



Arianna Del Pino
Francesco Boscutti
Marco Zancani
Marco Vuerich

RISPOSTA DELLA NANOFANEROFITA *ATADINUS PUMILUS* (TURRA) HAUENSCHILD AL CAMBIAMENTO CLIMATICO ED EFFETTI SULLA COMUNITÀ VEGETALE RUPICOLA ALPINA

RESPONSE OF THE DWARF SHRUB *ATADINUS PUMILUS*
(TURRA) HAUENSCHILD TO CLIMATE CHANGE AND EFFECTS
ON THE ALPINE CLIFF PLANT COMMUNITY

Riassunto - Il marcato aumento della temperatura media degli ambienti alpini ha provocato impatti notevoli sugli ecosistemi d'alta quota. Globalmente è stata osservata una rapida espansione degli arbusti, determinata da una maggiore crescita e capacità di colonizzare aree a quote sempre maggiori. Inevitabile conseguenza di questo fenomeno è l'erosione degli habitat delle specie adattate a vivere ad altitudini elevate, che porta, in ultima analisi, ad un'alterazione della biodiversità. In questo studio è stato applicato un approccio dendroecologico al fine di comprendere le relazioni tra la crescita radiale annuale della specie casmofita *Atadinus pumilus* (Turra) Hauenschild, le principali variabili climatiche (temperature medie, precipitazioni e precipitazioni nevose) ed altitudine, al fine di determinare i fattori limitanti della crescita della pianta e dell'intera comunità vegetale ospitante. Lo studio è stato condotto nelle Alpi e Prealpi della regione Friuli Venezia Giulia, dove sono stati prelevati 19 campioni lungo un gradiente altitudinale totale di 600 m. L'innalzamento della temperatura media ha determinato un incremento della crescita radiale della specie, mentre l'aumento delle precipitazioni ha limitato la crescita (spessore) degli anelli annuali. La temperatura media, tuttavia, si è dimostrata essere il fattore principale nell'alterazione della crescita radiale, soprattutto nel caso di piante giovani. Infine, una maggiore ricchezza specifica ha determinato una diminuzione della crescita di *A. pumilus*, imputabile probabilmente a una maggiore competizione.

Questi risultati suggeriscono che l'aumento della temperatura potrà cambiare drasticamente anche queste comunità vegetali ben adattate a climi estremi, inducendo una crescita maggiore della vegetazione e un plausibile cambiamento dei rapporti tra le specie presenti e della biodiversità.

Parole chiave: Cambiamento climatico - Biodiversità - Espansione arbusti nani - Specie casmofite - *Atadinus pumilus*

Abstract - The marked increase in the average temperature of Alpine environments has caused significant impacts on high-altitude ecosystems. Globally, a rapid expansion of shrubs has been observed, brought about by their increased growth and ability to colonise areas at higher and higher altitudes. An inevitable consequence of this phenomenon is the erosion of the habitats of species adapted to living at high altitudes, which ultimately leads to an alteration of biodiversity. In this study, a dendroecological approach was applied to understand the relationships between the annual radial growth of the chasmophyte species *Atadinus pumilus* (Turra) Hauenschild, the main climatic variables (mean temperatures, precipitation and snowfall) and altitude. The goal was to identify the limiting factors of the growth of the plant and the entire host plant community. The study was conducted in the Alps and Pre-Alps of the Friuli Venezia Giulia region, where 19 samples were taken along a total altitudinal gradient of 600 m. The rise in mean temperature led to an increase in the radial growth of the species, while the increase in precipitation limited the growth (width) of the annual rings. The mean temperature, however, proved to be the main factor in radial growth, especially in the case of young plants. Finally, increased specific richness led to a decrease in the growth of *A. pumilus*, which was probably due to increased competition.

These results suggest that rising temperatures may drastically change even these well-adapted plant communities in extreme climates, leading to increased vegetation growth and a plausible change in species ratios and biodiversity.

Key words: Climate change - Biodiversity - Dwarf shrub expansion - Chasmophytic species - *Atadinus pumilus*

Introduzione

Il fenomeno definito “amplificazione artica” ha determinato un riscaldamento degli ambienti artici ed alpini molto più accentuato rispetto alle altre zone della Terra. Si stima che le temperature medie globali delle Alpi centrali Europee siano aumentate di circa 2 °C, il doppio della media globale, provocando impat-

ti non trascurabili sugli ecosistemi d'alta quota (ELKIN et al. 2013). L'aumento delle precipitazioni invernali e la diminuzione di quelle estive sono altri aspetti del cambiamento climatico (SMIATEK et al. 2009). Queste alterazioni hanno determinato, in ultima analisi, una modifica della stagione vegetativa (NIJS et al. 2000), che sarà più lunga, in virtù di un anticipato scioglimento primaverile (FARRER et al. 2015) ma anche più asciutta,

per la riduzione delle precipitazioni estive e l'intensificazione di ondate di calore e siccità ad esse associate.

La vegetazione di questi ambienti, minacciata da queste modificazioni, può rispondere in tre modalità, quali i) persistere con il clima modificato, ii) migrare verso habitat più idonei alle caratteristiche ecologiche della specie o, infine, iii) estinguersi (THEURILLAT & GUIBAN 2001). L'ultimo scenario può essere il destino delle comunità vegetali che crescono a quote più elevate che, spinte dall'innalzamento altitudinale dei limiti di crescita, vedrebbero il loro areale sempre più contratto (THEURILLAT & GUIBAN 2001). Questo scenario potrebbe poi essere esacerbato dall'aumento della competizione con specie arbustive, le quali hanno aumentato la loro crescita a scapito delle praterie, alterandone la biodiversità (BOSCUCCI et al. 2018).

I sistemi alpini sono importanti *hotspot* di biodiversità (VITASSE et al. 2021), ma tendono ad essere fortemente influenzati dai cambiamenti climatici (BJORKMAN et al. 2018) ed è per questo che si rileva un'abbondanza della copertura vegetale anche in aree dove in precedenza non erano presenti (WOOKEY et al. 2009). Questo fenomeno è anche determinato dall'espansione degli arbusti che avviene secondo tre diverse modalità: i) incremento della copertura arbustiva mediante getti laterali da arbusti già esistenti, ii) cambiamento della forma di crescita con aumento dell'altezza della chioma, iii) avanzamento della specie verso zone a Nord o a quote più elevate, dove il clima risulta più favorevole allo sviluppo. Per descrivere questo fenomeno è stato coniato il termine *greening*, che ben evidenzia l'incremento di colore verde, dovuto all'aumento della copertura vegetale, negli ambienti artici e alpini (MYERS-SMITH et al. 2020). L'espansione, dovuta principalmente all'aumento delle temperature medie, causa modifiche in numerosi processi ecosistemici, alterando le strutture e le funzioni degli ecosistemi alpini (MYERS-SMITH et al. 2011). Le principali variazioni rilevate a livello ecosistemico sono le modifiche dell'albedo e dell'altezza della neve, con conseguente cambiamento delle dinamiche idrologiche. Inoltre, la diminuzione della luce a disposizione per le comunità erbacee provoca un decremento della biodiversità, perché la maggior parte di queste specie non tollera l'ombreggiamento. Mentre questo fenomeno è stato ampiamente studiato negli ambienti artici, poco si conosce sul *greening* delle aree alpine (CARLSON et al. 2017; FILIPPA et al. 2019), e pertanto un approfondimento delle dinamiche dell'espansione della copertura vegetale lungo il gradiente altitudinale di queste aree è cruciale per prevedere il destino di questi ecosistemi. Il monitoraggio a lungo termine della vegetazione può aiutare a comprendere al meglio la risposta al cambiamento climatico delle comunità vegetali d'alta quota, permettendo di salvaguardare gli ambienti alpini e la loro biodiversità (PIAO et al. 2019). In questo ambito, lo studio delle relazioni tra clima e

accrescimento delle piante permette di comprendere le dinamiche degli ambienti alpini.

Tra le varie discipline, lo studio dendrocronologico dell'accrescimento radiale e degli elementi dello xilema delle specie legnose perenni può fornire importanti informazioni sulle tendenze di crescita delle specie degli ultimi decenni o secoli. Svariati studi dimostrano come ci sia una relazione tra clima e crescita della pianta (MYERS-SMITH et al. 2015) ed a partire dalle dimensioni degli anelli xilematici è possibile capire i fattori limitanti di crescita e studiare i cambiamenti climatici (SCHMIDT et al. 2010). La crescita annuale delle specie perenni dipende in gran parte dal clima (acqua ed energia) e da fattori locali, come nutrienti a disposizione. Lo studio di queste relazioni è quindi fondamentale per capire le capacità acclimatative delle specie, fornendo importanti elementi per l'interpretazione degli scenari futuri di risposta ai cambiamenti in atto. La dimensione dei vasi xilematici creati in un'annata dipende dalla disponibilità di nutrienti, acqua ed energia. Anche la stagionalità è importante, perché in primavera i vasi tendono ad essere grandi, grazie all'abbondanza di acqua e sostanze disponibili, mentre in autunno sono piccoli, essendoci meno energia a disposizione.

Gli arbusti nani sono caratterizzati da un portamento prostrato e da una bassa statura (10-40 cm), il che consente loro di resistere alle condizioni climatiche estreme che si possono incontrare ad alta quota (DE TOMA et al. 2022). Negli ultimi decenni l'espansione degli arbusti nani ha portato ad un aumento delle ricerche svolte sulle aree montane italiane al di sopra del limite degli alberi, che hanno rilevato che questa espansione risulta essere influenzata da numerosi fattori, tra cui il clima, la topografia e l'uso del suolo. In particolare, le specie casmofite sono in grado di svilupparsi su pareti rocciose, spesso molto scoscese, e massi di notevoli dimensioni, caratteristiche che le rendono ottimi indicatori per lo studio del cambiamento climatico. Infatti, non essendo influenzate dalla disponibilità di nutrienti e capacità idrica del suolo e per la presenza di limitate interazioni con altre specie, il loro sviluppo dipende esclusivamente dagli eventi atmosferici. Pochi studi sono stati effettuati sulle relazioni presenti tra specie casmofite e cambiamenti climatici, ciò potrebbe rappresentare un punto importante per comprendere i fattori determinanti per la crescita e l'espansione degli arbusti nani.

Questo studio esplora le relazioni presenti tra la crescita annuale degli ultimi 32 anni della specie alpina casmofita *Atadinus pumilus* (Turra) Hauenschild (= *Rhamnus pumila* Turra), le temperature, le precipitazioni e le loro interazioni. In particolare, sono state valutate le temperature medie, le precipitazioni annuali e le precipitazioni nevose. Il campionamento è stato effettuato nella zona del Nord-Est dell'Italia, nello specifico sulle Alpi e Prealpi della regione Friuli Venezia Giulia.

Ci si attende un aumento della crescita annuale del-

la specie, in relazione all'aumento delle temperature medie. Si prevede inoltre che la crescita sia plasmata anche dal regime pluviometrico e dall'interazione di questo con le temperature. Infine, ci si attende che la capacità di risposta della specie possa essere influenzata dall'età degli individui.

Materiali e metodi

Specie studiata

In questo lavoro è stata studiata la specie casmofita, *Atadinus pumilus* (Fig. 1B), un basso arbusto (5-30 cm) appartenente alla famiglia delle Rhamnaceae, con rami legnosi a corteccia grigia, striscianti sulla roccia, glabri, dove solamente le parti giovani presentano pubescenza. Le foglie sono obovate o subrotonde, variabili e dentellate. I fiori sono dioici, giallo-verdastri, il frutto è una drupa nera. Questa pianta è presente in ambienti montani, alpini e subalpini, principalmente su rupi, ghiaioni e macereti calcarei e dolomitici, tra i 1200 m s.l.m. e i 2500 m s.l.m. in zone ben esposte al sole (PIGNATTI 2019).

Area di studio e selezione delle aree campione

L'area di studio corrisponde alle Alpi e Prealpi Carniche e Giulie del Friuli Venezia Giulia. Il clima è caratterizzato da piovosità elevate, con piogge intense e frequenti, con precipitazioni medie annue variabili, dai 900 mm anno⁻¹ ai 3000 mm anno⁻¹. Il territorio montano è diviso in diverse unità orografiche: i) Catena Carnica, ii) Alpi Giulie, iii) Prealpi Carniche e iv) Prealpi Giulie, tutte principalmente costituite da calcare e dolomia.

I valori medi di temperatura sono circa 9-12,5 °C in fondovalle e 3-4,5 °C sulle vette. Il cambiamento climatico ha colpito anche queste aree, portando all'aumento delle temperature di 1 °C negli ultimi 30 anni, riducendo gli strati nevosi ed innalzando la quota neve (ARPA FVG, 2023).

In particolare, all'interno dell'area sono state considerate le rupi calcaree esposte a sud, quali habitat principali della specie. Nell'area si alternano due comunità vegetali, descritte rispettivamente dal manuale degli habitat del Friuli Venezia Giulia (POLDINI et al. 2006). Al di sotto dei 1700 m s.l.m. sono presenti le comunità delle "Rupi calcaree soleggiate montane a *Potentilla caulescens*", tipiche della regione alpina e continentale, caratteristiche del piano montano, su substrati calcareo-dolomitici, caratterizzate da una presenza di bassa copertura vegetale ed elevata percentuale di specie casmofite. Oltre i 1700 m s.l.m. sono presenti le "Rupi calcaree soleggiate subalpine ed alpine a *Potentilla nitida*", tipiche del piano subalpino ed alpino, su substrati calcarei-dolomitici, con un'elevata percentuale di comunità casmofite. La specie frequenta entrambe le comunità.

Al fine di determinare i luoghi più idonei al campionamento, è stato utilizzato il software QGIS. In particolare, in primis, utilizzando il DTM della regione Friuli Venezia Giulia, ottenuto dalla mosaicatura Lidar del 2018 e con risoluzione di 10 m pixel⁻¹, sono state selezionate solo le aree aventi un'altitudine compresa tra i 1000 m s.l.m. e 2780 m s.l.m. (altitudine massima regionale) e con un'esposizione compresa tra Sud-Est e Sud-Ovest (135°-225°). Queste aree sono state filtrate, utilizzando la Carta degli habitat del Friuli Venezia Giulia (IRDAT FVG), selezionando solo le aree ricadenti nelle categorie di seguito riportate: i) ghiaioni basici alpini e subalpini, ii) rupi basiche delle Alpi, iii) ghiaioni calcarei illirici, iv) ghiaioni termofili prealpini calcarei, v) pavimenti calcarei, vi) rupi calcaree alpine e montane. Successivamente, sovrapponendo i risultati della ricerca spaziale con i dati di osservazione della specie della Regione (MARTINI et al. 2023), è stato possibile identificare 10 siti di campionamento (Fig. 1A). In ogni sito di campionamento sono stati prelevati campioni ogni 100 m di dislivello, a partire dalla prima quota di campionamento. In questo modo sono stati condotti 19 campionamenti lungo un gradiente altitudinale di 600 m verticali, spaziando da un'altitudine di 1553 ad un massimo di 2070 m s.l.m.

Ad ogni quota di campionamento è stato raccolto il fusto più vecchio alla base dell'arbusto ed è stato eseguito un rilievo vegetazionale, in un'area di 3 m² circolari. In ogni area, quindi, sono state annotate tutte le specie vascolari presenti e stimato il numero di individui. La nomenclatura floristica segue quanto utilizzato da BARTOLUCCI et al. (2018). Per ogni sito di campionamento sono state raccolte le variabili climatiche di temperatura media annuale, precipitazione cumulata, e precipitazione nevosa per il periodo compreso tra il 1980 e il 2020.

Analisi dendrocronologiche

Per le analisi dendrocronologiche è stato utilizzato il metodo proposto da SCHWEIGRUBER & POSCHLOD (2005). Il campione è stato tagliato a 1,5 cm dalla base di ogni fusto, successivamente immerso in etanolo glicerinato (Bouin) per una notte ed incluso in paraffina. Mediante un microtomo sono state preparate sezioni di 6 µm, colorate con Safranina e Astra blue per evidenziare la struttura degli anelli di crescita. Successivamente, le sezioni sono state essiccate a 60 °C per un paio d'ore e immerse due volte, per un paio di minuti ciascuna, in xilolo e poi in soluzioni di etanolo e acqua distillata. L'osservazione della sezione è stata effettuata per mezzo di microscopio ottico, dotato di macchina fotografica (Fig. 1C). Le fotografie sono state poi elaborate, mediante il programma "ImageJ", che permette di misurare il numero (età delle piante) e lo spessore degli anelli di crescita, parametri successivamente messi in relazione con le temperature e le precipitazioni annuali.

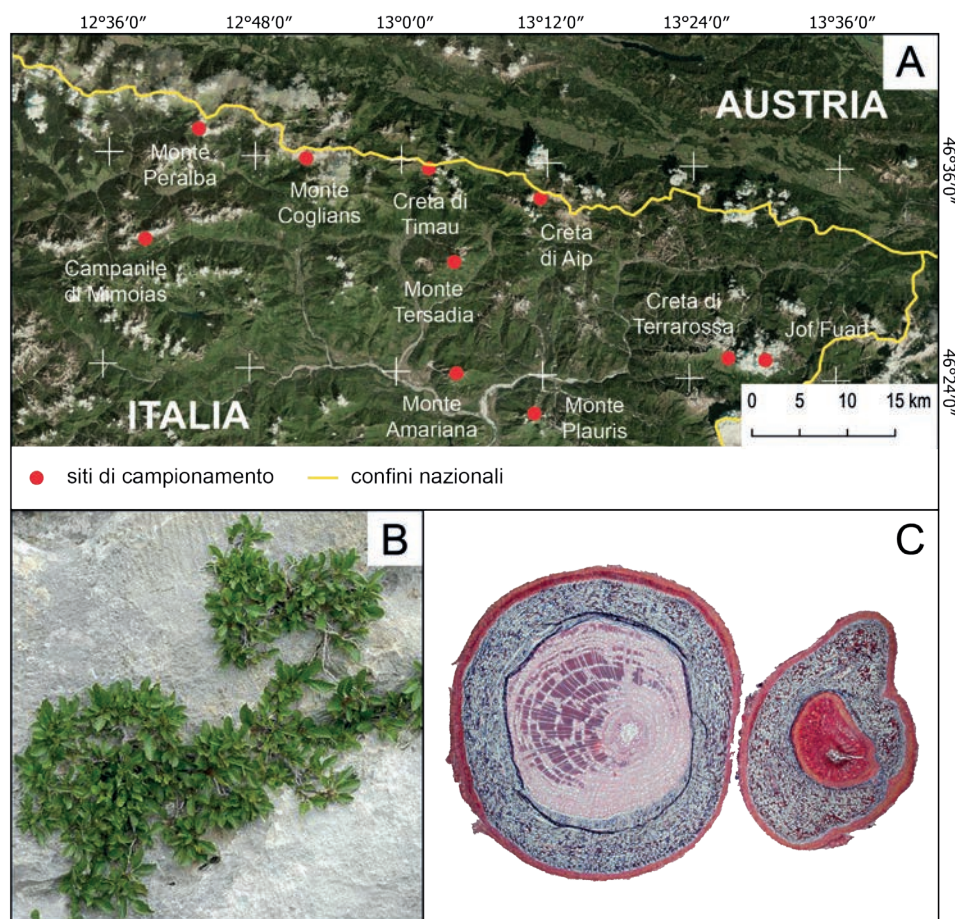


Fig. 1 - A. Punti di campionamento; B. *Atadinus pumilus*, Creta di Timau; C. Preparato istologico di una sezione trasversale di *A. pumilus*.
- A. Sampling points; B. *Atadinus pumilus*, Creta di Timau; C. Stem cross-section of *A. pumilus*

Dati climatici

I dati meteo-climatici utilizzati nelle analisi sono quelli prodotti e distribuiti dal progetto ERA5 sviluppati dal progetto europeo Copernicus (HERSBACH 2016). Sono stati selezionati e raccolti dati di precipitazione cumulata annuale, precipitazione nevosa cumulata annuale e temperatura media annuale relativa al periodo 1980-2022. I dati sono stati acquisiti utilizzando il pacchetto R “KrigR” (KUSCH & DAVY 2022) che permette prima di scaricare i dati climatici limitatamente all’area di studio e successivamente di migliorare la risoluzione spaziale del dato climatico, utilizzando l’informazione contenuta nel DEM a scala globale del GTMED2010 U.S. Geological Survey. In questo modo la risoluzione spaziale è aumentata da un valore pari a 30 km pixel⁻¹ per lato ad uno con risoluzione spaziale di circa 1 km pixel⁻¹.

I dati climatici evidenziano i cambiamenti avvenuti dal 1980 al 2022 nella zona delle Alpi del Friuli Venezia Giulia. Al fine di testare le relazioni tra i dati climatici e gli anni della specie sono stati utilizzati modelli lineari.

Le variabili considerate risultano essere tutte combinate significativamente nel periodo considerato. Nello specifico, la temperatura media annua è aumentata di

circa 2 °C negli ultimi 40 anni (coefficiente angolare 0.06, p -value <0.001), così come nel caso delle precipitazioni, che sono tuttavia aumentate con minore intensità (coefficiente angolare -0.01, p -value <0.001). Il trend delle precipitazioni nevose è invece in costante calo (coefficiente angolare -0.01, p -value <0.05).

Analisi statistiche

L’analisi statistica è stata effettuata utilizzando il software R (R CORE TEAM 2021). Al fine di testare la relazione tra lo spessore medio dell’anello e i dati climatici, altitudine, l’età della pianta e la ricchezza specifica sono stati impiegati modelli lineari misti calcolati separatamente per ogni incrocio tra variabile dipendente e indipendente, utilizzando come fattori random la zona geografica di campionamento e l’identificativo dell’individuo. Lo stesso approccio statistico è stato impiegato per valutare le relazioni tra età della pianta e dati climatici, altitudine e ricchezza specifica e la relazione tra ricchezza specifica e dati climatici e altitudine. Le assunzioni dei modelli sono state verificate utilizzando il test di Shapiro per la verifica della normalità e diagnostica visiva dei residui, per l’omoschedasticità. La soglia di significatività è stata stabilita ad un p -value pari o inferiore a 0.05.

Risultati

Relazioni tra età degli individui, accrescimento xilematico annuale di *Atadinus pumilus* e variabili climatiche

L'età media degli individui campionati è di 18 anni (numero di anelli di accrescimento), mentre l'età massima è 32 anni e la minima 3 anni. Lo spessore medio è di $230 \pm 127 \mu\text{m}$ con valore massimo pari a $560 \mu\text{m}$ e minimo di $89 \mu\text{m}$.

I risultati relativi allo spessore medio degli anelli di crescita sono riferiti ad una media di tutti gli anelli presenti nel singolo individuo. Lo spessore medio degli anelli è stato influenzato in maniera statisticamente significativa dall'età della pianta (numero di anelli) ($R^2=0.29$), temperatura media dell'aria ($R^2=0.38$) e dalle precipitazioni ($R^2=0.43$), ma non dalle precipitazioni nevose e dall'altitudine (Tab. 1). L'età degli individui campionati invece non è stata influenzata da nessuna delle variabili dipendenti considerate, anche se si osserva una relazione con la temperatura media vicina alla significatività (Tab. 1).

L'aumento della temperatura media ha comportato un incremento dello spessore medio degli anelli di crescita (Fig. 2A), mentre un calo dell'età media delle piante (Fig. 2D) ha determinato un calo dello spessore

medio degli anelli. L'aumento delle precipitazioni totali, così come dell'età cambiale, invece hanno indotto una diminuzione dello spessore medio degli anelli di crescita (Fig. 2B, C).

	Spessore medio degli anelli	Età della pianta
Temperatura media	8.5 **	-1.9
Precipitazione	-409.7 **	6.8
Precipitazione nevose	22.3	25.9
Altitudine	-0.0	0.0
Età della pianta	-7.2 *	n.a.
Ricchezza specifica	-9.255 *	0.594

Tab. 1 - Relazione tra lo spessore medio degli anelli di crescita (variabile dipendente) e le variabili climatiche, altitudine, età della pianta e ricchezza specifica (variabili indipendenti) e relazione tra l'età della pianta (variabile dipendente) e le variabili climatiche, altitudine e ricchezza specifica (variabili indipendenti). Sono riportati i valori del coefficiente angolare (pendenza) e p-value (* $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$); n.a. = non analizzato.

- Relationships between mean growth ring width (dependent variable) and the climate variables, elevation, plant age and species richness (independent variables) and relationships between plant age (dependent variable) and the climate variables, elevation and species richness (independent variables). Slope and p-values are reported (* $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$); n.a. = not analyzed.

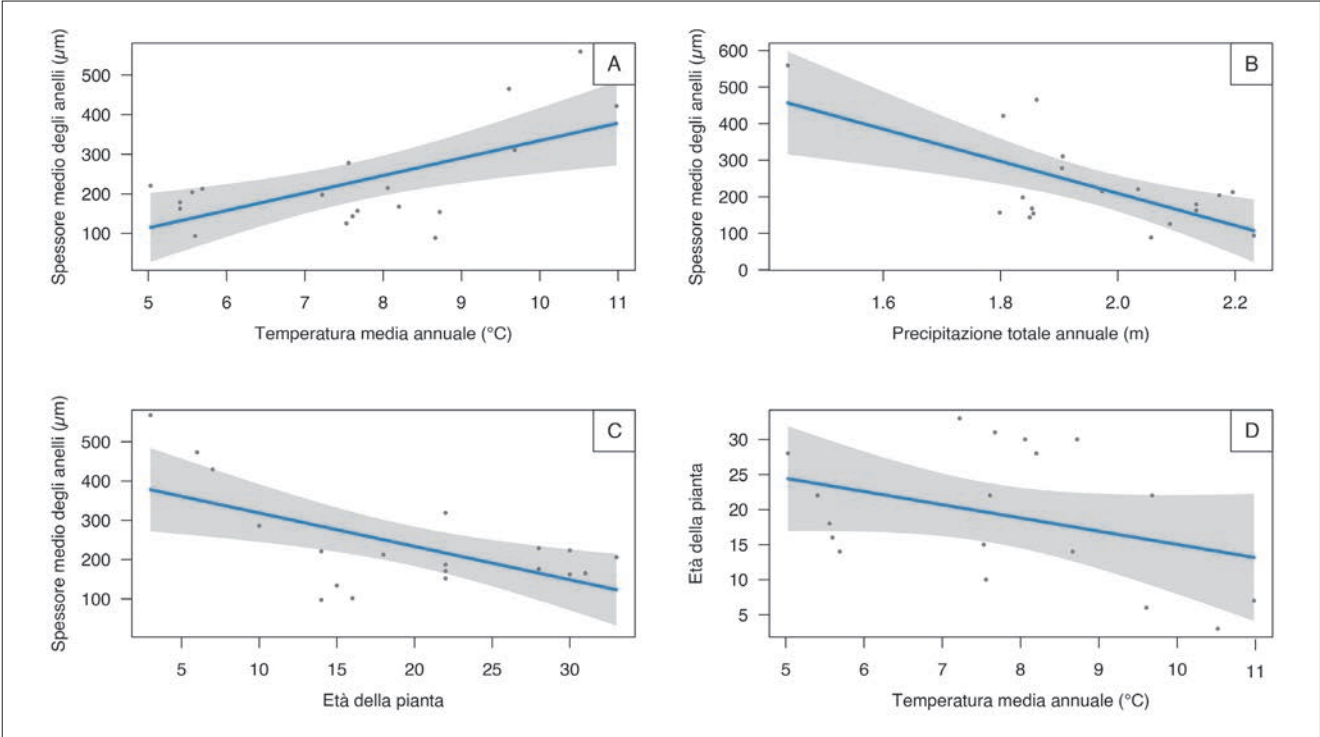


Fig. 2 - A. Incremento dello spessore medio degli anelli con l'aumento della temperatura media; B. Decremento dello spessore medio degli anelli di crescita, causato dall'aumento delle precipitazioni; C. Decremento dello spessore medio degli anelli di crescita, dovuto all'aumento dell'età del campione; D. Decremento dell'età dei campioni con l'aumento delle temperature.

- A. Increase in mean ring width with increasing annual mean temperature; B. Decrease in mean ring width due to increasing precipitation; C. Decrease in mean ring width due to increasing plant age; D. Decrease in plant age with increasing temperature.

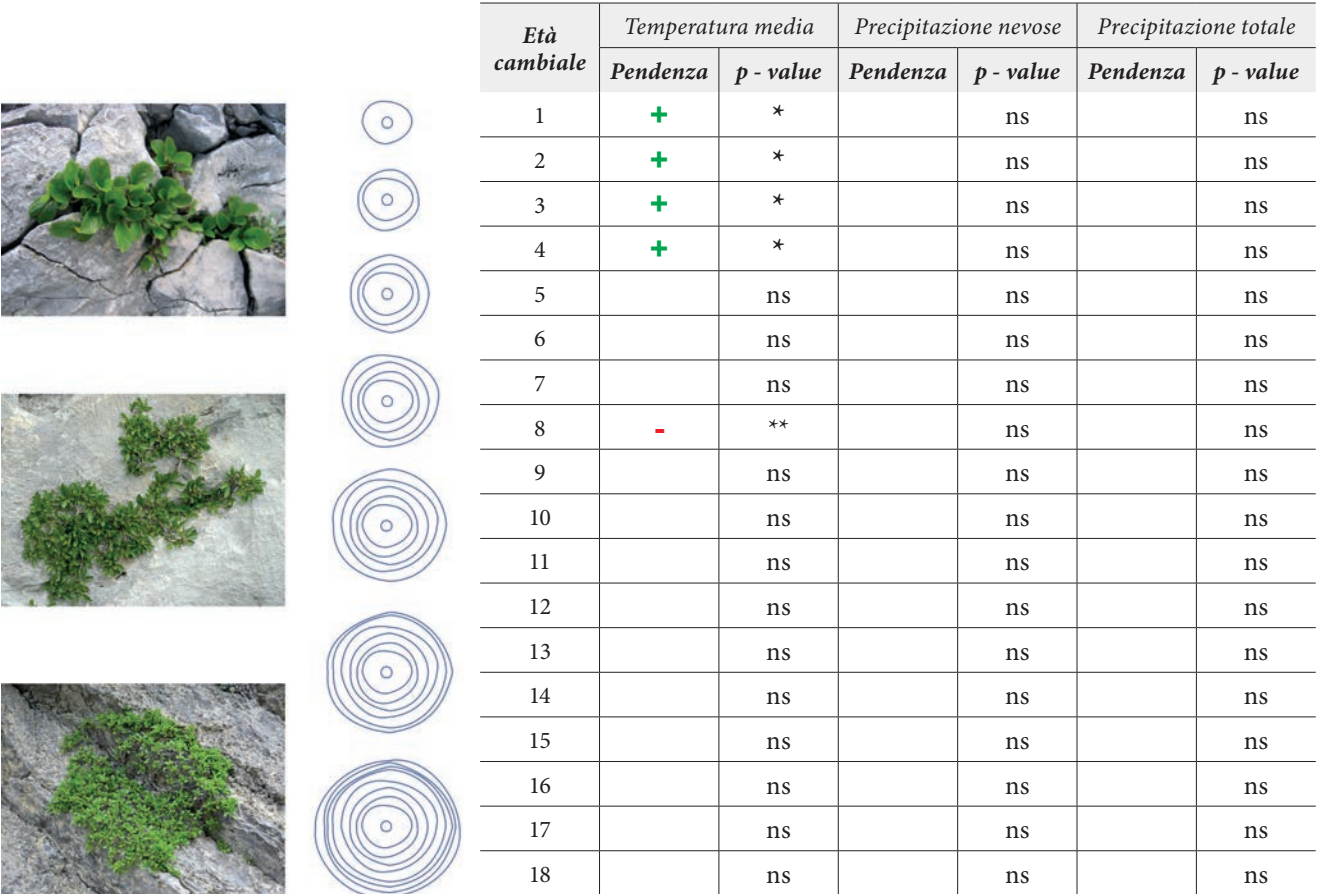


Fig. 3 - Relazione tra spessore degli anelli a diversa età cambiale e parametri climatici. * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$; ns, non significativo.
- Relationship between ring width at different cambial ages and climate variables. * $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$; ns, not significant.

Come si può notare dalla Figura 3, l'effetto della temperatura media sullo spessore degli anelli è variato in funzione dell'età cambiale dell'anello di accrescimento considerata. Infatti, solamente in piante giovani (nei primi quattro anni di crescita della pianta) vi è una relazione statisticamente significativa, mentre nelle piante più mature (dal quinto anno in poi) non viene riscontrata alcuna relazione significativa. Per quanto riguarda le precipitazioni nevose e le precipitazioni

totali, non si evidenzia alcuna influenza significativa sullo spessore dell'anello, indipendentemente da qualsiasi età cambiale considerata. Nella Figura 3 sono stati riportati solamente dati riferiti a piante fino a 18 anni che rappresenta l'età media dei campioni.

Relazioni comunità vegetale ospitante, clima e crescita *Atadinus pumilus*

Le specie più frequenti rilevati nelle aree di campionamento di *Atadinus pumilus* sono state *Primula auricola* (50% dei rilievi), *Sesleria caerulea* (45%), *Globularia cordifolia* (40%). Sono state inoltre rilevate sia specie caratteristiche dell'associazione *Spiraeo-Potentilletum caulescentis* Poldini 1969 quali *Spiraea decumbens* s.l. e *Potentilla caulescens*.

La ricchezza specifica (numero di specie) delle comunità casmofitiche che ospitano *A. pumilus* è influenzata in maniera significativa dalla temperatura media dell'aria ($R^2=0.51$), mentre gli altri fattori climatici contribuiscono in maniera non significativa (Tab. 2). In particolare, all'aumento della temperatura media corrisponde una diminuzione del numero di specie presenti (Fig. 4B).

	Ricchezza specifica
Precipitazione nevose	22.278
Temperatura media	-1.449*
Precipitazioni	8.959
Altitudine	0

Tab. 2 - Relazione tra la ricchezza specifica (variabile dipendente) e i parametri climatici e altitudine (variabili indipendenti). Sono riportati i valori del coefficiente angolare (pendenza) e p-value (* $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$).
- Relationships between species richness (dependent variable) and climate and elevation parameters (independent variables). The values of the coefficient (slope) and p-value are reported (* $p < 0.05$; ** $p < 0.01$; *** $p < 0.001$).

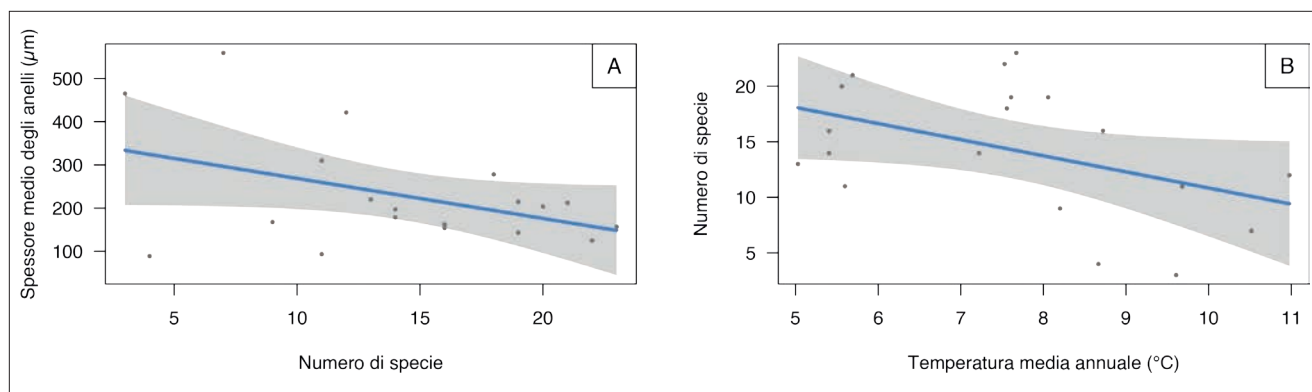


Fig. 4 - **A.** Decremento dello spessore medio degli anelli all'aumentare del numero di specie presenti; **B.** Decremento del numero di specie con l'aumentare della temperatura.

- **A.** Decrease in mean ring width as the number of species increases; **B.** Decrease in number of species as the temperature increases.

L'aumento della diversità floristica presente in prossimità dell'*A. pumilus* (3 m²), induce una diminuzione statisticamente significativa dell'accrescimento radiale ($R^2=0.53$), mentre non ha effetto sull'età delle piante (Fig. 4A e Tab. 1).

Discussione e Conclusioni

Il cambiamento climatico rilevato denota un aumento delle temperature medie e delle precipitazioni negli ultimi decenni, con conseguente diminuzione delle precipitazioni nevose. I dati ottenuti sono in accordo con i numerosi report climatici riguardanti la regione Friuli Venezia Giulia, in cui l'aumento delle temperature medie sulle Alpi è stato stimato essere di circa 2 °C (ARPA FVG, 2023).

Lo studio ha evidenziato una significativa influenza di temperatura e precipitazioni sull'accrescimento di *Atadinus pumilus*, che sembra al contrario non influenzato dal cambiamento di altitudine. I fattori climatici considerati sono riferibili a condizioni mesoclimatiche, aventi risoluzione spaziale riferita all'intera vallata in cui è stato effettuato il rilevamento mentre l'altitudine rappresenta, assieme all'esposizione, un fattore influenzante le condizioni micro- e topo-climatiche locali. In questa visione, i nostri risultati sembrano evidenziare una maggior influenza delle variabili climatiche dell'area rispetto a quelle specifiche del sito. Inoltre, i risultati mostrano che l'effetto del clima sugli individui è significativo soprattutto durante i primi anni di crescita, nei quali le giovani piante hanno probabilmente una minor capacità omeostatica e sono più vulnerabili ai fattori ambientali. Considerando questi risultati, si potrebbe ipotizzare come l'incremento delle temperature, a causa del cambiamento climatico, possa portare a un maggiore accrescimento delle specie, indipendentemente dal variare della quota, ovvero delle caratteristiche climatiche locali.

Le relazioni tra lo spessore medio degli anelli di crescita e le variabili climatiche evidenziano come con

l'aumento delle temperature la specie cresca maggiormente. Questo comportamento si spiega considerando che, con temperature medie annue più miti, la pianta è meno soggetta a stress da basse temperature e congelamento, e di conseguenza ha maggiori risorse a disposizione. Inoltre, temperature più elevate inducono un prolungamento del periodo vegetativo, il quale si riflette in una maggiore crescita della pianta (ZONA, 2022).

Questo andamento è ancor più influente nel caso di specie rupicole che sono poco influenzate dalla copertura nevosa e quindi esposte tutto l'anno alle variazioni della temperatura dell'aria. È stato ipotizzato che l'incremento della CO₂ in atmosfera abbia contribuito all'incremento della biomassa vegetale negli ultimi decenni, perché la fotosintesi risulterebbe stimolata, con maggiore effetto ad alta quota dove la pressione atmosferica diminuisce. Diversi contributi sottolineano però l'influenza di ulteriori fattori, come la diminuzione dei nutrienti e la scarsità idrica, che nel tempo porterebbero ad un effetto opposto alla stimolazione indotta dall'aumento della CO₂ (MASCHLER et al. 2022). Inoltre, la correlazione positiva tra aumento del diossido di carbonio in atmosfera e l'aumento della temperatura, rende complessa la discriminazione di quale sia il principale driver dell'incremento della biomassa vegetale. Ulteriormente la limitata risoluzione spaziale dei dataset globali di concentrazione di CO₂ in atmosfera, non permette di apprezzare le eventuali differenze tra i diversi siti di campionamento geograficamente vicini, diversamente dai dati climatici aventi maggior risoluzione spaziale. L'aumento delle precipitazioni invece provoca una diminuzione dello spessore medio degli anelli che può essere correlato al fatto che *A. pumilus* si sviluppa ad altitudini elevate, dove l'aumento delle precipitazioni è spesso associato ad una diminuzione della quantità di luce a disposizione (eliofania) anche durante il periodo di crescita e a maggiori precipitazioni nevose. L'insieme dei due fattori implica che non si verifichino condizioni ottimali di sviluppo per la

pianta, con conseguente diminuzione del suo accrescimento annuale. Numerosi studi hanno dimostrato che il cambiamento climatico può avere conseguenze anche sulla fenologia delle specie; in particolare, è stato osservato come in un clima mite le variazioni siano più ampie nelle fenofasi riproduttive, rispetto a quelle vegetative. Inoltre, la senescenza fogliare ritardata porta ad un allungamento della stagione vegetativa di circa il 3%. L'insieme dell'avanzamento della stagione riproduttiva e l'allungamento della stagione di crescita possono comportare conseguenze notevoli a livello delle interazioni trofiche e funzionali dell'ecosistema (COLLINS et al. 2021)

È noto che lo spessore medio degli anelli di crescita diminuisce con l'aumentare dell'età cambiale. Infatti, durante i primi anni di sviluppo la pianta si accresce maggiormente, mentre con l'avanzare dell'età lo spessore degli anelli tende a regolarizzarsi (SELLIN 1991). I risultati di questo studio evidenziano che i fattori climatici, in particolare la temperatura media, influenzano significativamente lo spessore degli anelli di crescita, principalmente nei primi quattro anni di vita della pianta. Ciò è legato probabilmente ad una maggiore sensibilità degli individui giovani ai cambiamenti ambientali. In questo caso, nei primi anni gli individui reagiscono in maniera positiva (elevato accrescimento) o negativa (basso accrescimento) a temperature medie annue maggiori o minori, probabilmente in relazione con i processi innescati dai cambiamenti climatici già discussi. Con l'avanzare degli anni invece la pianta acquisisce una stabilità, aumentando la propria resistenza e capacità omeostatica, riuscendo quindi a gestire i diversi andamenti climatici, senza esserne influenzata in maniera significativa nella crescita.

La variazione della quota induce la modificazione anche di altri fattori ambientali, quali la pressione, che diminuisce con l'aumento dell'altitudine, e la radiazione solare, la quale subisce un incremento e la copertura nevosa, che aumenta con l'incremento di quota. Dai risultati ottenuti si è visto come l'altitudine non influenzi l'accrescimento dei campioni, probabilmente a causa di una risoluzione spaziale insufficiente per evidenziare differenze significative. Un'ulteriore ipotesi può essere legata ai luoghi di accrescimento delle specie casmofite: nello specifico, *A. pumilus* si sviluppa su pareti rocciose, spesso scoscese, dove la copertura nevosa non permane a lungo, comportando una scarsa influenza della neve, e di conseguenza della quota, sull'accrescimento. Studi effettuati su altre specie hanno invece evidenziato come l'aumento dell'altitudine provochi una diminuzione dello sviluppo, come nel caso del *Vaccinium myrtillus* (BOSCUCCI et al. 2018), probabilmente dovuta a una diversa allocazione delle risorse di carbonio nella pianta (CASOLO et al. 2020).

La diversità vegetale della microcomunità casmofitica indagata diminuisce all'aumentare della tempera-

tura media dell'aria. Le specie criofile, la cui ricchezza sulle rupi prealpine è probabilmente legata anche alla storia della flora glaciale e post-glaciale e pertanto favorite da climi più rigidi, sembrano essere sfavorite da questo aumento di temperatura che invece favorisce solo alcune specie capaci di resistere anche a temperature maggiori, come *A. pumilus*, che aumentando la crescita, sono in grado di espandere la loro copertura. Questo è confermato indirettamente anche dai risultati che legano la biodiversità alla crescita della specie studiata. L'aumento della diversità vegetale nelle aree limitrofe alle specie campionate, infatti, comporta un decremento della crescita di *A. pumilus*. La probabile causa è legata all'aumento della competizione per le risorse, come luce e nutrienti, poiché *A. pumilus* si sviluppa in ambienti rocciosi, dove le sostanze a disposizione rappresentano un fattore limitante. La competizione per le risorse nelle fessure delle rocce, in cui si accumula la poca sostanza organica, diventa limitativa in presenza di altre specie capaci di intercettarle. Inoltre, la presenza di diverse specie porta ad un aumento dell'ombreggiamento che non facilita la crescita di *A. pumilus*, che ama luoghi soleggiati.

I risultati di questa ricerca suggeriscono che l'aumento della temperatura potrà cambiare drasticamente la composizione delle comunità vegetali delle rupi calcaree, ben adattate a climi estremi, provocando una crescita maggiore della vegetazione, un plausibile cambiamento dei rapporti tra le specie presenti, e variazioni della biodiversità.

Manoscritto pervenuto il 07.X.2024 e approvato il 13.X.2024

Bibliografia

- ARPA FVG 2023, «Segnali del clima in FVG».
- BARTOLUCCI F., PERUZZI L., GALASSO G., ALBANO A., ALESSANDRINI A., ARDENGHI N. M. G., ASTUTI G., BACCHETTA G., BALLELLI S., BANFI E., BARBERIS G., BERNARDO L., BOUVET D., BOVIO M., CECCHI L., DI PIETRO R., DOMINA G., FASCETTI S., FENU G., ... CONTI F. 2018, *An updated checklist of the vascular flora native to Italy*. Plant Biosystems - An International Journal Dealing with All Aspects of Plant Biology, 152 (2), pp. 179–303.
- BJORKMAN A. D., MYERS-SMITH I. H., ELMENDORF S. C., NORMAND S., RUEGER N., BECK P. S. A., BLACH-OVERGAARD A., BLOK D., CORNELISSEN J. H. C., FORBES B. C., GEORGES D., GOETZ S. J., GUAY K. C., HENRY G. H. R., HILLERISLAMBERS J., HOLLISTER R. D., KARGER D. N., KATTGE J., MANNING P., ... WEIHER E. 2018, *Plant functional trait change across a warming tundra biome*. Nature, 562 (7725), pp. 57–62.
- BOSCUCCI F., CASOLO V., BERALDO P., BRAIDOT E., ZANCANI M., RIXEN C. 2018, *Shrub growth and plant diversity along an elevation gradient: Evidence of indirect effects of climate on alpine ecosystems*. Plos One, 13(4), e0196653.
- CARLSON B. Z., CORONA M. C., DENTANT C., BONET R., THUILLER W., CHOLER P. 2017, *Observed long-term greening of alpine vegetation-a case study in the French Alps*. Envi-

- ronmental Research Letters, 12(11), 114006.
- CASOLO V., BRAIDOT E., PETRUSSA E., ZANCANI M., VIANELLO A., BOSCUCCI F. (2020). *Relationships between population traits, nonstructural carbohydrates, and elevation in alpine stands of Vaccinium myrtillus*. American Journal of Botany, 107(4), pp. 639–649.
- COLLINS C. G., ELMENDORF S. C., HOLLISTER R. D., HENRY G. H. R., CLARK K., BJORKMAN A. D., MYERS-SMITH I. H., PREVÉY J. S., ASHTON I. W., ASSMANN J. J., ALATALO J. M., CARBOGNANI M., CHISHOLM C., COOPER E. J., FORRESTER C., JÓNSDÓTTIR I. S., KLANDERUD K., KOPP C. W., LIVENSPERGER C., ... SUDING K. N. 2021, *Experimental warming differentially affects vegetative and reproductive phenology of tundra plants*. Nature Communications, 12 (1), Article 1.
- DE TOMA A., CARBONI M., BAZZICHETTO M., MALAVASI M., & CUTINI M. 2022, *Dynamics of dwarf shrubs in Mediterranean high-mountain ecosystems*. Journal of Vegetation Science, 33(4), e13143.
- ELKIN C., GUTIERREZ A. G., LEUZINGER S., MANUSCH C., TEMPERLI C., RASCHE L., & BUGMANN H. 2013, *A 2 degrees C warmer world is not safe for ecosystem services in the European Alps*. Global Change Biology, 19(6), 1827–1840.
- FARRER E. C., ASHTON I. W., SPASOJEVIC M. J., FU S., GONZALEZ D. J. X., SUDING K. N. 2015, *Indirect effects of global change accumulate to alter plant diversity but not ecosystem function in alpine tundra*. Journal Of Ecology, 103(2), pp. 351–360.
- FILIPPA G., CREMONESE E., GALVAGNO M., ISABELLON M., BAYLE A., CHOLER P., CARLSON B. Z., GABELLANI S., DI CELLA U. M., & MIGLIAVACCA M. 2019, *Climatic Drivers of Greening Trends in the Alps*. Remote Sensing, 11 (21), 2527.
- HERSBACH H., BELL B., BERRISFORD P., HIRAHARA S., HORÁNYI A., MUÑOZ-SABATER J., NICOLAS J., PEUBEY C., RADU R., SCHEPERS D., SIMMONS A., SOCI C., ABDALLA S., ABELLAN X., BALSAMO G., BECHTOLD P., BIAVATI G., BIDLOT J., BONAVITA M., DE CHIARA G., DAHLGREN P., DEE D., DIAMANTAKIS M., DRAGANI R., FLEMMING J., FORBES R., FUENTES M., GEER A., HAIMBERGER L., HEALY S., HOGAN R. J., HÓLM E., JANISKOVÁ M., KEELEY S., LALOYLAUX P., LOPEZ P., LUPU C., RADNOTI G., ROSNAY P., ROZUM I., VAMBORG F., VILLAUME S., THÉPAUT J.N. 2020, *The ERA5 global reanalysis*. Q.J.R. Meteorol. Soc., 146, pp. 1999–2049.
- KUSCH E. & DAVY R. 2022, *KrigR - a tool for downloading and statistically downscaling climate reanalysis data*. Environ. Res. Lett. 17, 024005.
- MARTINI F., BERTANI G., BOSCUCCI F., BRUNA A., DANELUTTO A., PAVAN R. & PERUZOVICH C. 2023, *Flora del Friuli Venezia Giulia*. Forum Editrice, 1008 p.
- MASCHLER J., BIALIC-MURPHY L., WAN J., ANDRESEN L. C., ZOHNER C. M., REICH P. B., LÜSCHER A., SCHNEIDER M. K., MÜLLER C., MOSER G., DUKES J. S., SCHMIDT I. K., BILTON M. C., ZHU K., & CROWTHER T. W. 2022, *Links across ecological scales: Plant biomass responses to elevated CO₂*. Global Change Biology, 28(21), pp. 6115–6134.
- MYERS-SMITH I. H., ELMENDORF S. C., BECK P. S. A., WILMKING M., HALLINGER M., BLOK D., TAPE K. D., RAYBACK S. A., MACIAS-FAURIA M., FORBES B. C., SPEED J. D. M., BOULANGER-LAPOINTE N., RIXEN C., LEVESQUE E., SCHMIDT N. M., BAITTINGER C., TRANT A. J., HERMANUTZ L., COLLIER L. S., ... VELLEND M. 2015, *Climate sensitivity of shrub growth across the tundra biome*. Nature Climate Change, 5(9), 887–+.
- MYERS-SMITH I. H., FORBES B. C., WILMKING M., HALLINGER M., LANTZ T., BLOK D., TAPE K. D., MACIAS-FAURIA M., SASS-KLAASSEN U., LEVESQUE E., BOUDREAU S., ROPARS P., HERMANUTZ L., TRANT A., COLLIER L. S., WEIJERS S., ROZEMA J., RAYBACK S. A., SCHMIDT N. M., ... HIK D. S. 2011, *Shrub expansion in tundra ecosystems: Dynamics, impacts and research priorities*. Environmental Research Letters, 6(4), 045509.
- MYERS-SMITH I. H., KERBY J. T., PHOENIX G. K., BJERKE J. W., EPSTEIN H. E., ASSMANN J. J., JOHN C., ANDREU-HAYLES L., ANGERS-BLONDIN S., BECK P. S. A., BERNER L. T., BHATT U. S., BJORKMAN A. D., BLOK D., BRYN A., CHRISTIANSEN C. T., CORNELISSEN J. H. C., CUNLIFFE A. M., ELMENDORF S. C., ... WIPF S. 2020, *Complexity revealed in the greening of the Arctic*. Nature Climate Change, 10 (2), pp. 106–117.
- NIJS I., KOCKELBERGH F., HEUER M., BEYENS L., TRAPPENIERS K., & IMPENS I. 2000, *Climate-warming simulation in tundra: Enhanced precision and repeatability with an improved infrared-heating device*. Arctic Antarctic and Alpine Research, 32(3), pp. 346–350.
- PIAO S., ZHANG X., WANG T., LIANG E., WANG S., ZHU J., NIU B. 2019, *Responses and feedback of the Tibetan Plateau's alpine ecosystem to climate change*. Chinese Science Bulletin-Chinese, 64(27), pp. 2842–2855.
- PIGNATTI S. 2019, *Flora d'Italia*, Seconda edizione, Milano, Edagricole, 4584 p.
- POLDINI L., ORIOLO G., VIDALI M., TOMASELLA M., STOCH F., OREL G. 2006, *Manuale degli habitat del Friuli Venezia Giulia. Strumento a supporto della valutazione d'impatto ambientale (VIA), ambientale strategica (VAS) e d'incidenza ecologica (VIEc)*, Trieste, Regione Autonoma Friuli Venezia Giulia – Direz. Centrale ambiente e lavori pubblici – Servizio Valutazione Impatto Ambientale, Univ. Studi Trieste – Dipart. Biologia.
- R CORE TEAM 2021, *R: A language and environment for statistical computing*, Vienna, R Foundation for Statistical Computing.
- SCHMIDT N. M., BAITTINGER C., KOLLMANN J., FORCHHAMMER M. C. 2010, *Consistent Dendrochronological Response of the Dioecious Salix arctica to Variation in Local Snow Precipitation across Gender and Vegetation Types*. Arctic Antarctic and Alpine Research, 42 (4), pp. 471–475.
- SCHWEINGRUBER F.H. & POSCHLOD P. 2005, *Growth rings in herbs and shrubs: life span, age determination and stem anatomy*. Forest Snow and Landscape Research, 79 (3) (2005), pp. 195–415.
- SELLIN A. 1991, *Variation in sapwood thickness of Picea abies in Estonia depending on the tree age*. Scandinavian Journal of Forest Research, 6 (1–4), pp. 463–469.
- SMIAITEK G., KUNSTMANN H., KNOCH R., MARX A. 2009, *Precipitation and temperature statistics in high-resolution regional climate models: Evaluation for the European Alps*. Journal Of Geophysical Research-Atmospheres, 114, D19107.
- THEURILLAT J. P. & GUISAN A. 2001, *Potential impact of climate change on vegetation in the European Alps: A review*. Climatic Change, 50 (1–2), pp. 77–109.
- VITASSE Y., URSENBACHER S., KLEIN G., BOHNENSTENGEL T., CHITTARO Y., DELESTRADE A., MONNERAT C., REBETEZ M., RIXEN C., STREBEL N., SCHMIDT B. R., WIPF S., WOHLGEMUTH T., YOCOZ N. G., LENOIR J. 2021, *Phenological and elevational shifts of plants, animals and fungi under climate change in the European Alps*. Biological Reviews, 96 (5), pp. 1816–1835.

WOOKEY P. A., AERTS R., BARDGETT R. D., BAPTIST F., BRATHEN K. A., CORNELISSEN J. H. C., GOUGH L., HARTLEY I. P., HOPKINS D. W., LAVOREL S., SHAVER G. R. 2009, *Ecosystem feedbacks and cascade processes: Understanding their role in the responses of Arctic and alpine ecosystems to environmental change*. Global Change Biology, 15 (5), pp. 1153-1172.

ZONA D. 2022, March 29). *Arctic greening won't save the climate – here's why*. The Conversation. <http://theconversation.com/arctic-greening-wont-save-the-climate-heres-why-180205>

Authors' address - Indirizzo dell'autore

- Arianna DEL PINO

- Marco ZANCANI

Dipartimento di Scienze Agroalimentari, Ambientali ed Animali,
Università di Udine, via delle Scienze 206, 33100 UDINE

- Francesco BOSCUCCI

- Marco VUERICH*

Dipartimento di Scienze Agroalimentari, Ambientali ed Animali, Università di Udine, via delle Scienze 206, 33100 UDINE
National Biodiversity Future Center, Palermo, Italy

* Contatto: marco.vuerich@uniud.it