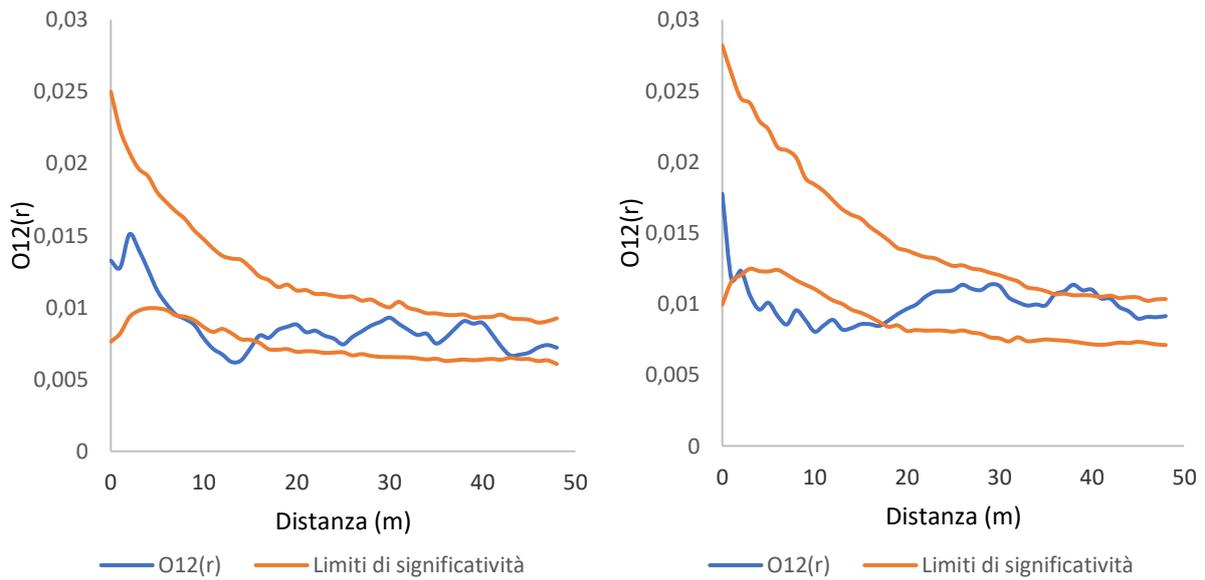
**Fig. 32 - Statistica bivariata O-ring analisi rinnovazione: a) 2004, b) 2020**

Possiamo vedere che nel passato popolamento la distribuzione degli individui risultasse essere sempre casuale tranne tra 5 e 7 metri dove si osservava repulsione. In quello attuale riscontriamo sempre una distribuzione casuale.

La distribuzione della rinnovazione non sembra essere quindi correlata in modo significativo con la posizione delle piante adulte.

#### Point pattern analysis altezza

Nell'analisi bivariata dell'altezza utilizzando la mediana come divisore sono stati creati i due pattern. Nelle ripetizioni sono state lasciati liberi entrambi i pattern. La mediana è stata identificata come 3.25 m per il 2004 e 4.65 m per il 2020.

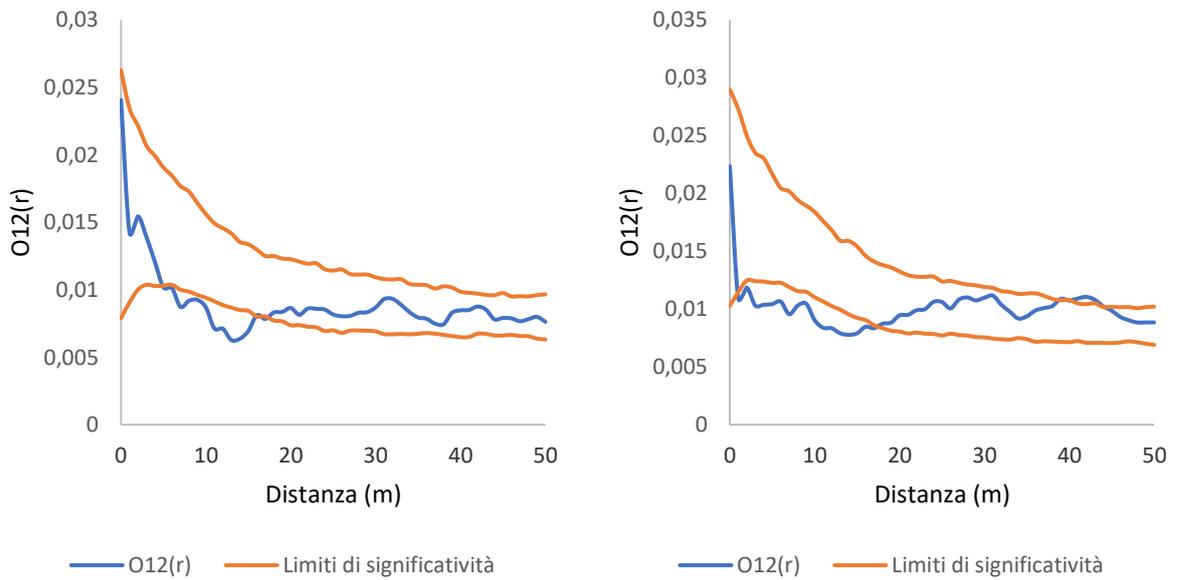


**Fig. 33 - Statistica bivariata O-ring analisi dell'altezza: a) 2004, b) 2020**

Nel primo rilevamento risulta esserci una repulsione tra gli individui più piccoli verso quelli più alti tra gli 8 e 16 metri. Nell'analisi sul popolamento attuale la repulsione si accentua e la osserviamo già oltre il metro e fino quasi i 20 m.

#### Point pattern analysis diametro

Nell'analisi dei diametri è stato utilizzato lo stesso procedimento, sono stati creati due pattern, utilizzando la mediana (4 cm per il 2004 e 12 cm per il 2020), per l'analisi bivariata e lasciando liberi entrambi i pattern nelle ripetizioni.

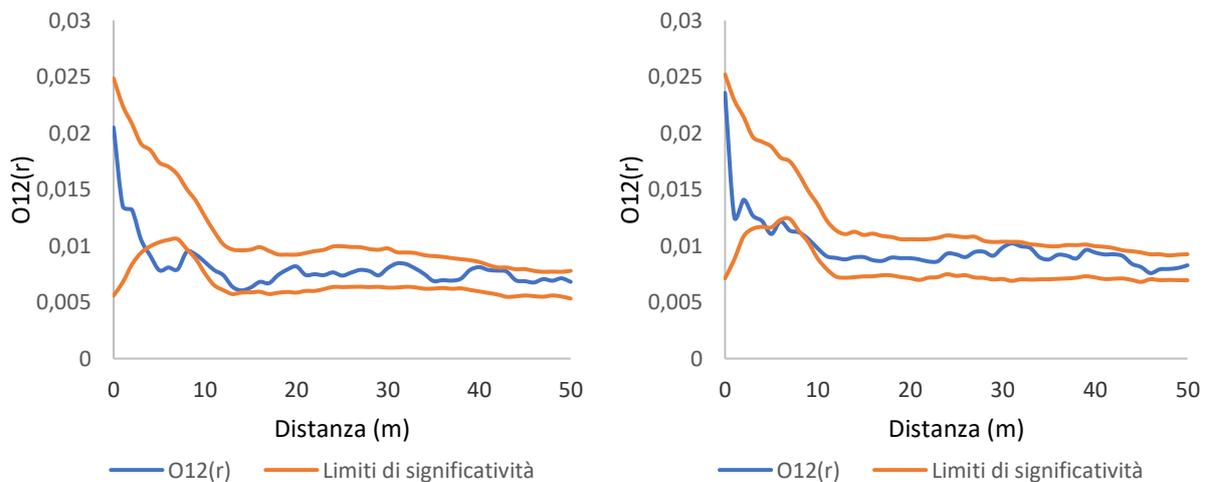


**Fig. 34 - Statistica bivariata O-ring analisi del diametro: a) 2004, b) 2020**

Il risultato ottenuto è simile al precedente, riguardante le altezze. Anche qui abbiamo repulsione tra i 7 e i 16 metri nel primo grafico che si accentua nel secondo, dove la riscontriamo già dopo il primo metro.

#### Point pattern analysis età

Anche nell'analizzare l'età sono stati utilizzati due pattern con divisore la mediana (21 anni per il 2004 e 36 anni per il 2020).

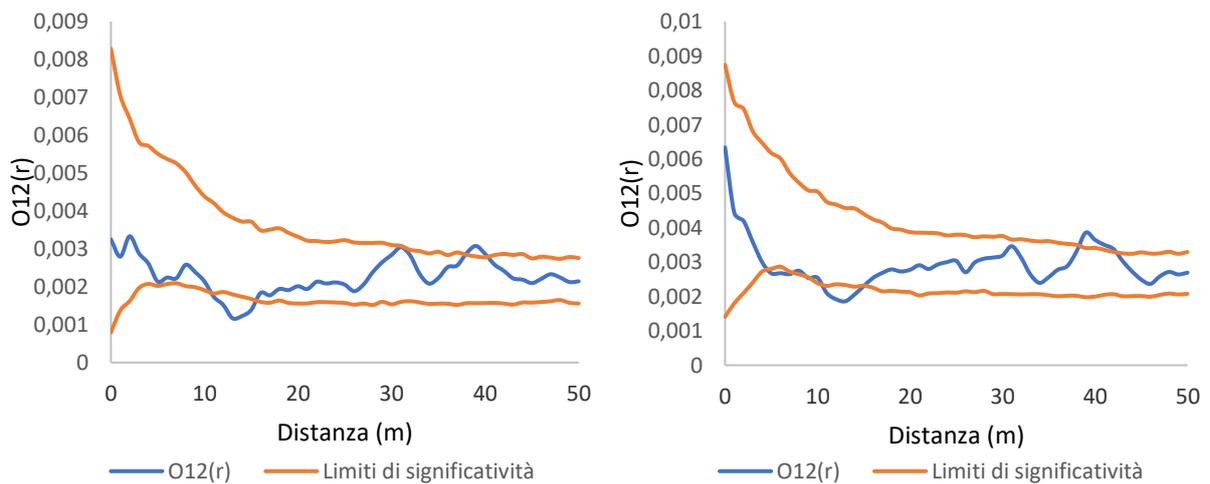


**Fig. 35 - Statistica bivariata O-ring analisi dell'età: a) 2004, b) 2020**

In questo caso il risultato ottenuto è diverso rispetto ai due precedenti, in quanto, nel primo rilevamento si osserva repulsione tra 3 e 8 metri, mentre nel secondo si limita solo a 5-7 metri e in modo molto meno marcato, indicando una distribuzione pressoché casuale.

#### Point pattern analysis larice e cembro

In questo caso i due pattern contengono le due specie e nelle ripetizioni tutte le piante sono state lasciate libere a spostamenti casuali.

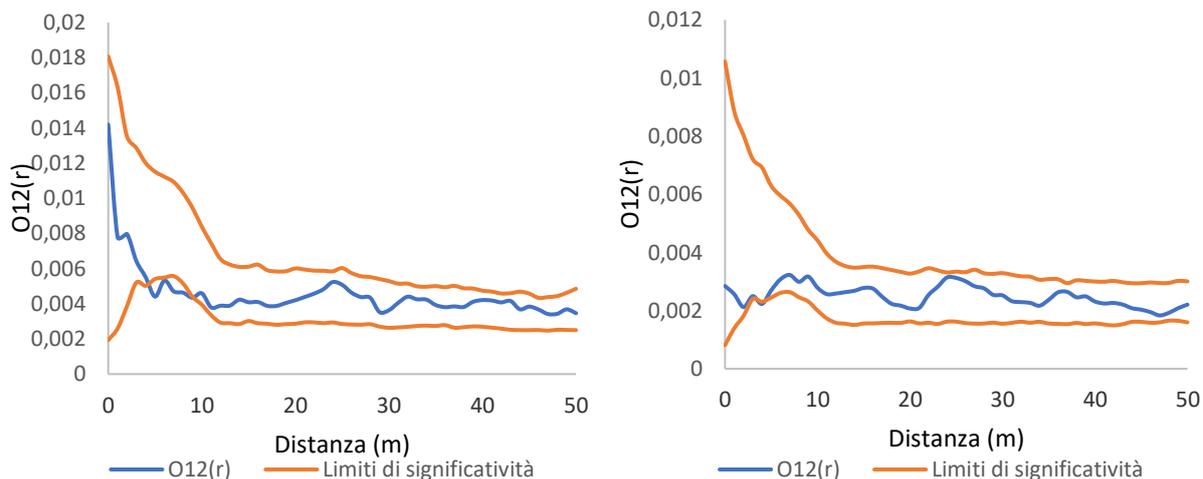


**Fig. 36 - Statistica bivariata O-ring analisi rapporto larice e cembro: a) 2004, b) 2020**

L'analisi bivariata tra larice e cembro non indica sostanziali variazioni nel rapporto tra le due specie. Risulta esserci in entrambi i casi repulsione solo tra gli 11 e 15 metri e nel complesso nessuna interferenza significativa.

#### Point pattern analysis larice

Confronto tra rinnovazione e piante adulte di larice, la specie principale dell'area. L'analisi è stata eseguita allo stesso modo di quella relativa alla rinnovazione totale.



**Fig. 37 - Statistica bivariata O-ring analisi rapporto larice con la sua rinnovazione: a) 2004, b) 2020**

Riguardo il larice e la sua rinnovazione osserviamo che complessivamente c'è casualità nella distribuzione sia nel 2004 sia nel 2020, nell'analisi del popolamento del 2004 risulta soltanto una lieve repulsione tra 5 e 9 metri.

Da questi grafici notiamo che la tendenza all'interno del popolamento è di casualità nella distribuzione della rinnovazione e delle piante con età inferiore alla mediana nei confronti delle piante adulte e di repulsione tra gli individui con altezza e diametro minore verso quelli di dimensioni maggiori.

#### **4.3 Surface pattern analysis**

Una volta definita la struttura del popolamento e la distribuzione spaziale degli individui, il passo successivo è stato di incrociare queste due informazioni studiando la struttura spaziale del soprassuolo.

La struttura spaziale delle variabili dendrometriche e dell'età è stata valutata complessivamente per tutti gli individui arborei tramite l'utilizzo degli indici di autocorrelazione di Moran per l'analisi globale e di Getis per l'analisi locale.

L'analisi globale ci permette di definire se all'interno del popolamento esiste una certa aggregazione tra individui di dimensioni o età simili e fino a che distanza questa si verifica.

L'uso di indicatori locali di autocorrelazione spaziale, invece, ha come obiettivo sia la conferma dei risultati ottenuti in precedenza con l'utilizzo degli indici globali, sia di localizzare nell'area le zone che più contribuiscono all'autocorrelazione globale.

### 4.3.1 Altezza

#### Analisi globale

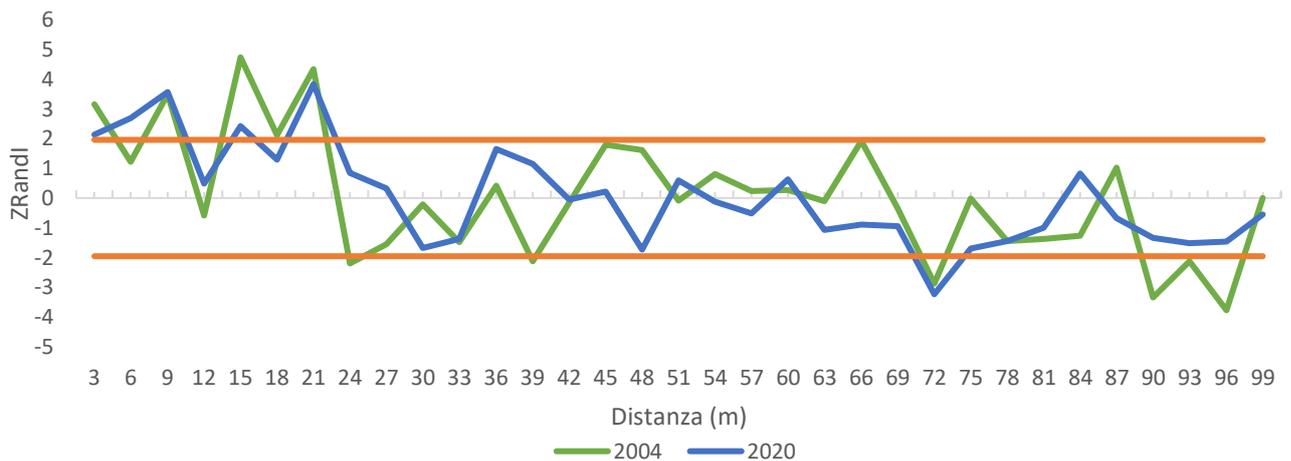


Fig. 38 – Correlogramma calcolato con classe di distanza 3m per la variabile altezza su tutti gli individui

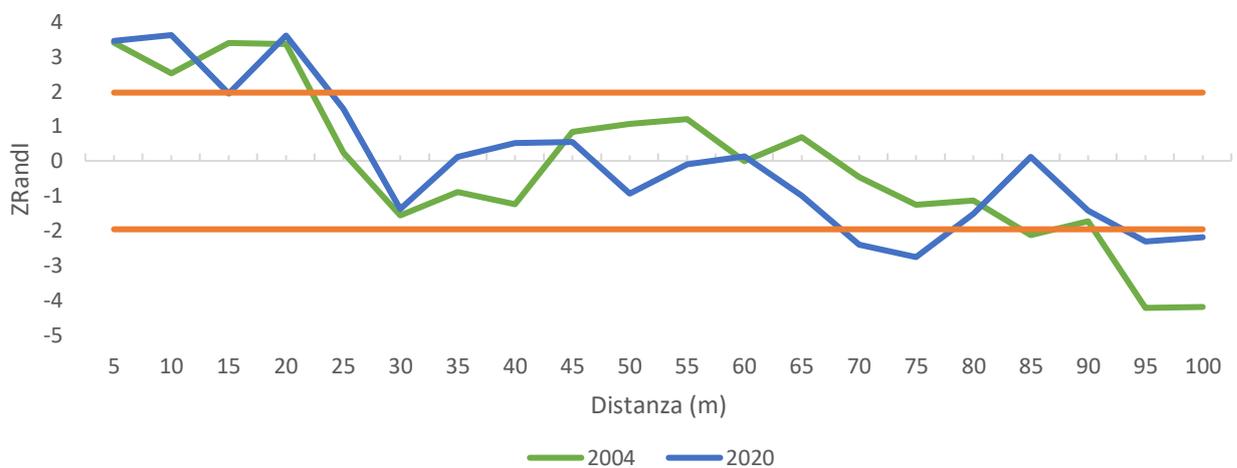
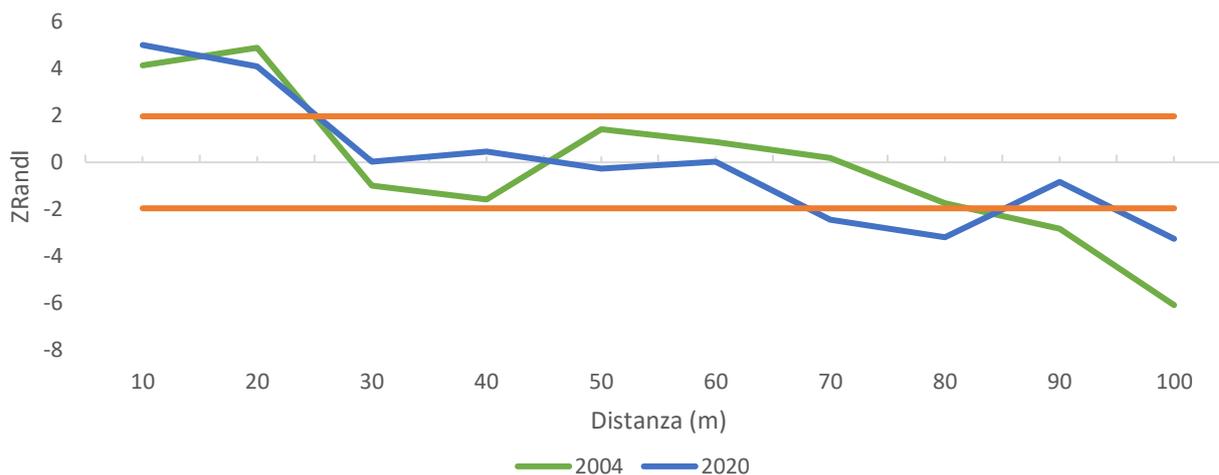


Fig. 39 – Correlogramma calcolato con classe di distanza 5m per la variabile altezza su tutti gli individui



**Fig. 40 – Correlogramma calcolato con classe di distanza 10m per la variabile altezza su tutti gli individui**

I risultati emersi per la classe di distanza di 3 metri appaiono poco stabili, perciò nelle successive analisi sono state riportati solo i grafici relativi alle classi di distanza di 5 e 10 metri. In linea generale, per tutte le classi, si verifica una struttura a gradiente, secondo la quale l'autocorrelazione da valori positivi si sposta verso valori negativi.

Per la classe di distanza di 5 metri nel caso della curva relativa al popolamento del 2020 si rilevano valori positivi significativi fino a una distanza di 20 m. Tra i 70 e 80 metri l'autocorrelazione appare negativa per poi tornare tra i limiti di confidenza e da 95 m ridiventare negativa.

L'andamento della curva per la classe di distanza di 10 m risulta essere simile a quella di 5 m. La curva dell'autocorrelazione del 2004 è anch'essa positiva fino ai 20 metri, ma è negativa solo da 80 metri.

Questo significa che nell'area troviamo gruppi di altezza simile aggregati fino a 15-20 m e progressivamente aumentando la distanza possiamo trovare sempre più individui di classi di altezza diverse.

## Analisi locale

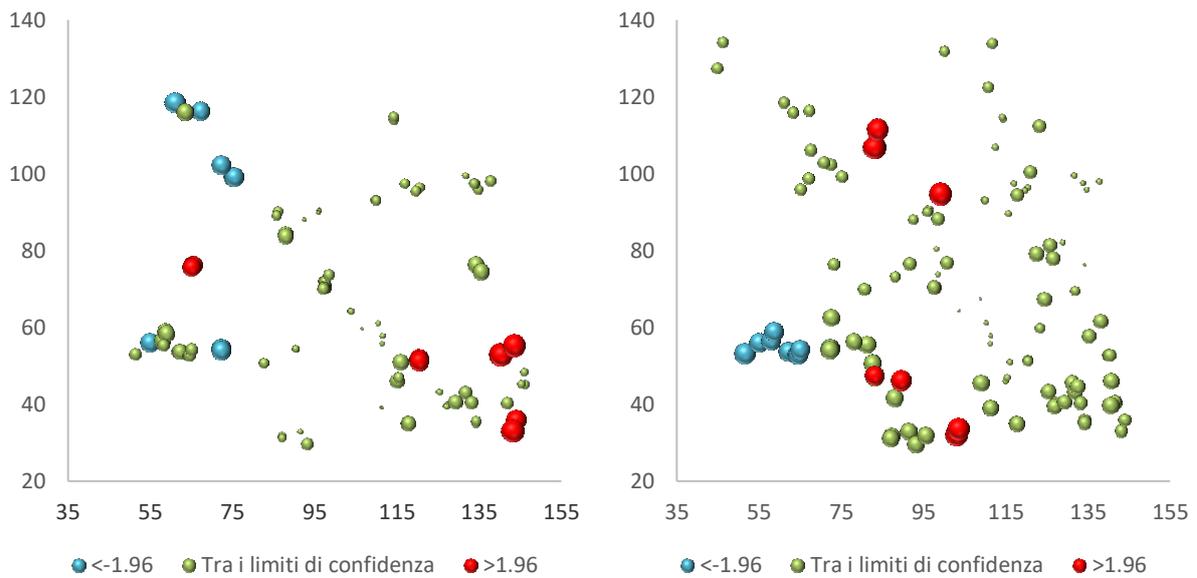


Fig. 41 - Distribuzione dell'indice  $G_i^*$  per la distanza 5m calcolato con la variabile altezza: a) 2004, b) 2020

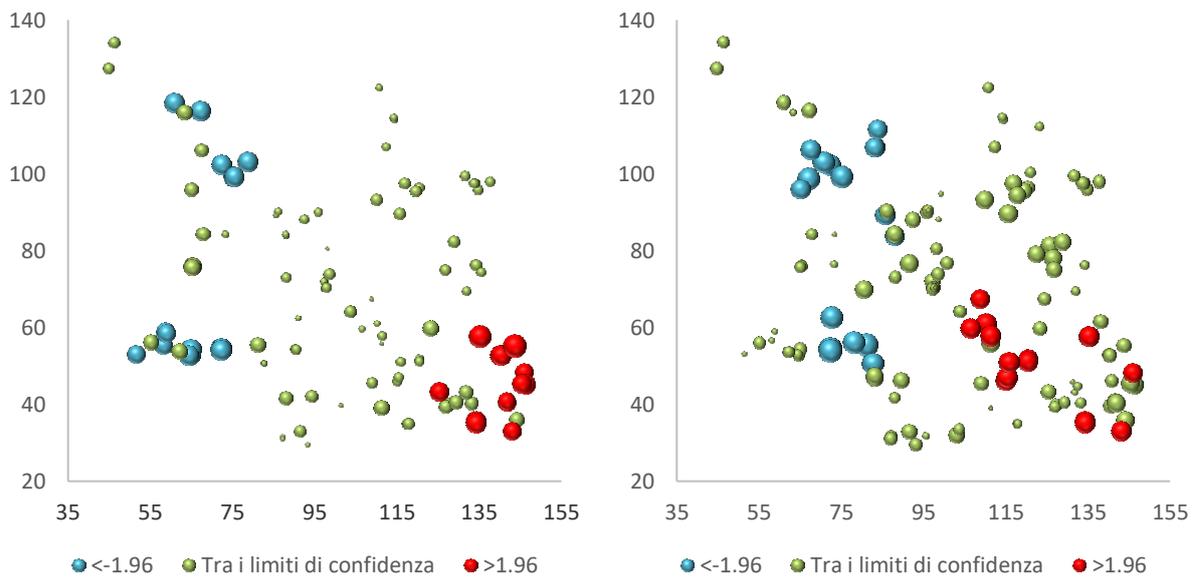
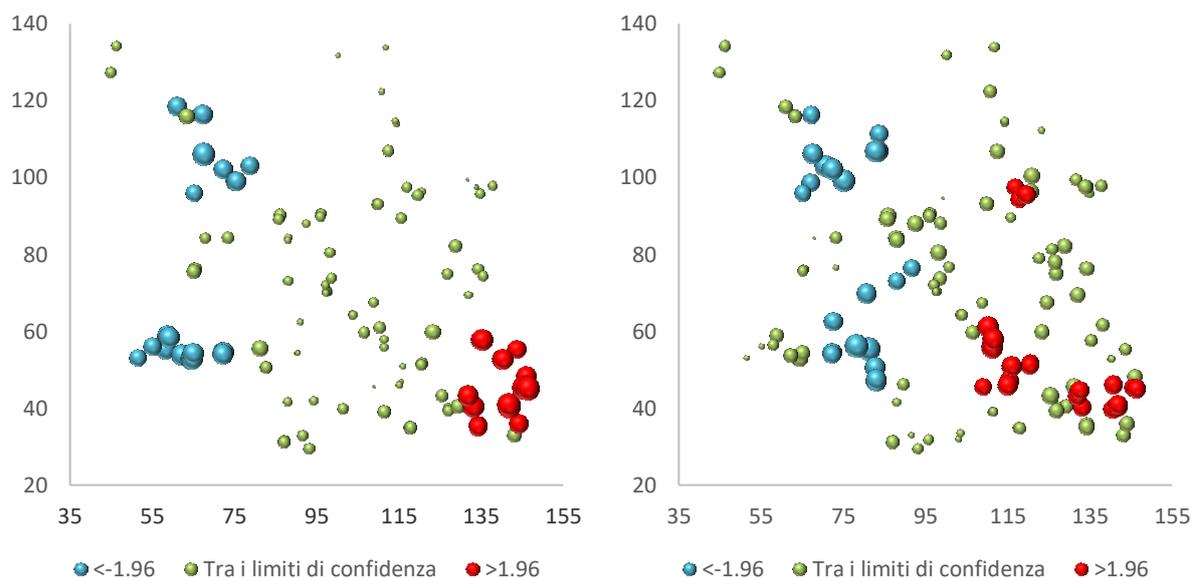
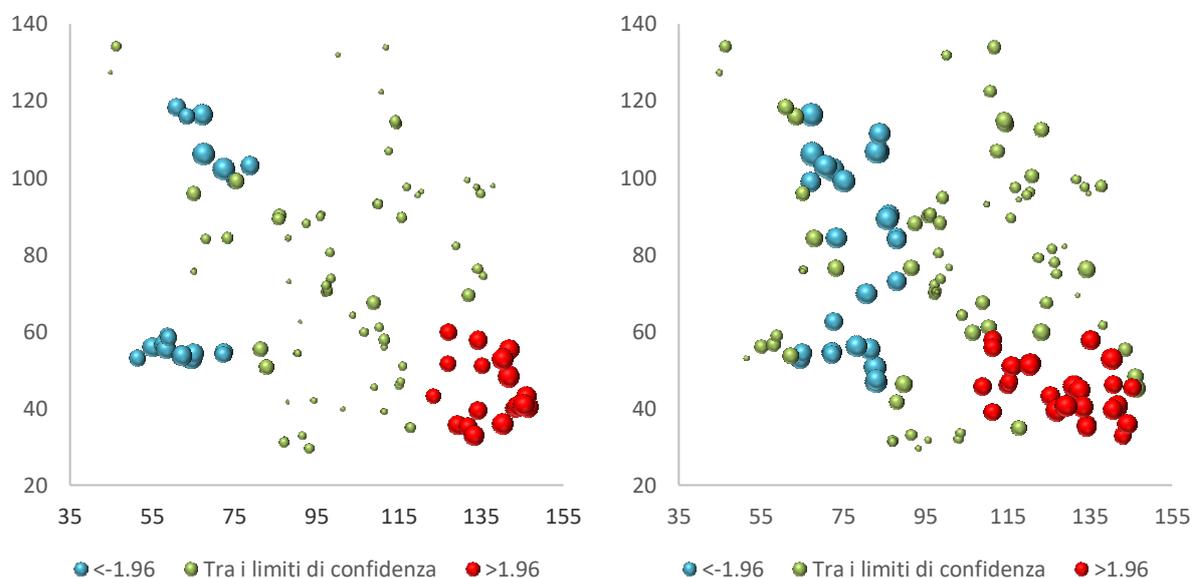


Fig. 42 - Distribuzione dell'indice  $G_i^*$  per la distanza 10m calcolato con la variabile altezza: a) 2004, b) 2020



**Fig. 43 - Distribuzione dell'indice  $G_i^*$  per la distanza 15m calcolato con la variabile altezza: a) 2004, b)2020**



**Fig. 44 - Distribuzione dell'indice  $G_i^*$  per la distanza 20m calcolato con la variabile altezza: a) 2004, b)2020**

L'analisi dell'associazione spaziale dell'altezza, attraverso la statistica  $G_i^*$  di Getis alla distanza critica di 20 metri mette in risalto due cold spot all'incirca nella parte ovest, che indicano una concentrazione di piante basse, e un hot spot nella zona a sud-est, che indica concentrazione di piante alte, per il popolamento del 2004 e un cold spot e due hot spot nelle stesse zone per il popolamento del 2020. Tra il 2004 e il 2020 possiamo notare come sia l'hot spot che i cold spot si siano ampliati (nel caso dei cold spot fino ad unirsi).

Diminuendo il valore della distanza critica a 15 m si assiste ad un restringimento sia delle zone di cold spot che in quelle di hot-spot e vediamo che anche nell'analisi del 2020 le zone di cold spot rimangono separate.

Riducendo la distanza critica a 10 metri si riducono ancora a loro volta anche le zone.

A 5 metri abbiamo solo una zona di cold spot e l'hot spot si trova in un altro punto dell'area frammentandosi.

### 4.3.2 Diametro

#### Analisi globale

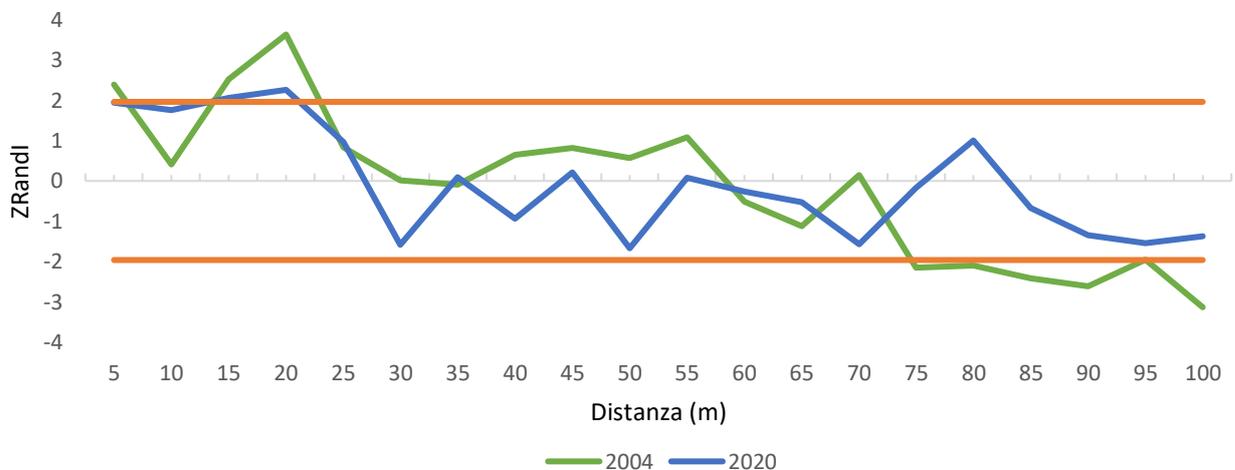


Fig. 45 – Correlogramma calcolato con classe di distanza 5m per la variabile diametro su tutti gli individui

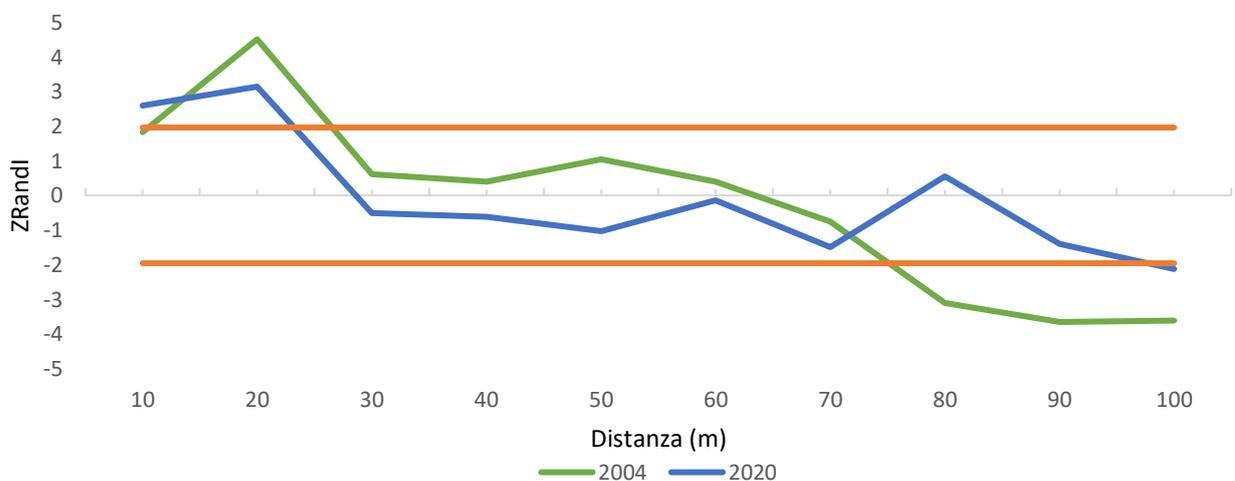
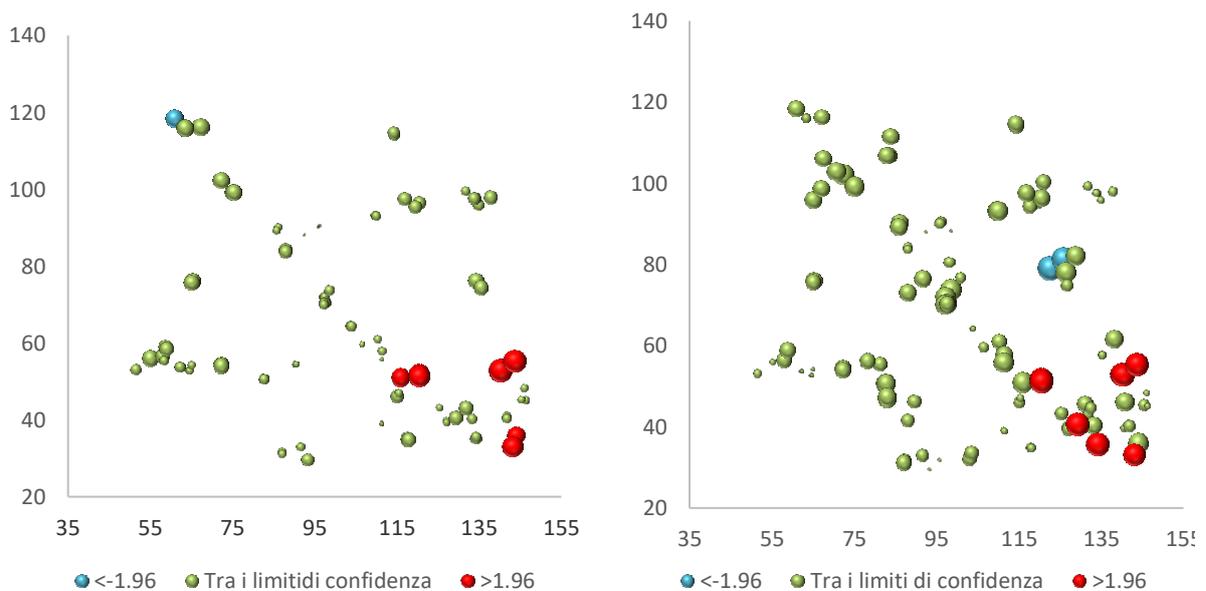


Fig. 46 – Correlogramma calcolato con classe di distanza 10m per la variabile diametro su tutti gli individui

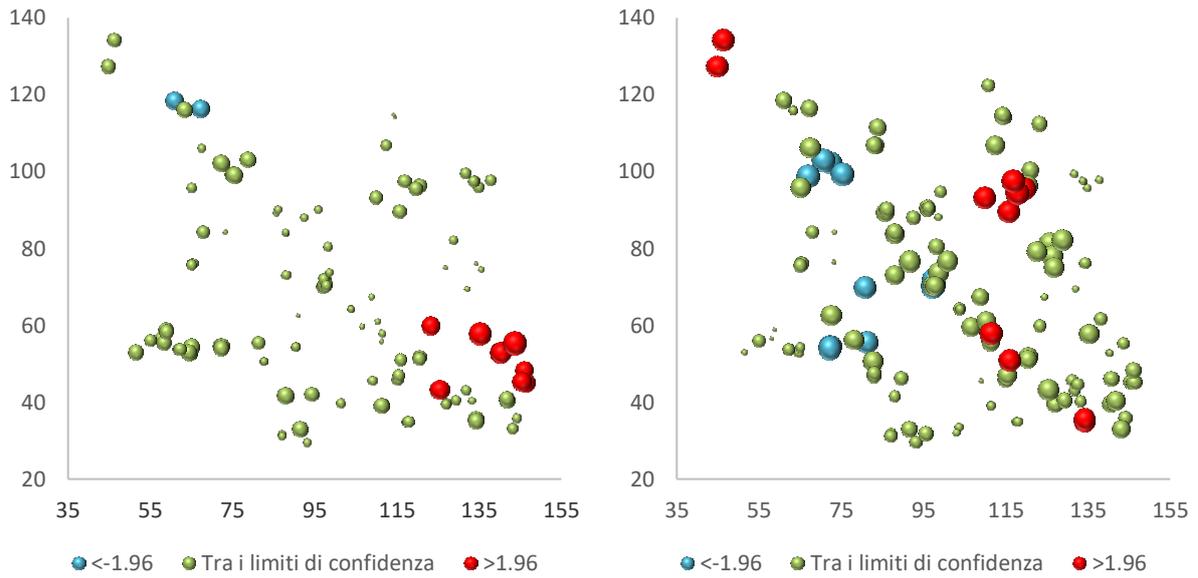
La struttura spaziale dei diametri è abbastanza simile a quella delle altezze, a causa dell'elevata correlazione tra le due variabili. Possiamo osservare anche in questo caso un andamento a gradiente, anche se meno marcato. È possibile comunque notare, soprattutto nella classe di distanza di 10 metri, che anche in questo caso nei primi 20 m tende ad esserci aggregazione di piante della stessa classe di diametro.

Confrontando la curva attuale con quella del 2004 possiamo vedere che quest'ultima è più pendente riportando indici più alti nelle brevi distanze e più bassi oltre i 70 m.

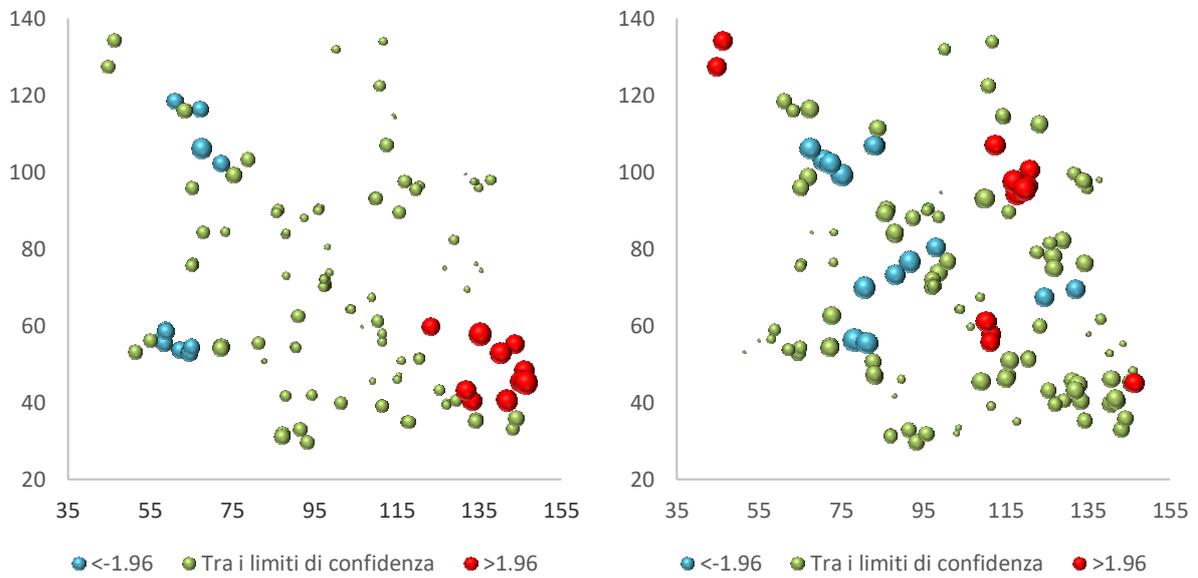
### Analisi locale



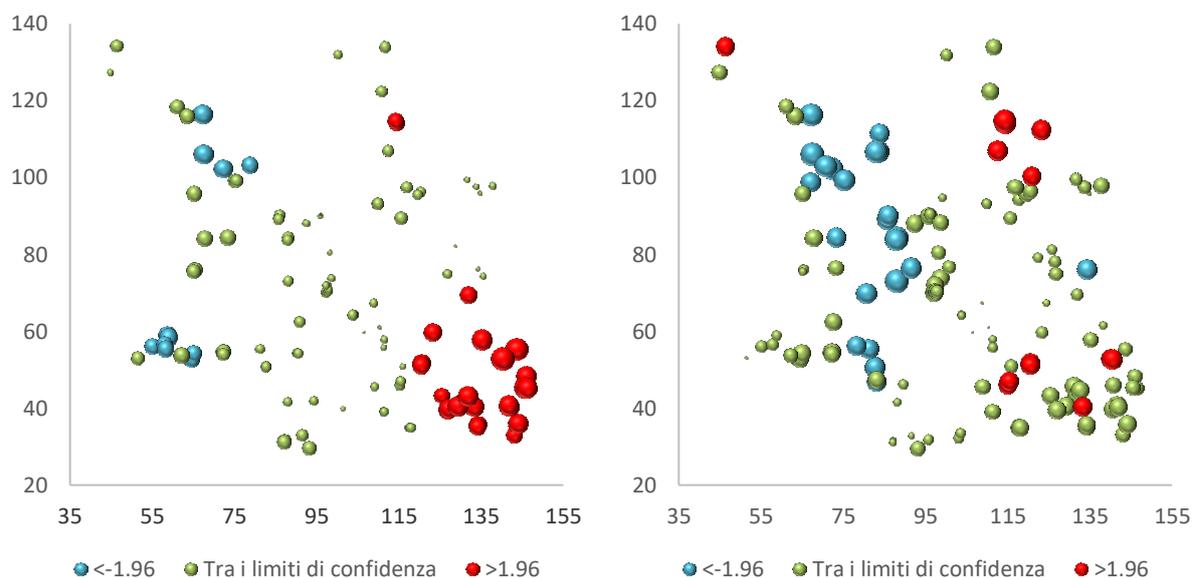
**Fig. 47 - Distribuzione dell'indice  $G_i^*$  per la distanza 5m calcolato con la variabile diametro: a) 2004, b)2020**



**Fig. 48 - Distribuzione dell'indice  $G_i^*$  per la distanza 10m calcolato con la variabile diametro: a) 2004, b)2020**



**Fig. 49 - Distribuzione dell'indice  $G_i^*$  per la distanza 15m calcolato con la variabile diametro: a) 2004, b)2020**



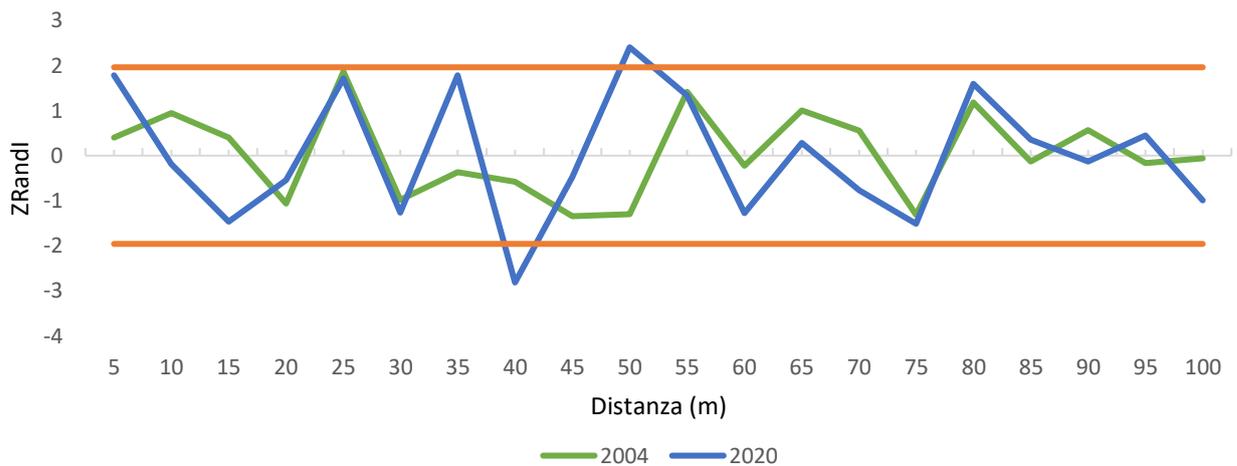
**Fig. 50 - Distribuzione dell'indice  $G_i^*$  per la distanza 20m calcolato con la variabile diametro: a) 2004, b)2020**

Anche nell'analisi locale dell'associazione spaziale dei diametri, attraverso la statistica  $G_i^*$  di Getis, il risultato è simile a quello ottenuto nell'analisi delle altezze ma sempre meno evidente. Troviamo lo stesso nella zona ovest due cold spot che aumentando il raggio tendono ad espandersi fino ad unirsi alla distanza critica di 20 m. Troviamo poi due hot spot, di cui uno più evidente, nella porzione più ad est. Riducendo il diametro a 5 m è possibile identificare una piccola aggregazione di diametri minori ad est e una più ampia per i diametri maggiori più a sud.

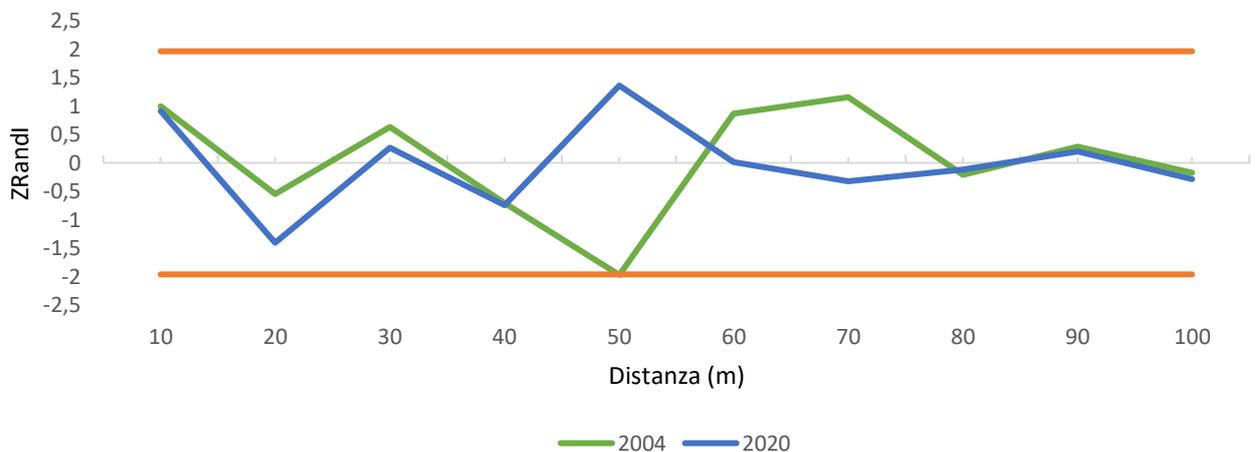
Confrontando il rilievo del 2004 con quello del 2020 osserviamo che l'hot spot nella porzione sud-est del primo rilevamento non è visibile allo stesso modo nel 2020, dove le piante di diametro elevato tendono a essere un po' più disperse, rimanendo comunque nella fascia ad est dell'area. La concentrazione di diametri minori, invece, sembra essersi accentuata nel corso degli anni espandendo i due piccoli cold spot che erano presenti.

### 4.3.3 Età

#### Analisi globale



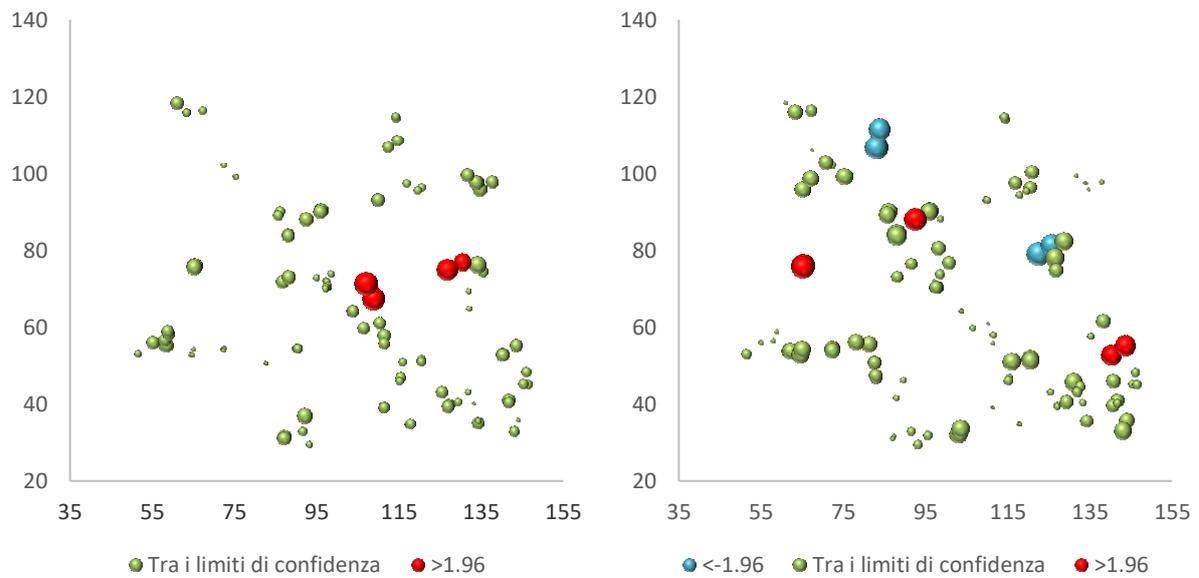
**Fig. 51 - Correlogramma calcolato con classe di distanza 5m per la variabile età su tutti gli individui**



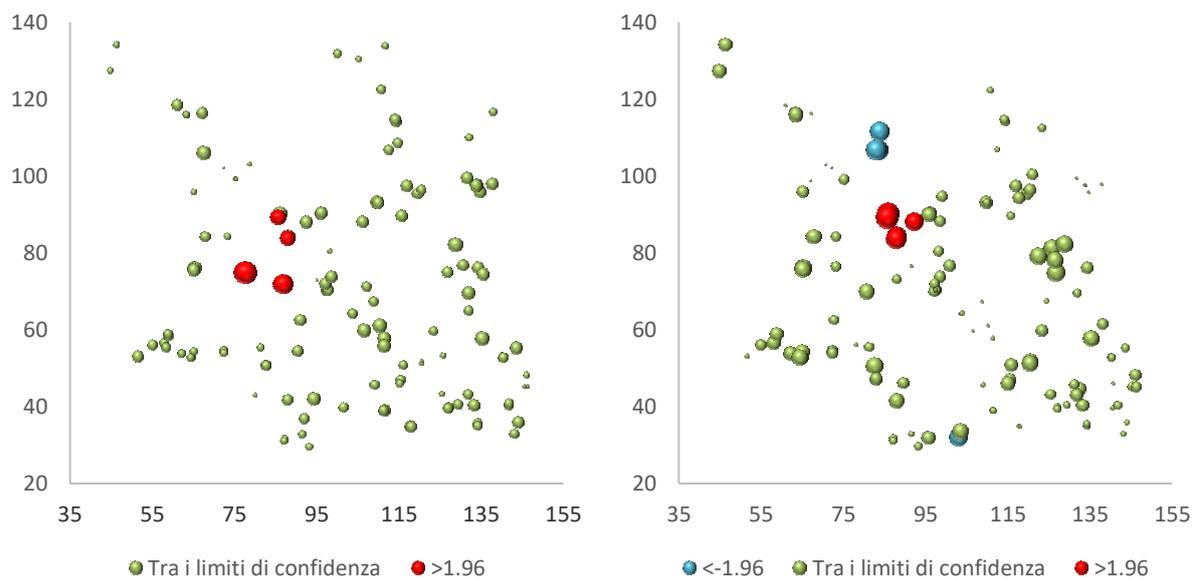
**Fig. 52 - Correlogramma calcolato con classe di distanza 10m per la variabile età su tutti gli individui**

L'età evidenzia un andamento diverso rispetto alle due variabili precedenti. Infatti, i correlogrammi non sono significativi per nessuna classe di distanza, la curva rimane sempre all'interno dei limiti di confidenza e ha un andamento quasi orizzontale, indicando che all'aumentare della distanza la probabilità di incontrare individui di età diverse non cambia e che la distribuzione delle età, all'interno dell'area, è casuale.

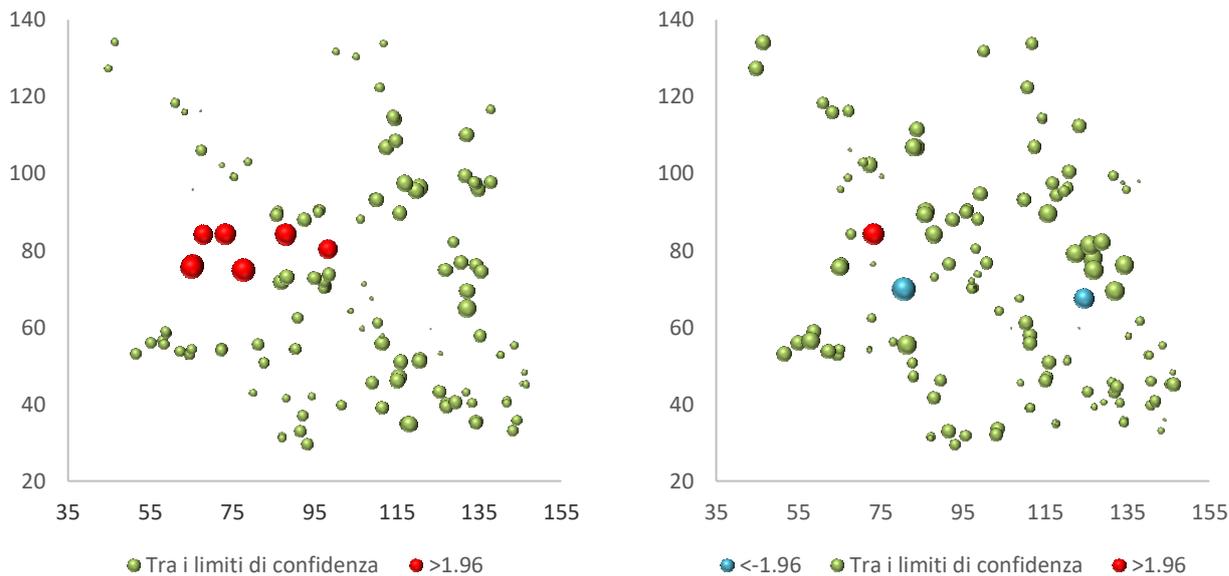
## Analisi locale



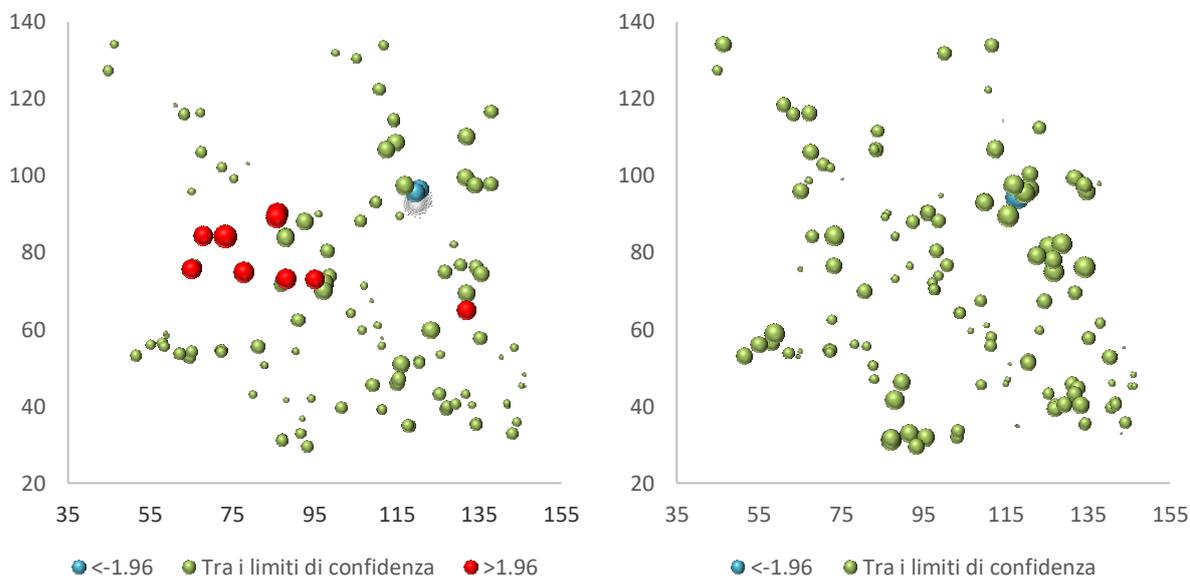
**Fig. 53 - Distribuzione dell'indice  $G_i^*$  per la distanza 5m calcolato con la variabile età: a) 2004, b)2020**



**Fig. 54 - Distribuzione dell'indice  $G_i^*$  per la distanza 10m calcolato con la variabile età: a) 2004, b)2020**



**Fig. 55 - Distribuzione dell'indice Gi\* per la distanza 15m calcolato con la variabile età: a) 2004, b)2020**



**Fig. 56 - Distribuzione dell'indice Gi\* per la distanza 20m calcolato con la variabile età: a) 2004, b)2020**

L'andamento del grafico della statistica di Moran è confermato dall'analisi locale Gi\* di Getis. Utilizzando 20 metri come distanza critica non troviamo, infatti, all'interno dell'area alcun hot spot o cold spot, quindi nessuna aggregazione di individui con età simili. Era presente nel 2004 un hotspot nella zona centro-ovest che però è scomparso con il passare degli anni. Riducendo il raggio a 5 e 10 metri possiamo osservare la presenza di piccoli hot spot e cold spot, ma di dimensioni piuttosto ridotte.

## 5. Discussione e conclusioni

Da questo studio si è potuto osservare, per prima cosa, come la vegetazione stia rispondendo ai cambiamenti climatici, e come questi stiano esercitando una influenza sempre maggiore sull'ambiente di alta quota. Sono stati rilevati notevoli incrementi, sia ipsometrici sia diametrici, per tutte le specie arboree e anche la composizione specifica sta mostrando segni di evoluzione. Infatti, nonostante non ci siano differenze significative nella distribuzione tra le specie, la presenza di individui di abete rosso, di dimensioni anche rilevanti (oltre i 5 metri), può rappresentare un primo indicatore di come il popolamento si stia modificando sotto l'effetto delle temperature sempre più elevate e quindi sempre meno limitanti. Questa specie, difatti, solitamente trova la propria fascia vegetazionale di elezione a quote inferiori.

Osservando i dati meteorologici dell'area dal 1900 ad oggi è stato possibile notare come le temperature medie siano cambiate nel corso degli anni.

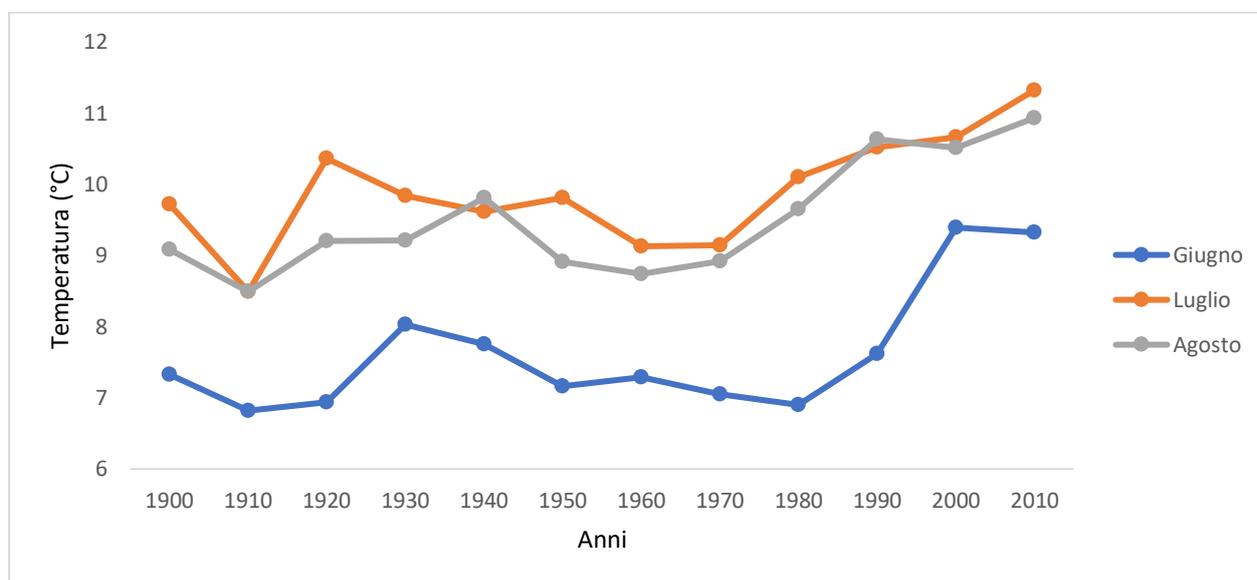


Fig. 57 – Andamento decennale delle temperature medie dei mesi estivi nell'ultimo secolo

Nella seguente tabella sono state riportate le temperature medie per la prima e seconda metà dello scorso secolo e la media degli ultimi 20 anni per i tre mesi di maggiore crescita vegetativa.

	<b>Giugno</b>	<b>Luglio</b>	<b>Agosto</b>
<b>1900-1950</b>	7.4	9.6	9.2
<b>1950-2000</b>	7.2	9.7	9.4
<b>2000-2020</b>	9.4	11.0	10.7

**Tabella 8 – Temperature medie dei mesi estivi per la prima e seconda metà del '900 e dopo il 2000**

Tra la media delle temperature del periodo 1900-1950 e 1950-2000 non osserviamo grandi differenze, confrontandoli però con i dati relativi all'intervallo 2000-2020 osserviamo che le temperature per tutti e tre i mesi sono salite di circa 1.5°C.

Considerando il fatto che, generalmente, in montagna per ogni 100 metri in più di quota la temperatura media diminuisce di circa 0.6°C, possiamo affermare che le condizioni climatiche che riscontriamo oggi nell'area, posta alla quota di 2200 metri corrispondono a quelle potenzialmente verificatesi ad una quota di 250 metri inferiore nello scorso secolo. Di conseguenza, considerando soltanto l'aspetto climatico, è come se oggi il popolamento si trovasse ad una quota di circa 1950 metri, quindi non alla treeline ma nella fascia subalpina dove le condizioni permettono degli accrescimenti significativamente migliori.

L'utilizzo di metodi di analisi spaziale ha consentito di ottenere una visione più oggettiva della distribuzione degli individui e della struttura esaminati, permettendo un confronto tra le dinamiche e i processi evolutivi in atto.

Con l'analisi della struttura spaziale, eseguita attraverso l'indice di Moran a livello globale e con il  $G_i^*$  di Getis a livello locale, è stato possibile definire come nell'area ci siano dei raggruppamenti con dimensioni di 15-20 metri, di piante più sviluppate nella zona est e, viceversa, con altezza e diametro inferiori nella parte ovest dell'area. Si possono richiamare diversi fattori in grado di giustificare lo sviluppo di tale struttura spaziale: sicuramente potrebbe avere inciso è il suolo che, con le sue tipiche variazioni microtopografiche legate alla morfologia dell'area, può aver creato delle zone più favorevoli rispetto ad altre; la differenza di quota, anche se non estremamente elevata, potrebbe giustificare almeno in parte queste differenze dimensionali all'interno del popolamento. Si può notare, infatti, come la zona ad ovest, dove si concentrano gli individui con minori accrescimenti, sia localizzata ad una quota maggiore rispetto a quella a est, dove si concentrano gli individui più sviluppati.

Infine, anche l'esposizione dell'area potrebbe rappresentare un elemento importante. Essendo principalmente a est ed essendo l'ovest verso monte, con il calare del sole quella

porzione potrebbe ricevere una minore radiazione nelle ore pomeridiane, con possibili effetti diretti sulle piante ma anche indiretti aumentando, ad esempio, la permanenza della neve. Questo risultato è coerente con quelli ottenuti con la point pattern analysis, che ci indica repulsione tra gli individui di dimensioni maggiori verso quelli di dimensioni minori e nessuna significatività nella distribuzione delle classi di età.

Un risultato interessante emerso attraverso l'analisi della distribuzione spaziale è la mancata propensione degli individui all'aggregazione in collettivi tipica dei popolamenti di alta quota. Anche questo potrebbe essere un effetto dovuto ai cambiamenti climatici che, migliorando le condizioni di sviluppo (temperature più alte, scioglimento della neve anticipato, ecc.), riducono sempre più l'emergere di processi di facilitazione e quindi la necessità di sviluppare collettivi per resistere alle avverse situazioni ambientali.

Complessivamente tra i due rilevamenti non sono state riscontrate importanti differenze dal punto di vista della distribuzione delle piante o della struttura, anche se sembra essersi accentuata, nel corso degli anni, l'aggregazione di individui di dimensioni maggiori nella porzione ad est e di dimensioni inferiori in quella ovest, mentre la distribuzione delle classi di età sembrerebbe presentarsi ancor più casuale che in passato.



## Bibliografia

- E. Lingua, D. Godone, R. Motta. Analisi spaziale in popolamenti di conifere al limite del bosco
- T. Anfodillo, 2007. Cambiamenti climatici e dinamica di popolazione al limite superiore del bosco: importanza delle ricerche di lungo termine. *Forest@* 4 (1): 3-5. [online] URL: <http://www.sisef.it/>.
- Jørgen Bo Larsen, 1995. Ecological stability of forests and sustainable silviculture. *Forest Ecology and Management* 73(1-3):85-96
- G. Pignatti, 2011. La vegetazione forestale di fronte ad alcuni scenari di cambiamento climatico in Italia. *Forest@* 8: 1-12 [online: 2011-02-17] URL: <http://www.sisef.it/forest@/>
- Borghetti M, La Mantia T, Menozzi P, Piotti A, 2012. Probabili impatti del cambiamento climatico sulla biodiversità delle foreste italiane. *Forest@* 9: 245-250 [online 2012-11-19] URL: <http://www.sisef.it/forest@/contents/?id=efor0708-009>
- Piotti A, Piovani P, Scalfi M, Leonardi S, Menozzi P, 2007. *Global change* e risalita della *treeline*: conseguenze genetiche della colonizzazione dei pascoli alpini. *Forest@* 4 (1): 69-78. [online] URL: <http://www.sisef.it/>.
- P. Piussi, E. P. Farrel, 2000. Interactions between society and forest ecosystems: challenges for the near future. *Forest Ecology and Management* 21-28
- C. Neri, P. Gianolla, S. Furlanis, R. Caputo, A. Borsellini. Note illustrative della carta geologica d'Italia alla scala 1:50.000, foglio 029 Cortina d'Ampezzo. APAT
- ARPAV, 2005. Carta dei suoli del Veneto
- D. M. Zilioli, C. Bini, 2009. Dieci anni di ricerche pedologiche in ambiente alpino: considerazioni sulla distribuzione e sull'evoluzione dei suoli nella regione dolomitica. *Studi Trent. Sci. Nat.*, 85 (2009): 61-68
- Wiegand, T., A. Moloney, K. 2004. Rings, circles, and null-models for point pattern analysis in ecology. *Oikos*, 104 (2): 209-229.
- Legendre, P., Fortin, M.J. 1989 Spatial pattern and ecological analysis. *Vegetatio* 80: 107-138
- Wiegand, T., A. Moloney, K. 2014. *Handbook of Spatial Point-Pattern Analysis in Ecology*. CHAPMAN & HALL/CRC APPLIED ENVIRONMENTAL STATISTICS
- Carrer M., Urbinati C. 2001. Spatial analysis of structural and tree-ring related parameters in a timberline forest in the Italian Alps. *Journal of Vegetation Science* 12: 643-652, 2001

- H. Kerschner, G. Kaser, R. Sailer 2000. Alpine younger dryas glaciers as paleo-precipitation gauges. *Annals of Glaciology* 31 2000
- M. Beniston, H. F. Diaz, R. S. Bradley 1997. Climatic change at high elevation sites: an overview
- Soraruf L, Carrer M, 2007. Dinamismi e struttura della rinnovazione in tre popolamenti d'alta quota nelle Dolomiti ampezzane. *Forest@* 4 (2): 177-193. [online] URL: <http://www.sisef.it/>.
- M. Carrer, L. Soraruf, E. Lingua 2013. Convergent space–time tree regeneration patterns along an elevation gradient at high altitude in the Alps. *Forest Ecology and Management*
- T. Anfodillo, C. Urbinati 2001. Foreste di alta quota in ambiente alpino: fisionomia, ecologia e possibili dinamismi.
- L. Soraruf 2007. Studio delle strutture e delle dinamiche spazio temporali in popolamenti forestali attraverso il monitoraggio di lungo periodo. Dottorato di ricerca
- Beretta D. 2016. Dinamica della faggeta del Cansiglio in libera evoluzione. Tesi di laurea
- Marin A. 2011. Spatial analysis of a mixed beech, spruce and fir stand in the eastern alps. Tesi di laurea
- Körner, Christian. *Alpine treelines: functional ecology of the global high elevation tree limits.* Springer Science & Business Media, 2012.