

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA  
DIPARTIMENTO TERRITORIO E SISTEMI AGRO-FORESTALI

Corso di Laurea in Scienze Forestali e Ambientali

Tesi di Laurea

RISPOSTA DELLA FLORA ALPINA D'ALTA QUOTA  
AI CAMBIAMENTI CLIMATICI NELLA PROVINCIA DI TRENTO

Relatore:

*Prof. Lorenzo Marini*

Correlatore:

*Dott. Alessio Bertolli*

Correlatrice:

*Dott.ssa Costanza Geppert*

Laureanda:

*Sofia Baldessari*

Matricola n. 2024084

ANNO ACCADEMICO 2021 – 2022



## Sommario

1	RIASSUNTO .....	4
2	ABSTRACT .....	5
3	INTRODUZIONE.....	6
3.1	Cambiamenti climatici .....	6
3.1.1	Effetti dei cambiamenti climatici in montagna .....	9
3.2	La flora subalpina e alpina .....	12
3.3	Fattori limitanti la crescita delle specie vegetali in alta quota .....	20
3.4	Obiettivo della tesi.....	25
4	MATERIALI E METODI.....	27
4.1	Area di studio .....	27
4.2	Disegno di campionamento.....	33
4.3	Tratti funzionali.....	34
4.4	Analisi statistiche .....	37
5	RISULTATI.....	39
5.1	Descrizione dei tratti funzionali delle comunità di flora alpina d'alta quota.....	39
5.2	Il margine freddo della distribuzione della flora alpina d'alta quota .....	61
6	DISCUSSIONE .....	68
7	CONCLUSIONI .....	75
8	BIBLIOGRAFIA .....	78
9	ALLEGATI .....	I
9.1	Lista delle specie rilevate .....	I

## 1 RIASSUNTO

Le regioni alpine sono particolarmente sensibili ai cambiamenti climatici e, negli ultimi decenni, hanno registrato impatti marcati dovuti al surriscaldamento. Una delle conseguenze del surriscaldamento è il cambiamento della composizione delle comunità di piante alpine d'alta quota.

L'obiettivo di questo lavoro di tesi è la caratterizzazione della flora alpina attraverso i tratti funzionali e la formulazione di previsioni riguardanti l'evoluzione futura della composizione della vegetazione alpina in seguito ai cambiamenti climatici. Grazie al gradiente altitudinale, si rilevano variazioni nelle condizioni ambientali su distanze relativamente brevi, rendendo le vette alpine ottime aree di studio a cielo aperto degli effetti del cambiamento climatico.

Nel corso dell'estate 2022 sono state selezionate e visitate 13 cime di quota superiore ai 2600 m s.l.m. in Provincia di Trento; il campionamento si è concentrato negli ultimi 200 m sottostanti la cima ed è consistito in un rilievo completo delle specie presenti ogni 50m (per un totale di 4 transetti per cima) e un rilievo della flora di vetta (raggio 20-25m).

Tramite i database 'Bioflor', 'Flora del Monte Baldo' e 'Flora indicativa' le 253 specie individuate sono state descritte tramite i seguenti tratti funzionali: altezza media, massa dei semi, forma biologica, sistema di riproduzione, di disseminazione e di propagazione vegetativa, durata e inizio fioritura, vettori di polline caratteristici, strategia di competizione, indice di dominanza, di influenza antropica e di Landolt. Sono state quindi condotte le analisi statistiche tramite i software Excel e R.

In base ai risultati ottenuti si ipotizza che lo scioglimento precoce della neve e una stagione vegetativa più lunga faciliteranno probabilmente l'ascesa di specie generaliste, caratterizzate da dimensioni maggiori, ciclo vegetativo più lungo e con tipi di disseminazione e dispersione alternativi al vento come l'entomocoria. Inoltre, ci si aspetta una maggiore importanza della strategia competitiva rispetto al ruderale e stress-tollerante. In generale, le specie con più alti indici termofili e nitrofilici di Landolt e un più basso indice di umidità trarranno beneficio dalla diminuzione della disponibilità di acqua prevista che ne favorirà la risalita. Se attualmente non sono presenti specie esotiche nella fascia alpina superiore, in futuro queste saranno probabilmente favorite nella risalita dalle nuove condizioni ambientali meno rigide.

## 2 ABSTRACT

High elevation areas are usually less exposed to land use changes and human disturbance but even the remotest regions on Earth face drastic changes due to human-induced climate warming. It has already been proven that climate change increases the number of species at high elevations but not many studies have been carried out on the functional traits of the species. Considering species as a set of functional traits increases the chances of understanding the ecosystems functioning, plants composition and ecological processes and making future predictions.

In this master thesis, 13 alpine summits (elevation greater than 2600m) were sampled in the province of Trento. Using existing databases, the 253 species detected were described by ecological and morphological functional traits. Then, we run analyses using the altitude gradient as a proxy of the temperature increase. Early snow melting and a longer vegetative season will probably facilitate the ascent of more generalist species, characterized by higher seed heights and sizes, longer vegetative cycle and with other types of dissemination and dispersion in addition to the wind (e.g. entomochory for the ascent of insects). In addition, I expect that there will be a greater importance of competitive strategy than the ruderal and stress-tolerant that now prevail.

In general, species with higher Landolt thermophilic and nitrophilic indices and lower humidity index will benefit due to the decrease in expected water availability.

I did not find any exotic species in the sampled alpine summit, however, in the future, exotic species will probably be favoured by new, less stringent environmental conditions.

## 3 INTRODUZIONE

### 3.1 Cambiamenti climatici

La tematica dei cambiamenti climatici, nota fin dagli anni '70, è stata discussa per la prima volta in un summit mondiale solo in epoca recente, durante la Conferenza sull'Ambiente e sullo Sviluppo delle Nazioni Unite che si è tenuta a Rio de Janeiro nel 1992. Al giorno d'oggi l'aumento della temperatura sulla terra si attesta a 1,09°C rispetto al periodo 1850-1900 ed è atteso un successivo incremento pari a 0,4-0,9°C durante il corso del XXI secolo a meno che non si verifichino nei prossimi decenni profonde riduzioni delle emissioni di CO<sub>2</sub> e di altri gas serra (IPCC, 2020).

Nonostante siano disponibili informazioni scientifiche indispensabili alla comprensione dei processi coinvolti nei cambiamenti climatici, la complessità del sistema e delle interazioni tra i fattori rappresenta un limite nella creazione di modelli climatici, soprattutto quando l'obiettivo è la previsione di impatto a scala locale (Gobies A. et al, 2014). Ciononostante, gli esperti concordano nel predire conseguenze drammatiche per la biodiversità (Bellard, C. et al, 2012).

Gli ecosistemi montani rappresentano aree uniche per l'analisi dei cambiamenti climatici e i loro impatti per due motivi. Per prima cosa perché il clima cambia velocemente con l'altitudine in una breve distanza e, inoltre, perché data la complessa topografia negli ambienti alpini, le montagne mostrano un'elevatissima biodiversità (Gobies A. et al, 2014; L. Armani L. 2020).

#### **Temperatura**

I dati mostrano che il clima della provincia di Trento risponde in modo rapido ai cambiamenti climatici globali: l'analisi della serie storica dal 1850 al 2018 ha evidenziato un progressivo aumento della temperatura media intensificatosi negli ultimi 40 anni, con un tasso più elevato rispetto a quanto osservato a livello globale.

L'aumento di temperatura media annua rispetto al periodo pre-industriale 1850-1899 (periodo di riferimento per la climatologia) è di +1,8°C con contributi al riscaldamento in tutte le stagioni ma più marcato in estate (+2.4°C) (FMCR, 2022; FMACH, 2017).

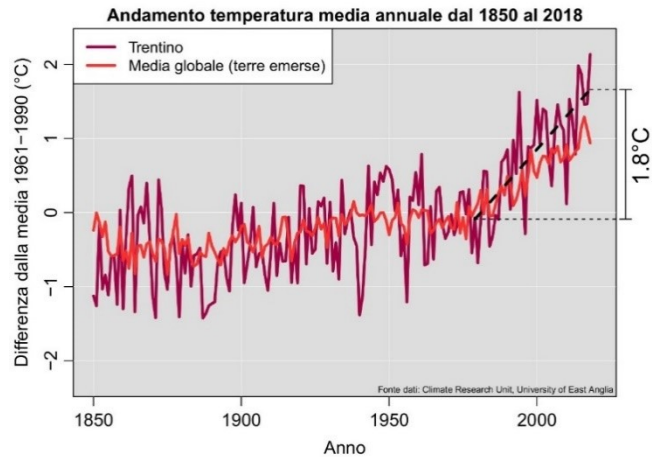


Figura 3.1: Confronto dell'andamento della temperatura media annuale (1850-2018) a livello globale e in Trentino. Fonte: FMCR

In queste aree le giornate con temperature estremamente elevate sono 3 volte più frequenti, le ondate di calore sono aumentate nel numero e nell'intensità, evidenziando un'accelerazione negli ultimi trent'anni ed estremi negli ultimi 10 anni (valori record sono stati registrati in particolare nel 2015, 2018 e 2019) (APPA,2020).

Nonostante gli episodi freddi siano diminuiti in modo speculare, il rischio di gelata non è diminuito poiché la vegetazione ha anticipato sensibilmente la fioritura.

## Precipitazioni

Il regime delle precipitazioni (quantificabili in poco più di 1000mm/anno) è caratterizzato da una certa variabilità interannuale, non mostrando trend significativi negli ultimi 500 anni; tuttavia, nell'ultimo secolo nelle Alpi meridionali si è osservata una tendenza alla diminuzione delle precipitazioni che corrisponde ad un -10% (115 mm/secolo) rispetto al periodo di riferimento 1901-2000.

Nel corso degli ultimi 50 anni si è osservato inoltre un aumento degli eventi estremi, accompagnato da una più recente maggior frequenza di periodi siccitosi invernali.

Per quanto riguarda le precipitazioni nevose si osserva una tendenza all'innalzamento della quota limite corrispondente a circa 150m per ogni grado Celsius di riscaldamento (Gobiet A. et al, 2014).

In quota, pur registrando una maggior variabilità degli ultimi 10 anni, non si evidenzia un segnale significativo di trend su ampia scala, in coerenza con l'andamento delle precipitazioni invernali generale.

Seppure nella valutazione degli andamenti delle nevicate vadano considerati diversi fattori da cui essi dipendono quali temperatura, vento, intensità di precipitazione e orografia della località in cui viene eseguita l'osservazione, in tutte le località è possibile osservare come la stagione del 2013-2014 sia stata quella con le maggiori nevicate, seguita dal 2008-2009, mentre il minor apporto è stato misurato nella stagione 2016-2017 (fino al 2020) (APPA, 2020).

Gli apporti di neve fresca così come il numero dei giorni nevosi, pur mostrando irregolarità, evidenziano una tendenza ad un calo piuttosto marcato dei valori stagionali: nell'arco degli ultimi 60 anni gli accumuli nevosi medi si sono dimezzati, passando da 39,5 cm a 20,3 cm stagionali.

Per quanto riguarda il numero di giorni con permanenza della neve al suolo, i trend, a tutte le quote mostrano un calo considerevole, variabile in base all'esposizione tra 1 e 2,5 giorni/stagione.

La variabilità interannuale della durata del manto nevoso svolge un ruolo rilevante nel ciclo dei nutrienti e, quando accoppiato con la fenologia della vegetazione, è stato dimostrato influenzi le dinamiche delle popolazioni animali (Rogora M. et al, 2018).



### 3.1.1 Effetti dei cambiamenti climatici in montagna

#### **Effetti dei cambiamenti climatici sui ghiacciai**

Tra gli effetti più evidenti del riscaldamento c'è il progressivo ritiro dei ghiacciai in corso ormai fin dalla seconda metà del 1800, alla fine dell'ultima importante fase di avanzata dei ghiacciai nota come "Piccola Età Glaciale" (PEG).

La somma delle estensioni dei ghiacciai trentini nel 2015 corrispondeva a 32km<sup>2</sup>, ovvero il 28% di quella presente nel massimo della PEG (circa 123 km<sup>2</sup>). Fino agli anni '60 la riduzione media della superficie glaciale era inferiore allo 0,5% annuo, dopodiché è aumentata esponenzialmente fino a stabilizzarsi sugli attuali valori di poco inferiori al 2% annuo (APPA, 2020).

La quota del fronte dei ghiacciai, localizzata nel massimo della PEG in media attorno ai 2.550m, si è innalzata fino a circa 2.800m, oltrepassando i 3100m per i ghiacciai di esposizione sud-est.

Il processo di ritiro ha comportato la frammentazione dei ghiacciai, che sono aumentati in numero pur divenendo sempre più ridotti e quindi più vulnerabili.

Rispetto alla superficie presente nel massimo della PEG, il gruppo montuoso che ha registrato la maggior contrazione di estensione è stato quello delle dolomiti di Brenta (-86,5%), seguito dagli altri due gruppi dolomitici delle Pale di San Martino (-82,1%) e della Marmolada (-74,9%). (FMACH, 2017).

Per il mantenimento dei corpi glaciali è necessaria neve e temperature estive miti per poterla conservare e permetterne la trasformazione in ghiaccio, processo che richiede dai 3 ai 5 anni.

L'estate 2022, oltre ad essere estremamente siccitosa, è stata la stagione più calda che l'Europa abbia registrato dall'inizio dell'800; il Careser ad esempio ha sperimentato un calo di superficie media di 4m (maggiore rispetto al 2003) mentre il ghiacciaio de la Mare è arretrato di 1,1 km (su 3km totali).

#### **Effetti dei cambiamenti climatici sulla biodiversità**

Le aree alpine sono tra le zone a più elevato rischio di perdita di biodiversità e ad oggi hanno subito gli effetti più evidenti. L'aumento di temperatura ha importanti impatti sulla

biodiversità e sulla struttura delle comunità sia animali che vegetali: si verificano spostamenti altitudinali di specie, alterazione, contrazione e frammentazione di habitat, perdita di specie soprattutto di alta quota con invasione da parte di specie più adattabili provenienti da quote inferiori.

In Trentino sono già state registrate variazioni nei periodi di riproduzione degli uccelli (nibbio bruno), nel comportamento del capriolo e nei pattern demografici dei topi selvatici. Sono già evidenti anche gli effetti sulla vegetazione quali: l'accelerazione dell'innalzamento della treeline, la frammentazione degli habitat, le modifiche dei cicli fenologici (anticipazione delle fioriture e prematuro riavvio del periodo vegetativo), l'alterazione della composizione e della struttura delle foreste e la risalita di quota di specie vegetali. Saranno probabili maggiori gli impatti da parte di insetti patogeni (APPA, 2020).

Anche gli eventi estremi possono essere causa di stress per le foreste: l'aumento di periodi di siccità potrebbe favorire il rischio di incendi boschivi, aumentare fenomeni erosivi e quindi la riduzione di habitat.

Mentre le specie presenti nelle fasce montane e subalpine saranno soggette a conseguenze variabili a seconda della loro diversa tolleranza ecologica, le specie della fascia alpina e nivale, subiranno le maggiori conseguenze, essendo adatte a tollerare solo limitate variazioni di temperatura.

### **Effetti dei cambiamenti climatici sui suoli**

Con l'aumento delle temperature invernali diminuisce la stagionalità facendo sì che l'attività batterica nei suoli e l'assimilazione dei nutrienti e acqua da parte delle piante continuino per periodi più lunghi impoverendo il suolo. A ciò si aggiungono i periodi siccitosi che, seguiti da piogge torrenziali, hanno l'effetto di aumentare la mobilizzazione di sedimenti verso valle.

L'aumento delle temperature invernali causa, inoltre, un accorciamento del periodo di copertura nevosa; questo implica un trasporto maggiore e più rapido di nutrienti verso il sottosuolo che comporta una diminuzione di umidità e fertilità del terreno.

Il permafrost è un terreno che rimane al di sotto della temperatura di 0°C per almeno due anni consecutivi ed è il risultato dell'interazione tra le condizioni climatiche e le

caratteristiche del substrato. I principali fattori che determinano la formazione e la conservazione del permafrost sono la temperatura dell'aria, la radiazione solare, la presenza, la durata e lo spessore del manto nevoso. Per queste peculiarità, il permafrost è fortemente soggetto all'evoluzione del clima ed è riconosciuto come uno dei principali indicatori del cambiamento in atto. La sua degradazione può causare rilevanti problemi di rischio ambientale, legati a smottamenti, frane e in generale all'instabilità dei versanti.

Eventi simili si stanno verificando anche in Trentino: il 16 giugno 2018, a causa di questo fenomeno il versante Sud di cima Carè Alto, ad oltre 3000 m di quota, è stato interessato da un distacco di roccia pari a circa 300 000 m<sup>3</sup>.

### **Effetti dei cambiamenti climatici sul deflusso fluviale**

La variazione delle precipitazioni, l'aumento delle temperature e la fusione dei ghiacciai inducono delle alterazioni significative sul ciclo idrologico osservabili su tutto l'arco alpino, ad esempio le portate medie annuali del fiume Adige a Trento mostrano un trend negativo. Nel comparare i dati attuali con gli storici bisogna però considerare che a questi fattori si sovrappongono gli effetti generati da attività antropiche quali modifiche nelle derivazioni irrigue e nell'uso del suolo.

La riduzione della piovosità estiva, la riduzione delle precipitazioni nevose, l'aumento di eventi di siccità e pioggia intensa, l'anticipo, l'intensificazione della fusione nivo-glaciale, tenderanno ad attenuare le ridotte portate invernali e gli eccessi delle portate estive (PAT, 2008).

### 3.2 La flora subalpina e alpina

Le Alpi sono una delle regioni Europee a più alta biodiversità; delle circa 4500 specie, 2.563 le spontanee o naturalizzate presenti in provincia di Trento, circa 1000 sono orofite alpine e i numerosi endemismi (circa 500 specie appartenenti a 3 generi) dimostrano la complessità geologica e climatica che ha determinato fenomeni di isolamento e di adattamento a un ambiente fortemente diversificato (Aeschimann D., 2004; PNAB, 2020; Prosser F. et al., 2019).

Le zone alpine sono tra le aree a maggior rischio di perdita di biodiversità e ad oggi hanno subito gli impatti più evidenti del cambiamento climatico che comporta effetti sulla fisiologia, sul comportamento, sul ciclo vitale, sulla distribuzione geografica delle specie e sulla composizione delle comunità ecologiche terrestri con conseguenze sulla fauna, sulla struttura delle comunità e sulla biodiversità.

#### **Potenziati risposte delle specie vegetali**

Le specie vegetali possono rispondere ai cambiamenti climatici in diversi modi, tramite: persistenza, migrazione o estinzione. La persistenza in particolare può avvenire tramite graduale adattamento genetico delle popolazioni, grazie alle plasticità fenotipica o buffering ecologico. Tuttavia, nel determinare le possibili risposte della vegetazione vanno tenuti in considerazione anche altri fattori - come la frammentazione, le interazioni piante-animale, ... - che possono influenzare le specie vegetali.

Considerando solo il fattore temperatura, un riscaldamento moderato può favorire molte specie, in particolare le alpine, promuovendo la produzione di semi e aumentandone la dimensione; il fenomeno risulterebbe inoltre vantaggioso per le specie a fioritura tardiva che potrebbero beneficiare di una stagione di crescita più prolungata. In Trentino la tendenza all'anticipo delle fasi primaverili si stimava già nel 2008 approssimativamente in circa 8-10 giorni rispetto al precedente ventennio, per quanto tale anticipo fosse riferito soprattutto alla seconda metà degli anni '80 (PAT, 2008).

Nelle fasce subalpine e alpine inverni più miti causano lo scioglimento anticipato della neve, che porta ad una prematura disidratazione delle piante o ad un precoce riavvio del periodo vegetativo, specialmente se la temperatura diurna è alta; specie come il

*Rhododendron ferrugineum* possono subire lesioni dovute al gelo soprattutto se le condizioni si protraggono negli anni (Theutrillat J.P. et Guisan A., 2001).

La variabilità interannuale della durata dell'innevamento riveste un ruolo rilevante: gli anni con la durata limitata della copertura nevosa hanno evidenziato un aumento della temperatura del suolo e della biomassa microbica durante la stagione di crescita andando anche a influenzare la dinamica della popolazione animale (Rogora M. et al, 2018).

La **persistenza parziale** è probabile si verifichi dove avvengono processi criogenici e permafrost, pendii ripidi e ghiaioni instabili; inoltre può essere facilitata dalla grande longevità di molte piante alpine (soprattutto specie che si riproducono per via vegetativa) come *Carex curvula*.

Nel contesto dei cambiamenti climatici la persistenza delle specie attraverso la seedbank nel suolo è inaffidabile e imprevedibile, specialmente nel caso di specie rare. Si tratta di una strategia variabile poiché sono coinvolti specie e habitat specifici il cui ripristino successivo è spesso dipendente dal disturbo; il pool delle specie presenti nella seedbank così come la frequenza possono riflettere solo parzialmente la vegetazione attuale (Theutrillat J.P. et Guisan A., 2001).

La **plasticità fenotipica** determinerà la risposta ecologica a breve termine delle specie ai cambiamenti climatici e, in alcuni casi, potrebbe tamponare direttamente l'effetto di tale cambiamento. In questo senso, uno delle caratteristiche più importanti per le orofite alto-alpine è probabilmente il loro potenziale di acclimatazione che si esprime adattando la respirazione notturna ad una temperatura più elevata (Theutrillat J.P. et Guisan A., 2001).

In passato, le glaciazioni portarono ad una frammentazione delle popolazioni e alla scomparsa delle specie in tutte le Alpi. Tuttavia, questi fenomeni hanno anche favorito l'evoluzione della flora alpina: popolazioni di molte specie terziarie, prevalentemente diploidi, sono state spinte da quote elevate verso le inferiori entrando talvolta in contatto con popolazioni di altre regioni permettendo l'ibridazione tra diversi biotipi della stessa specie o più raramente tra le specie stesse, portando ad un aumento della **variabilità genetica**, presupposto fondamentale per adattarsi alle nuove condizioni ambientali. In seguito alla glaciazione, i poliploidi di nuova formazione e meglio adattati hanno avuto la possibilità di espandersi e colonizzare nuovi territori e condizioni ecologiche.

Attualmente, il riscaldamento agisce in modo opposto, isolando sempre più popolazioni ad alta quota.

Sebbene il cambiamento climatico possa fornire rapidamente nuove condizioni ecologiche, è molto improbabile, a causa delle barriere di dispersione, che popolazioni diverse da basse altitudini possano occupare rapidamente i nuovi territori potenzialmente disponibili ad altitudini più elevate o prendere contatto per promuovere l'ibridazione e nuovi poliploidi.

Una forte selezione come quella indotta da un cambiamento climatico può creare una differenziazione genetica molto rapida all'interno delle popolazioni vegetali. La diversità genetica è un presupposto fondamentale per adattarsi alle nuove condizioni ambientali.

Trend emersi da studi condotti in passato mostrano che le specie sono più propense a rispondere con la **migrazione** piuttosto che con l'adattamento genetico. In uno studio Steinbauer afferma che si riscontra un'accelerazione a livello continentale nel tasso di aumento della ricchezza delle specie vegetali sulle vette europee, con un arricchimento delle specie 5 volte maggiore tra il 2007 e il 2016 rispetto a cinquanta anni fa, tra il 1957 e il 1966. Questa accelerazione è sincronizzata con il riscaldamento globale accelerato e non è legata a fattori alternativi al cambiamento globale. Cinquant'anni fa il tasso di aumento del numero di specie era in media di 1,1 specie per decennio, mentre nel decennio 2007-2016 le vette hanno guadagnato in media 5,4 specie aggiuntive. Esiste una relazione positiva tra l'entità dell'aumento della ricchezza delle specie vegetali e il tasso di riscaldamento di tutte le 302 serie di tempo (Steinbauer. M.J., 2018).

Nel 2003 anche uno studio condotto da Pauli et al. sulle cime subnivali e nivali alpine (la maggior parte di esse supera i 3000 m) ha evidenziato un movimento delle piante di alta montagna verso l'alto: complessivamente, il 70% delle 30 cime studiate ha mostrato un aumento della ricchezza delle specie a causa di invasori provenienti da quote più basse. I tassi di movimento verso l'alto erano altamente correlati alla forma geomorfologica delle aree sommitali: le vette con il maggior incremento nella ricchezza delle specie hanno creste solide e strutturate con numerosi microhabitat stabili e bassa frequenza di eventi di disturbo, spesso caratterizzate da corridoi che si estendono dalla fascia delle praterie alpine (Pauli H. et al, 2003).

Dato il dinamismo, specie rare ed endemiche potrebbero estinguersi a causa dei cambiamenti climatici, come potrebbe essere il caso delle specie di subnivali-nivali in

generale per diversi motivi: impossibilità di migrare ulteriormente verso le quote superiori (talvolta assenti), incapacità di spostarsi ad una velocità tale da seguire i cambiamenti ma anche una crescente minaccia rappresentata dall'espansione delle specie alpine (Erschbamer B. et al, 2008).

Durante i periodi interglaciali la **dispersione** è sempre stata la chiave per il superamento delle barriere naturali e l'espansione oltre le 'aree rifugio', soprattutto per gli endemismi regionali.

Nella fascia alpina e nivale, le specie pioniere disperse dal vento dovrebbero essere in grado di raggiungere nuovi siti a quote più elevate, tuttavia, la velocità di progressione ascendente può non essere abbastanza veloce per tenere il passo con il riscaldamento. La causa di un lento tasso di colonizzazione della fascia alpina può essere anche la mortalità molto elevata di individui dovuta alla scarsità di siti sicuri; inoltre per le specie non disperse dal vento, la dispersione naturale è limitata principalmente da barriere naturali (ad esempio orografiche, geomorfologiche, litologiche) (Theutrillat J.P. et Guisan A., 2001).

La **frammentazione** delle popolazioni è di particolare importanza per le specie endemiche e orofite, poiché piuttosto marcata a seguito di una diminuzione della superficie delle fasce alpine e nivali. Se non possono persistere o adattarsi, le specie che mostrano una distribuzione disgiunta o frammentata, possono incorrere in sparizioni locali. Endemiche alpine limitate alle cime di bassa montagna (prive di fasce nivali) o specie distribuite su un'area limitata a causa di barriere pedologiche e/o litologiche risultano più vulnerabili e a maggior pericolo di estinzione.

Anche se specie ampiamente distribuite o specie che vivono a quote inferiori rispetto alle orofite non rischiano la scomparsa a causa del cambiamento climatico, possono dover affrontare la frammentazione delle popolazioni che può portare a una riduzione della fecondità e delle prestazioni della prole.

Anche altri fenomeni possono influire sulla ricchezza delle specie vegetali sui vertici dei rilievi: studi locali hanno suggerito che il pascolo e il frequente disturbo da parte dei turisti possono sopprimere l'avanzata delle piante alpine in risposta al riscaldamento in montagna (Steinbauer M. J., 2018).

Un altro fattore da tenere in considerazione è l'**interazione vegetale/animale**: riducendo selettivamente le popolazioni delle specie vegetali, gli erbivori possono modificare gli ecosistemi, ridurre il potenziale di dispersione delle piante e di conseguenza la loro capacità di far fronte ai cambiamenti climatici.

L'aumento della CO<sub>2</sub> atmosferica si traduce in un rapporto carbonio-azoto più elevato nei tessuti vegetali, che porta ad un incremento del pascolo da parte degli erbivori che cercano una quantità equivalente di azoto (Theutrillat J.P. et Guisan A., 2001).

Nel complesso, specie aventi un grande potenziale di risposte adattive attraverso la diversità genetica, fenotipica plasticità, elevata abbondanza, o significative capacità di dispersione, sono meno a rischio di estinzione.

Testando sistematicamente i ritardi temporali nell'aumento della ricchezza delle specie a seguito dei cambiamenti climatici è emerso che l'aumento della ricchezza di specie nei vertici europei è una risposta diretta e immediata al riscaldamento climatico; tuttavia, si tratta di un trend medio e non si tiene conto della non-colonizzazione delle specie a bassa quota. Non si può escludere la possibilità che solo una frazione delle specie abbia risposto rapidamente mentre un numero imprecisato di esse è in ritardo rispetto al cambiamento climatico. Le nostre osservazioni possono quindi sottovalutare il previsto ricambio di specie a lungo termine nei vertici (Steinbauer M. J., 2018).

Man mano che più specie si stabiliranno in siti ad alta quota, le estinzioni locali saranno probabilmente il risultato della sostituzione competitiva di specie alpine a crescita lenta e resistenti allo stress da parte di generalisti più vigorosi che beneficiano del riscaldamento, piuttosto che dagli effetti negativi diretti del riscaldamento sulle specie sommitali.

Tuttavia, la sostituzione competitiva delle specie residenti richiede che i colonizzatori si accumulino in popolazioni sufficientemente grandi; le estinzioni locali dovrebbero quindi seguire la colonizzazione con un intervallo di tempo. Di conseguenza, l'accelerazione degli aumenti di ricchezza delle specie vegetali dovrebbe essere un fenomeno transitorio che nasconde l'accumulo di un **debito di estinzione** (Rogora M. et al, 2018; Steinbauer M. J., 2018).

Il tempo di rilassamento fino a quando questo debito è pagato è probabile che sia caratterizzato da continui cambiamenti nei rapporti di abbondanza, che possono servire come segnali sensibili di allarme precoce di imminenti estinzioni. La durata di questo



periodo dipenderà probabilmente da fattori quali la longevità delle specie ad alta quota, le capacità clonali delle piante e la diversità dei microhabitat locali, sostenendo la persistenza di microrifugi a clima freddo per le specie di alta montagna.

### **Potenziali risposte della vegetazione**

Un'ipotesi diffusa è quella dell' **'ecotonal shift'** secondo cui il riscaldamento globale sposterà gli intervalli climatici di specie o anche intere fasce di vegetazione verso l'alto lungo gradienti altitudinali definiti termicamente.

Nella valutazione dello spostamento della vegetazione, bisogna considerare che i fattori fisiografici come la pendenza non sono ugualmente distribuiti ad ogni altitudine. La presenza di pendii ripidi gioca un ruolo importante poiché difficilmente possono ospitare vegetazione, possono inoltre rappresentare barriere alla dispersione verso l'alto delle specie e possono fornire un rifugio a determinate specie che sono in grado di resistere a tali condizioni ecologiche difficili, isolandole dal clima generale.

Nel complesso, ciò porterebbe ad una marcata diminuzione delle comunità legate alla bassa pendenza e ad alcuni tipi di ecosistemi, come le paludi alpine e le sorgenti.

Per la vegetazione di alta montagna è stato delineato il seguente scenario: le specie vegetali che rispondono alle temperature più elevate possono migrare verso l'alto e causare gravi restrizioni delle strette fasce di vegetazione prevalentemente determinate dalla temperatura, minacciando la loro esistenza.

Tassi e modelli di queste dinamiche, tuttavia, dipenderanno fortemente dalle preferenze di habitat di specie particolari e dai loro tratti funzionali chiave (Pauli H. et al, 2003).

Nella loro risposta al cambiamento climatico, per quanto riguarda le variazioni di **composizione**, le comunità climax climatiche (in equilibrio stabile con le condizioni generali del clima regionale) e edafiche (in equilibrio con le particolari condizioni locali del suolo) possono comportarsi in modo diverso.

Nel caso delle prime, nuove comunità vegetali possono svilupparsi e, parzialmente o totalmente, sostituire le presenti. Tuttavia, se la rapida dispersione di nuovi invasori è limitata, il pool di specie non dovrebbe essere molto diverso e le comunità vegetali dovrebbero ancora appartenere alla più alta unità di classificazione (alleanze, ordini, classi)

noto per le Alpi, in particolare nella fascia montana e superiore. Fattori fisiografici ed edafici svolgono ancora un ruolo determinante (a livello regionale e locale): una comunità climatica può persistere in luoghi con condizioni edafiche adeguate, e quindi resistere al nuovo clima come un extrazonale. Nella fascia alpina, è molto probabile che le comunità vegetali su pendii moderati si restringano, o addirittura scompaiano in alcuni punti.

Per quanto riguarda le comunità climax edafiche vegetali, queste potrebbero sostenere un cambiamento climatico dato che i loro fattori limitanti non sono fortemente modificati (Theutrillat J.P. et Guisan A., 2001).

Per quanto riguarda il cambiamento dinamico delle comunità, è improbabile un cambio simultaneo di ogni componente e ciò comporta una variazione nella **struttura della vegetazione**. Inoltre, i limiti superiori e inferiori di una specie non sono generalmente determinati dallo stesso fattore ecologico. Dalle specie delle colline alle subalpine, specialmente gli alberi, la temperatura è spesso il fattore superiore limitante mentre l'umidità determina il limite inferiore.

Per molte specie alpine, la luce è un importante fattore limitante e si manifesta tramite la concorrenza con piante più alte. Pertanto, uno dei primi effetti del riscaldamento sarà quello di modificare i rapporti di concorrenza tra tipi funzionali vegetali, cioè, specie raggruppate secondo alcuni dei loro tratti funzionali.

Non tutti i componenti strutturali delle comunità vegetali saranno modificati allo stesso tasso. In particolare, alcuni potrebbero persistere in nuove comunità fino a quando le condizioni dei loro microhabitat non saranno sostanzialmente modificate (Theutrillat J.P. et Guisan A., 2001).

L'analisi temporale delle fasce vegetative nei siti di montagna LTER e GLORIA ha evidenziato cambiamenti nella struttura e nella composizione della comunità vegetale, un incremento significativo della copertura vegetativa nei siti alpini, seguito da quelli subalpini, mentre la copertura della vegetazione nella cintura nivale non ha mostrato cambiamenti (Rogora M. et al., 2018).

Mentre non ci sono prove che le specie alpine cresceranno più velocemente per l'aumento della CO<sub>2</sub>, un aumento del rapporto C/N nella biomassa comporterebbe una riduzione della qualità degli alimenti per gli erbivori e alterazioni nei processi di decomposizione. Una

maggior deposizione di azoto solubile negli ecosistemi alpini stimolerà la crescita di alcune specie e discriminerà altre, modificandone la composizione. La CO<sub>2</sub> può compensare la scarsa illuminazione, permettendo a meno specie tolleranti l'ombra di svilupparsi in habitat ombrosi, mentre la deposizione di azoto può migliorare la crescita di specie tolleranti l'ombra.

L'aumento dell'umidità del suolo, insieme all'aumento dell'input di carbonio, promuoverà l'attività microbica che a sua volta rilascerà N<sub>2</sub>O (ossidi nitrosi), un potente gas serra. Pertanto, l'aumento della CO<sub>2</sub> atmosferica può generare un ciclo di feedback positivo.

L'effetto dovuto ai cambiamenti nelle precipitazioni e nella deposizione di azoto è comunque minore rispetto a quello determinato dalla temperatura (Steinbauer M. J., 2018).

In condizioni più calde e più umide è probabile aumentare la **produttività** e la biomassa in formazione. Tuttavia, i cambiamenti nella produttività non possono essere dissociati dall'eutrofizzazione e dall'effetto di 'fertilizzazione' dell'aumento atmosferico CO<sub>2</sub> né l'effetto opposto di ozono stratosferico.

La modellazione della produttività delle praterie gestite nelle Alpi svizzere, ha dimostrato che, con un raddoppio della concentrazione di CO<sub>2</sub>, un aumento della temperatura (2K) e delle precipitazioni, portano ad un aumento primario netto della produzione del 20-70% (Theutrillat J.P. et Guisan A., 2001).

### 3.3 Fattori limitanti la crescita delle specie vegetali in alta quota

I fattori che determinano la possibile presenza, la distribuzione e la ricchezza di specie nelle comunità vegetali alpine sono una questione ecologica molto dibattuta. La “teoria neutrale” afferma che la ricchezza di specie in una data comunità vegetale è principalmente governata da eventi **stocastici** (come la dispersione dal pool di specie regionali) mentre “teoria di nicchia” sostiene che la diversità è determinata principalmente da **fattori ambientali locali** (come le interazioni micro-climatiche e biotiche) che classificano le specie in comunità in base alle loro nicchie ecologiche (S. L. Olsen, 2014).

Come dimostrato nello studio di Olsen svolto nel periodo 2000-2011, queste teorie non si escludono a vicenda, infatti, la ricchezza delle specie locali è governata da processi stocastici, da filtri ambientali abiotici (temperatura, caratteristiche del suolo, umidità, contenuto di azoto...) e da interazioni biotiche, che includono sia la competizione che la facilitazione tra le specie e le interazioni con altri organismi (S. L. Olsen, 2014). Secondo l'ipotesi del gradiente di stress, per cui l'equilibrio tra concorrenza e agevolazione può variare lungo i gradienti di stress ambientale, il ruolo della concorrenza dovrebbe aumentare con la diminuzione della severità dell'ambiente, per esempio quando il microclima diventa più favorevole. Questo sta già accadendo negli habitat alpini, dove la ricchezza di specie è in rapido aumento a causa della migrazione altitudinale delle specie.

L'importanza relativa dei diversi fattori, tuttavia, può variare tra le specie, nello spazio e nel tempo nelle fasi della vita delle specie: tendenzialmente i fattori abiotici hanno un ruolo importante per la dispersione e il reclutamento delle piantine, mentre i fattori biotici assumono importanza in seguito alla germinazione in un microhabitat con condizioni abiotiche favorevoli.

Inoltre, la loro influenza può essere modificata dal riscaldamento climatico, sia come risposta diretta all'aumento delle temperature che indirettamente attraverso l'alterazione delle interazioni biotiche che possono favorire l'insediamento di nuove specie nelle comunità vegetali presenti, con cambiamenti importanti nella ricchezza e nella composizione delle comunità. Il fattore ambientale, ad esempio, ha aumentato la sua influenza nel tempo ed è diventato uno dei principali fattori limitanti per la ricchezza delle specie durante l'insediamento della pianta (2004 - 2011) (S. L. Olsen, 2014).

Oltre a questi fattori va considerata la componente biologica intrinseca della specie che esprime il grado di adattamento alla stazione (Jaccard, P., 1912). Le specie caratteristiche delle zone di alta quota sono in prevalenza erbacee; con l'aumentare della quota si osserva ad una progressiva riduzione dimensionale e alla comparsa di adattamenti a condizioni climatiche più estreme: molte presentano una forma compatta (es. *Silene acaulis*), gli arbusti assumono andamenti striscianti (es. *Salix herbacea* e *Loiseleuria procumbens*), gli apparati fogliari di molte specie sono caratterizzati da peluria (es. *Artemisia genepi*), secrezioni di materia cerosa (*Saxifraga caesia*) o succulente (come in *Sempervivum sp.* e *Sedum sp.*). Questi adattamenti permettono di sfruttare al massimo la quantità di energia disponibile, resistendo al forte irraggiamento solare e alle radiazioni ultraviolette, sopportare gli sbalzi di temperatura giornalieri, resistere ad alcuni tipi di disturbi come il vento e ridurre la traspirazione e la conseguente perdita di acqua dai propri tessuti. Inoltre, queste specie sono per la maggior parte perenni, dal ciclo vegetativo rapido e fioritura precoce per ovviare al problema della brevità del periodo vegetativo (La Flora Alpina, 2019, [parcomonviso.eu](http://parcomonviso.eu)).

### **Fattori Ambientali**

La distribuzione e la diversità della vegetazione alpina sono influenzate fortemente da variabili ambientali abiotiche, che comprendono sia la componente climatica che i fattori legati alla stazione (suolo, topografia,...).

Le variabili climatiche hanno fatto sì che la flora alpina si sia adattata alle severe condizioni che contraddistinguono gli ambienti di alta quota, tra cui le basse temperature, radiazioni ultraviolette, velocità del vento, precipitazioni e disturbi come ad esempio le valanghe. Le specie dominanti in queste fasce vegetazionali appartengono alle forme biologiche delle emicriptofite e alle camefite, indicatori di condizioni climatiche difficili con clima estremamente freddo e periodo di crescita limitato (Shaheen H. et al., 2019).

La radiazione solare e il manto nevoso, in particolare, sono variabili importanti per la modellazione del paesaggio alpino. Entrambi potenzialmente integrano diverse variabili singole anche topografiche (ad es. pendenza, aspetto, microtopografia e altitudine) e sono fisiologicamente importanti per la maggior parte delle piante di alta quota: il bilancio totale della radiazione solare è direttamente correlato alla fotosintesi e la copertura nevosa è asso-

ciata alla durata del periodo di crescita della produzione di energia solare (Guisan A. et al., 1998).

In uno studio condotto nel 2005 sulle Alpi austriache da Moser D., i modelli di ricchezza delle specie alpine sono stati correlati tramite modelli lineari primari generalizzati con diverse variabili ambientali primarie come la temperatura (minima, media e massima annuale, conteggio dei giorni senza gelo), le precipitazioni e l'evapotraspirazione. Come ulteriori predittori sono stati impiegati la geologia delle rocce, in particolare la quantità di substrati calcarei, la vicinanza a fiumi e laghi e variabili secondarie come l'eterogeneità topografica (es. elevazione), edafica (diversi tipi di suolo) e dell'uso del suolo (tipi di copertura) (Moser D. et al., 2005).

Il modello di regressione multipla finale spiega circa il 50% della varianza nei modelli di ricchezza delle specie. I più importanti predittori si sono dimostrate essere le variabili climatiche come la temperatura (massimi) ed in particolare la potenziale evapotraspirazione (PET), variabile composta che combina gli effetti di temperatura e irraggiamento solare (indispensabili per la fotosintesi) valutando il bilancio energetico atmosferico netto indipendentemente dalla disponibilità di acqua. Questi hanno determinato una risposta pronunciata della vegetazione con un calo significativo della ricchezza delle specie ad altitudini più elevate, come emerso da altri studi e riportato dalla 'species–energy hypothesis'<sup>1</sup> Questo risultato è anche coerente con l' "environmental stress hypothesis"<sup>2</sup>, secondo la quale meno specie sono fisiologicamente adattate a persistere nel severo ambiente alpino. È interessante evidenziare che non sono i minimi di temperatura o di PET (indici di stress) ma i massimi (indici di ambiente favorevole) ad avere la maggior potenza predittiva nel modello, indipendentemente dalla considerazione della variazione temporale o spaziale del clima. Negli ecosistemi montani quindi, anche se le basse temperature ostacolano la vita delle piante, è l'estremità favorevole del gradiente climatico che sostiene principalmente i modelli di diversità.

---

<sup>1</sup> Species–energy hypothesis : originariamente formulata da Hutchinson (1959) ed estesa da Wright (1983). Un'altra importante intuizione è la teoria della 'water–energy dynamics' di O'Brien (1998), che suggerisce che i modelli su larga scala della ricchezza delle specie vegetali dipendono fondamentalmente dall'interazione di energia disponibile (calore/luce) e acqua (pioggia).

<sup>2</sup> Environmental stress hypothesis (Fraser & Currie, 1996; Whittaker et al., 2001) si basa sul presupposto che il pool di specie disponibili per la colonizzazione diminuisce con la crescente severità delle condizioni ambientali e dovrebbe essere importante in particolare per prevedere la ricchezza di specie di habitat estremi

Le misure classiche della variabilità climatica come l'intervallo assoluto di temperatura o PET (variazione annuale e diurna) non riescono a descrivere l'influenza reale della variabilità climatica nel caso di ambienti montani bensì bisogna considerare la variabilità in relazione al punto di congelamento (influisce sui processi di crescita) poiché è più significativa per la vita delle piante rispetto alla variazione al di sopra di questa soglia di temperatura.

I risultati suggeriscono quindi che i processi guidati dall'energia sono determinanti primari della ricchezza di specie di piante vascolari nelle le Alpi europee.

Le precipitazioni in montagna possono avere effetti negativi sulla crescita delle piante a causa della durata prolungata della copertura nevosa e quindi della riduzione del periodo vegetativo. Un'elevata percentuale di acqua precipitata si trova allo stato solido non disponibile (neve e ghiaccio) durante un inverno relativamente lungo e non può essere utilizzata fino allo scioglimento, quando la maggior parte dell'acqua viene persa per deflusso.

Infatti, nel caso della maggior parte degli ecosistemi alpini, la disponibilità idrica è governata non solo dalle variabili geografiche, tra cui altitudine, aspetto e grado di pendenza ma dipende anche dalle precipitazioni, i cui modelli tendono a seguire tendenze altitudinali nelle catene montuose ma sono irregolari nelle diverse regioni, rendendo la loro influenza diretta sulla vegetazione difficile da quantificare (Guisan A. et al., 1998, Shaheen H. et al., 2019).

Altre variabili da considerare nei paesaggi alpini sono la geologia, la copertura rocciosa (affioramenti, ghiaioni mobili o stabilizzati, scogliere), l'idrografia, i fenomeni periglaciali (permafrost, gelifluzione, crioturbazione), e disturbi naturali o causati dall'uomo.

I parametri del suolo sono difficili da includere in modelli statici perché la maggior parte dei tipi di suolo derivano dal substrato sottostante, dal clima e dai fattori topografici (in particolare la pendenza) e perché il suolo e la vegetazione si influenzano a vicenda (Guisan A. et al., 1998).

Il permafrost, in particolare, ha un'influenza modificatrice sulla vegetazione perché il terreno ghiacciato influisce sulla stabilità del suolo e sulla temperatura dello stesso all'interno della zona di crescita delle radici.

Il substrato roccioso, in particolare il substrato calcareo, che si ritiene sia uno dei fattori primari più importanti per spiegare la ricchezza delle specie vegetali nelle montagne europee, sembra essere di minore importanza rispetto alle variabili climatiche (Moser D. et al.,

2005). I risultati supportano l' "Environmental heterogeneity"<sup>3</sup>, poiché le regioni calcaree pure come quelle di silicato puro hanno meno specie rispetto alle regioni con entrambi i substrati ugualmente rappresentati che permettono la coesistenza di due diversi pool di specie (Moser D. et al., 2005, Alfaro B. et al., 2021).

Tra i descrittori di eterogeneità, quella edafica e di uso del suolo sono più strettamente correlate con il numero di specie rispetto all'eterogeneità topografica.

Mentre il suolo e i fattori influenzati dai processi associati alla stabilità del sito influenzano e determinano i modelli di mesoscala della vegetazione alpina, i fattori associati alla topografia (altitudine, esposizione e pendenza) sono tra i determinanti primari dei modelli su macroscale (La Flora Alpina, 2019, parcomonviso.eu).

La configurazione spaziale degli habitat alpini nell'ambito di una catena montuosa può influenzare la loro connettività funzionale, condizionando la dispersione delle specie e la composizione dei pool regionali (Jiménez-Alfaro B. et al., 2021). Il numero delle specie alpine è legato soprattutto alla presenza delle 'aree rifugio' e all'isolamento, ma la composizione è spiegata dalla dispersione avvenuta in passato e dal fattore ambientale che ha influito nel periodo post-glaciale. (Alfaro B. et al., 2021).

In contrasto con le previsioni, la connettività delle zone alpine ha un effetto negativo sulla ricchezza delle specie: le regioni con la più alta connettività sono caratterizzate da versanti relativamente lisci ed un minor numero di vette 'comunicanti' in un'area ristretta. Questa configurazione spaziale potrebbe ridurre l'eterogeneità dell'habitat e il numero di nicchie disponibili per le specie adattate al freddo, favorendo una percentuale maggiore di non-alpine provenienti da basse altitudini.

Si è riscontrato un effetto positivo dell'irregolarità topografica sulle dimensioni dei pool di specie, sostenendo che l'eterogeneità dei paesaggi alpini favorisca più nicchie e microrifugi. Questo effetto è stato particolarmente rilevante per le specie alpine, suggerendo che le regioni con maggiore eterogeneità topografica facilitino i rifugi locali durante i periodi glaciali, come previsto dai dati genetici. (Alfaro B. et al., 2021).

---

<sup>3</sup> Environmental heterogeneity: ipotesi per cui l'eterogeneità ambientale è correlata positivamente con il numero di specie (Richerson & Lum, 1980; Shmida & Wilson, 1985; Huston, 1994; Rosenzweig, 1995), grazie alla suddivisione delle risorse che permette la coesistenza.



### 3.4 Obiettivo della tesi

Il rilievo delle specie vegetali d'alta quota svolto nell'ambito della Provincia di Trento nel corso dell'anno 2022 rientra in un progetto più ampio condotto dalla Fondazione Museo Civico di Rovereto in collaborazione con il dipartimento DAFNAE dell'Università degli studi di Padova. Questo progetto, di durata pluriennale, prevede il campionamento vegetazionale ripetuto di 36 vette selezionate di quota superiore ai 2600m s.l.m., con lo scopo di monitorare e studiare gli effetti del cambiamento climatico in questi ecosistemi particolarmente sensibili.

In alta montagna gli effetti del riscaldamento globale sono più evidenti e, in particolare con l'aumento dell'altitudine, aumenta l'influenza della temperatura sulla vegetazione alpina, la quale può essere considerata un valido bioindicatore di cambiamento climatico. Nello specifico i settori montani più suscettibili alle modificazioni del clima sono posti tra il limite superiore del bosco e il piano nivale: in questa fascia altitudinale i gradienti ecologici sono marcati e gli ecotoni spesso condensati. Queste condizioni fanno sì che le variazioni nella vegetazione siano rilevabili su breve distanza, rendono possibili indagini su zone relativamente limitate. Le vette di montagna sono particolarmente adatte per studi a lungo termine sulle risposte biotiche ai cambiamenti ambientali perché rappresentano siti di studio naturali permanenti che sono facili da riposizionare nel tempo rendendo così possibile registrare serie temporali affidabili. Diversi studi hanno già dimostrato un aumento della ricchezza nel numero di specie sulle cime delle Alpi europee in tempi recenti testimoniando la migrazione di specie verso quote superiori. (Steinbauer. M.J., 2018; gloria.ac.at)

Ulteriori ricerche in questo ambito di durata pluriennale, come quella avviata e quelle promosse dal progetto G.L.O.R.I.A. (Global Observation Research Initiative in Alpine environments), renderanno possibili analisi di serie storiche, utili alla definizione di modelli di ricchezza specifica e abbondanza lungo i gradienti altitudinali, alla stima della perdita di biodiversità vegetale nell'arco temporale nonché verificare l'esistenza di specie o gruppi che possano svolgere il ruolo di indicatore del cambiamento climatico.

Nel periodo luglio-settembre 2022, anno di inizio del progetto, sono state campionate 13 vette; per questo lavoro di tesi sono stati rielaborati i dati ricavati in questo contesto. Il

primo obiettivo è quello di trattare tali informazioni per caratterizzare e descrivere la flora alpina sotto vari profili, sfruttando i tratti funzionali caratteristici delle specie rilevate, in particolare quelli legati ai margini di espansione superiori e inferiori. È poi possibile esaminare l'eventuale esistenza di relazioni tra tratti funzionali e la distribuzione delle specie, inoltre verificare la presenza di tratti che favoriscano più di altri la permanenza della specie in determinate condizioni altitudinali.

Questo tipo di informazioni potrà essere utilizzato per fare previsioni future circa i cambiamenti del soprassuolo in tali aree, sulle capacità di adattamento e avanzamento delle specie anche in relazione ai limiti topografici imposti dal territorio, nonché identificare le specie a potenziale rischio di estinzione.

## 4 MATERIALI E METODI

### 4.1 Area di studio

Le vette campionate sono state selezionate nell'ambito della Provincia Autonoma di Trento (Fig. 4.1), area montuosa eterogena sia sotto il profilo geologico, litologico e morfologico che climatico (Bertolli A. et al., 2012).

Dal punto di vista geologico il territorio è caratterizzato dalla presenza di due unità strutturali della catena Alpina, il cui confine è rappresentato dal Lineamento Periadriatico, un fascio di linee tettoniche ad andamento E-O che percorre longitudinalmente l'orogene alpino attraversando il passo del Tonale e la Val di Sole.

A sud troviamo il Sudalpino, costituito in prevalenza da rocce calcareo-dolomitiche e marnoso-arenacee (sedimentarie), in minor parte da formazioni vulcaniche, rocce metamorfiche (tipo scistoso) e intrusive (graniti, granodioriti, ecc.)

A nord vi è l'Austroalpino, caratterizzato per lo più da rocce scistosocristalline e da un assetto strutturale articolato con presenza di falde tettoniche, sovrascorrimenti e scaglie listriche.

Il Trentino ha un clima con caratteristiche continentali e alpine di alta montagna, tuttavia non presenta i caratteri rigidi di altre aree alpine; le condizioni stagionali possono variare in base all'orografia, all'esposizione ai venti dominanti, alla quota e alla presenza dei laghi.

Le precipitazioni sono sensibili alla quota ed all'orientamento dei rilievi: quantità maggiori cadono nelle zone più elevate e nei settori meridionali ed occidentali della regione a causa dei venti associati alle perturbazioni atlantiche. Più a nord e ad est le Alpi fanno da barriera e la piovosità annua decresce progressivamente.

Differenze importanti si riscontrano anche nel regime pluviometrico che nelle zone prossime alle Prealpi presenta due massimi di precipitazione in primavera e autunno mentre le aree più lontane dalla pianura Padana e alle quote più elevate mostrano un regime con un massimo di precipitazione evidente in estate dovuto ai frequenti eventi temporaleschi.

L'assetto tettonico, la variabilità dei litotipi affioranti e i fattori climatici contribuiscono alla definizione della morfologia del territorio.

La grande varietà delle formazioni affioranti produce una morfologia di tipo selettivo, con pareti verticali su litologie compatte e competenti, in contrapposizione a forme più dolci su quelle degradabili. L'alternanza di rocce a diverso grado di erodibilità, dà luogo a morfologie costituite dall'associazione di dolci pendii, ripiani, cenge e pareti rocciose come per esempio nelle zone delle Dolomiti. Dove le formazioni sono compatte le morfologie sono tabulari e spesso delimitate da ripide scarpate e profonde incisioni; altre pareti verticali sono costituite da rocce calcaree e dolomitiche massicce (es. Paganella e Gruppo di Brenta). Le litologie arenaceo-pelitiche danno luogo a versanti dolci e poco acclivi come nel caso della parte inferiore dei versanti della Val di Non, della Val di Fassa e nel Tesino (PAT, 2006).

La selezione delle cime è avvenuta con criteri di:

- quota: non inferiore ai 2700m s.l.m.
- localizzazione: distribuzione nelle catene montuose della provincia e caratteristiche territoriali
- substrato (rocce ....)
- esposizione: possibilità di svolgere i rilievi lungo transetti esposti preferibilmente a sud
- accessibilità: difficoltà tecniche richieste limitate poiché impedirebbero un'adeguata esplorazione
- frequentazione turistica: evitate le cime con un'eccessiva presenza antropica

### **Parco Nazionale dello Stelvio**

Collocato nelle Alpi Centrali, si sviluppa lo più al di sopra dei 2000 m (tre quarti del territorio) e raggiunge un massimo di 3.905m sulla cima dell'Ortles; ospita alcune superfici glaciali di discrete dimensioni. La catena è principalmente costituita da rocce metamorfiche (gneiss, filladi, micascisti) e in minor misura da rocce ignee come i graniti.

- Cima Cavaion (3140m, rocce metamorfiche)

Cima nel settore settentrionale nella dorsale che in direzione N-S separa la Val di Pejo dalla Val di Rabbi. I versanti della vetta risultano piuttosto omogenei sia per pendenza che per le caratteristiche pietraie di roccia metamorfica.

- Cima Vallon (2892m, rocce metamorfiche)

Si trova nella parte meridionale della dorsale che fa da spartiacque tra la val di Pejo e quella di Rabbi in direzione N-S; si raggiunge percorrendo verso nord la cresta a partire da passo Cercen. Data la posizione presenta un clima meno rigido rispetto alle cime più interne.

- Zufallspitze, (3757m, rocce metamorfiche)

Punta Nord-Est del Monte Cevedale; la via percorre la cresta di sud-est che parte dalla Forcola, passo che mette in comunicazione la Val di Pejo con la Val Martello. La vetta si presenta rocciosa come tutto il percorso e di area piuttosto limitata.

- Forcola (3140m, rocce metamorfiche)

Prende il nome di 'La Forcola' (3035m) il valico che si affaccia sulla val Venezia arrivando dalla val di Pejo; il transetto di rilievo si è sviluppato a partire da questo punto e proseguendo lungo la dorsale che risale ad est fino ad incontrare la prima cima (anonima) a quota 3140m caratterizzata da pendii più ospitali rispetto alla cresta ovest.

### **Parco Naturale Adamello Brenta**

Il Parco naturale Adamello Brenta si estende nel Trentino orientale; comprende l'intero Gruppo di Brenta, formato in prevalenza da rocce dolomitiche, e una porzione considerevole dei massicci granitici/tonalitici dell'Adamello-Presanella, che preservano ancora ghiacciai.

L'estensione del territorio protetto, l'elevata escursione altitudinale, la geologia e lo stato di integrità ambientale consentono all'area di ospitare un'eccezionale varietà di ambienti e quindi di specie floristiche e faunistiche.

- Carè Alto (3462m, rocce magmatiche intrusive)

Rilievo massimo della parte meridionale del gruppo dell'Adamello, si trova sulla più orientale e estesa (50km) delle grandi dorsali nord-sud di questo gruppo che dalla val Genova si spinge a sud fin sopra a Daone.

Essa forma le creste nord e sud-ovest (scelta per il criterio di esposizione) della montagna, che scendono rispettivamente verso la vedretta di Lares e verso il passo delle Vacche. Dalla vetta scendono altre due creste: la marcata cresta est e la cresta sud est, o spigolo Garbari.

- Cima Bon (2901m, rocce magmatiche intrusive)

Cima del gruppo della Presanella, la sua parete nord/est cade a picco sulla val di Bon con pendenze costanti sui 55°-60° mentre la parete sud si affaccia sul lago Scarpacò; questa presenta sotto i 2700m pendii erbosi che salendo lasciano il posto a blocchi porfirici. L'avvicinamento è avvenuto lungo la cresta ovest.

- Cima Ghez (2713m, rocce sedimentarie)

Principale elevazione del sottogruppo SOIUSA, costituito quasi unicamente da questa cima e le sue propaggini; separa la Val d'Ambiez dal Lago di Molveno e si spinge fino all'abitato di San Lorenzo in Banale, rappresentando uno dei primi rilievi importanti a sud di questo gruppo.

Dalla vetta si estende verso Sud una cresta marcata, in parte erbosa, verso nord invece precipita in una parete rocciosa sulla *Busa di Dalun*.

- Cima Presanella (3558m, rocce magmatiche intrusive)

Montagna delle Alpi Retiche meridionali posta tra il passo del Tonale e l'abitato di Vermiglio, è la vetta più alta che si trova completamente in territorio trentino. Mentre a Sud il versante offre una facile risalita tra blocchi tonalitici, a Nord si presenta un pendio di neve e ghiaccio fino a 55°.

- Cima Susat (2890m, rocce sedimentarie)

Da Est la cima si presenta slanciata e verticale mentre da ovest non presenta difficoltà caratteristica che permettono di raggiungerla proseguendo su roccia compatta.

- Cima Tosa (3173m, rocce sedimentarie)

Massima elevazione del gruppo del Brenta, si presenta come un massiccio roccioso con alte ed impervie pareti su tutti i versanti, al quale si accorpa a Nord il Crozzon di Brenta. La caratteristica calotta glaciale sulla sua sommità è pressochè scomparsa.

## **Parco Naturale Paneveggio Pale di San Martino**

Il territorio del Parco si caratterizza geologicamente per una elevata diversità di substrati. Sulla sinistra orografica del torrente Cismon affiorano le rocce sedimentarie; mentre le rocce ignee e metamorfiche del Paleozoico si trovano nella zona occidentale del Parco.

- Cima Bocche (2714m, rocce magmatiche effusive)

Si trova al confine con il gruppo della Marmolada, la catena di Lagorai ed il Parco naturale di Paneveggio – Pale di San Martino. La vetta, raggiungibile percorrendo la dorsale sud-est, si presenta più pianeggiante e vegetata lungo il versante S-O mentre piuttosto impervia e sassosa verso nord.

- Cima Fradusta (2939m, rocce sedimentarie)

Collocata nella parte centrale delle Pale di San Martino, domina l'altopiano; la dorsale rocciosa sulla cui sommità si trova la vetta si sviluppa in direzione NE-SO. Entrambi i versanti sono caratterizzati da ripide pareti rocciose; ai piedi del Nord si trova il Ghiacciaio della Fradusta mentre a sud il Valon delle Lede che scende in Val Canali.

- Cima Vezzana (3192m, rocce sedimentarie)

La Cima della Vezzana, compresa fra il Passo del Travignolo e il Passo di Val Strut, è la vetta più elevata delle Pale di San Martino e domina la Catena Settentrionale. Al versante est caratterizzato da facili pendii detritici si oppone ad ovest la parete rocciosa verticale che si affaccia verso il vallone del ghiacciaio Travignolo.

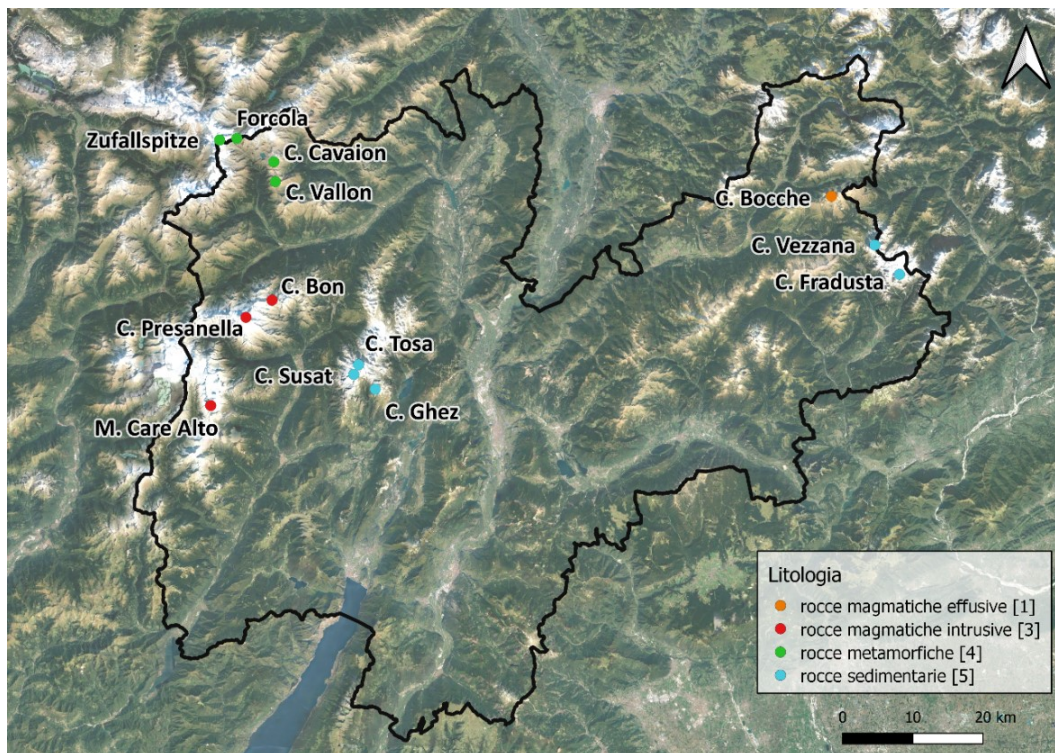


Figura 4.1: Localizzazione delle vette campionate con riferimento al tipo di roccia che le costituisce.



## 4.2 Disegno di campionamento

La selezione delle cime è avvenuta seguendo i criteri di quota, localizzazione, substrato, esposizione, accessibilità e frequentazione turistica. I rilievi floristici sono stati effettuati tramite l'applicazione 'SpecieNuove'.

Il disegno di campionamento adottato per lo studio prevede 3 fasi.

### **Campionamento in salita**

Raggiunti gli ultimi 200m dalla cima ogni 50m circa (4 transetti), compilare l'inventario delle specie presenti lungo il sentiero e nei 5 m adiacenti (a destra e sinistra).

### **Area di sommità**

Rilievo completo della vetta considerando un'area circolare (dove possibile, Fig. 4.2) di raggio 20-25m assumendo come centro un punto significativo (es. croce di vetta).



*Figura 4.2: Cima Tosa; esempio in cui non è stato possibile eseguire il campionamento di vetta in modo completo*

### 4.3 Tratti funzionali

I tratti funzionali sono caratteristiche (biologiche, anatomiche e morfologiche) proprie di un organismo che si rivelano importanti nel guidarne le risposte ai fattori ambientali che agiscono su di esso.

I tratti considerati nelle seguenti analisi sono stati selezionati in base alla possibile significatività ai fini dell'obiettivo del lavoro, alla disponibilità delle informazioni nei DataSet accessibili (BioFLor, La Flora del Monte Baldo e Flora Indicativa) ed evitando casi di ridondanza.

In vari casi si ricorre agli indici ecologici ovvero espressioni numeriche dell'ecologia di una specie rispetto ad un fattore. L'impiego di indici è vantaggioso perché permettono sinteticità nell'informazione e il confronto tra diverse situazioni. Ad esempio è stato fatto ricorso agli indici ecologici di Landolt; ideati in principio per la flora svizzera, presentano valori che variano da 1 a 5 (ANPA, 2001).

I criteri selezionati sono i seguenti:

#### **Clima**

INDICE DI TEMPERATURA: descrive un gradiente termico che va dalle specie di clima freddo, delle zone boreali e delle montagne (1) a specie di clima caldo mediterraneo (5).

INDICE CONTINENTALITA': basato sulla corologia delle specie indagate variando da specie oceaniche delle coste atlantiche (1) a specie continentali delle zone interne dell'Eurasia.

INDICE DI LUMINOSITA': varia da situazioni di piena ombra in sottoboschi chiusi (1) a piena luce (5).

#### **Suolo**

INDICE DI UMIDITA': esprime il valore medio di umidità del suolo da suoli aridi (1) a suoli inondati (5), con note per idrofite.

INDICE DI NITROFILIA: si basa sul contenuto di azoto assimilabile (NH<sub>4</sub>, NO<sub>3</sub>) e varia da suoli molto poveri di azoto (1) a suoli fertilizzati con eccesso di azoto (5).

INDICE DI HUMUS: indica la quantità di humus nella rizosfera e varia da suoli poveri (1) a suoli pingui (5).

## **Strategie**

FORME BIOLOGICHE le specie, in base alla posizione delle gemme nella pianta ed il modo in cui queste vengono protette, considerando la loro importanza per la ripresa vegetativa, sono raggruppate in sei forme biologiche: terofite (t, eliminazione delle gemme, piante annuali con superamento della stagione avversa sotto forma di seme), geofite (g, erbe perenni con gemme sotterranee portate da bulbi, tuberi o rizomi), idrofite (a, piante acquatiche totalmente o in parte immerse con gemme subacquee), emicriptofite (h, erbe bienni o perenni con gemme a livello del suolo protette da foglie), camefite (c, piccoli arbusti e suffrutici con gemme a breve distanza dal suolo < 30 cm), camefite legnose (z), fanerofite (f, alberi, grandi arbusti, liane con gemme su fusti elevati > 30 cm esposte all'aria) e nanofanerofite (n, Arbusti minori).

STRATEGIA ECOLOGICA: è stato impiegato il modello proposto da P. Grime nel 1974, secondo cui ci sono tre le principali strategie adottate dai vegetali in risposta ai fattori ambientali: competitive (c) tolleranti allo stress (s) e ruderali (r); vi sono poi situazioni intermedie.

## **Comportamento biologico**

STRATEGIA DI DISSEMINAZIONE: si distinguono diverse tipologie di disseminazione tra cui antropocoria (at, spargimento accidentale dei semi delle piante dovuta ad opera umana), autocoria (au, la pianta disperde i semi attivamente), bolocoria (bo, i semi vengono dispersi al momento della deiscenza a causa delle tensioni interne dei tessuti nel frutto), endocoria (en, tipo di zoocoria nei quali i disseminuli vengono trasportati nel tratto digestivo degli animali), epicoria (ep, la disseminazione avviene ad opera di animali che casualmente diffondono i semi rimasti aderenti al corpo), idrocoria (hy, il mezzo di spargimento è l'acqua), mirmecoria (my, la disseminazione avviene ad opera delle formiche), meteorocoria (i semi sono trasportati dagli agenti atmosferici, in particolare il vento)

SISTEMA DI RIPRODUZIONE: la tipologia di riproduzione varia a seconda della specie, essa può essere monoica (sulla stessa pianta ci sono fiori solo maschili e fiori solo femminili), dioica (i fiori sono o solo maschili o solo femminili e si trovano su piante diverse), ermafrodita (tutti i fiori sono ermafroditi e quindi presentano gineceo e androceo) o poligama (sono presenti sulla stessa pianta fiori ermafroditi e fiori unisessuali).

PROPAGAZIONE VEGETATIVA: Oltre alla propagazione sessuale (generativa) e alla dispersione con spore generative, molte specie vegetali sono in grado di propagarsi e disperdersi asessualmente (vegetativamente) tramite diverse modalità ad esempio stoloni (au), rizomi (kr), tuberi e bulbi (bz), gemme laterali (sr),..

INIZIO DELLA FIORITURA: mese in cui ha inizio la fioritura della specie;

DURATA DELLE FIORITURA: durata della fioritura in termini di mesi;

VETTORI DI POLLINE: Vettore del polline o tipo di trasferimento del polline. L'impollinazione è indipendente dalla fecondazione. I principali vettori considerati sono: vento, insetti, spontanea;

MASSA DEI SEMI: massa dei semi media per specie espressa in mg;

DOMINANZA GEOGRAFICA: descrive il grado di dominanza delle specie in un'area, varia da 1 (isolata) a 5 (dominante, presente su una vasta superficie).

### **Presenza**

GRUPPO ECOLOGICO: indice riguardante l'ecologia della specie nei diversi ambienti, assume valori da 1 (piante di foresta) a 8 (piante di prateria);

INFLUENZA ANTROPICA: esprime il contributo dell'azione umana nella diffusione della specie; varia da 1 (strettamente naturale, urbanofobo) a 5 (specie aliene, rigorosamente urbanofile).

Oltre a questi tratti, per ogni specie è stata indicata l'eventuale presenza in **Lista Rossa** (Red List). Questa rappresenta un elenco di specie più o meno minacciate ed estinte, utile al fine di perseguire un'adeguata gestione della biodiversità vegetale e spontanea; in Trentino le specie iscritte a questo elenco sono 825, rappresentando ben il 32% della flora spontanea. (Prosser F. et al., 2019). Esse vengono classificate, a seconda della categoria di rischio in categorie: EX- Extincted (estinto), CR-Critically endangered (gravemente minacciato), EN – Endangered (minacciato), VU – vulnerable (vulnerabile), LR-Lower risk (a basso rischio), NT – Near Threatened (quasi minacciato) e DD-Data Deficient (dati insufficienti).

#### 4.4 Analisi statistiche

I dati sono stati raccolti sul campo tramite l'applicazione SpecieNuove un'applicazione Android per la raccolta di dati floristici nelle province di Trento e Verona. Questa applicazione, progettata e sviluppata internamente dalla Sezione Botanica della Fondazione Museo Civico di Rovereto, sostituisce le schede di campo cartacee, rendendo più precisi i rilevamenti e più rapida l'immissione dei dati nei database locali; permette inoltre un controllo dei dati sulla base delle informazioni pregresse, segnalando potenziali errori già sul campo prima dell'inserimento. Questo è reso possibile all'attività di cartografia floristica svolta dal Museo Civico di Rovereto che dal 2004 si è anche occupato di trasferire l'intero archivio (dal 1992) di dati floristici disponibili in GIS (Prosser F., 2019).

L'applicazione consente la produzione di un file Excel contenente, per ogni rilievo floristico eseguito, informazioni riguardanti la localizzazione (e relativa precisione), il riferimento temporale, i determinanti ed eventuali note (Andreatta S. et al., 2017).

I dati grezzi (3743 record) sono stati poi riorganizzati in un foglio Excel in cui sono state assegnate le informazioni riguardanti: nome della specie rilevata, data di rilievo, cima, tipo di suolo, numero del transetto con i relativi limiti di quota, coordinate, ora ed eventuale quota di rilievo.

In una prima fase sono stati individuati eventuali errori di campionamento (es. specie rilevate più volte nell'ambito di un transetto) e sono state verificate ed eventualmente ridefinite (a causa di errori strumentali) le quote limite di ogni transetto tramite software GIS e i Modelli Digitali del Terreno (DTM) della Provincia di Trento.

Conclusa questa fase ad ogni specie sono stati associati i tratti funzionali selezionati, estratti dalle seguenti dataset:

- BiolFlor: un database di tratti biologici ed ecologici delle piante vascolari in Germania risultato di un progetto condotto dal 'Department of Community Ecology' (UFZ - Centre for Environmental Research);
- Flora del Monte Baldo: raccolta di dati relativi a piante vascolari appartenenti alla flora del Monte Baldo redatta da Filippo Prosser nel 2009;
- Flora Indicativa: database dei valori ecologici e caratteristiche biologiche della flora svizzera e alpina (2010).

Per ogni cima i dati sono stati raggruppati quindi per transetto ricavando il numero totale di specie rilevate, eventuali specie in Lista Rossa, le percentuali delle forme biologiche delle specie presenti, strategie ecologiche e la media degli indici ecologici di Landolt ottenendo così una prima descrizione delle comunità per transetto per vetta.

Sulla base di questa sintesi con il software Excel sono state svolte le prime analisi, caratterizzando i tratti tipici della flora degli ambienti alpini (numero di specie, eventuali in Lista Rossa, altezza media, massa dei semi, forma biologica, sistema di riproduzione, di disseminazione e di propagazione vegetativa, durata e inizio fioritura, vettori di polline caratteristici, strategia di competizione, indice di dominanza, di influenza antropica e di Landolt) e studiandone le variazioni lungo la quota (corrispondente l'estremo inferiore del transetto) e in funzione del tipo di substrato calcareo/siliceo.

Nel caso della variabile indipendente continua (quota) partendo da grafici a dispersione si sono individuate le linee di tendenza per meglio evidenziarne gli effetti; il tipo di funzione è stata scelta in base al criterio di maggior rappresentanza dei dati.

Dal dataset di partenza sono state selezionate le specie per cui si disponeva di almeno 10 record (rilevate almeno 10 volte sul campo); per queste specie (N= 103) è stato calcolato con la funzione density di R il leading edge, margine freddo della distribuzione, ovvero il 90-esimo percentile della distribuzione di probabilità. Partendo da questi si sono ricercate possibili relazioni tra il leading edge (in ordinata), e i diversi tratti funzionali (vettore di polline, massa dei semi, indice di dominanza, di influenza antropica e di Landolt, strategia competitiva, gruppo ecologico e forme biologiche). Anche in questo caso sono state tracciate le linee di tendenza.

## 5 RISULTATI

### 5.1 Descrizione dei tratti funzionali delle comunità di flora alpina d'alta quota

#### Numero di specie

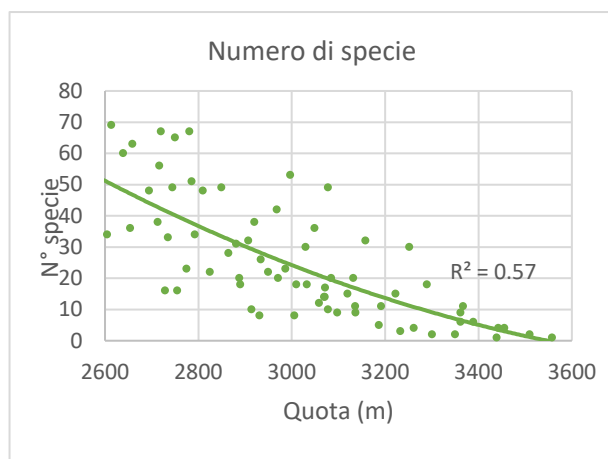


Figura 5.1: Relazione tra il numero di specie rilevate nei transetti e la quota (limite inferiore del transetto). Numero di specie considerate  $N = 253$ , numero transetti considerati  $N = 74$ ; ogni punto rappresenta un transetto.

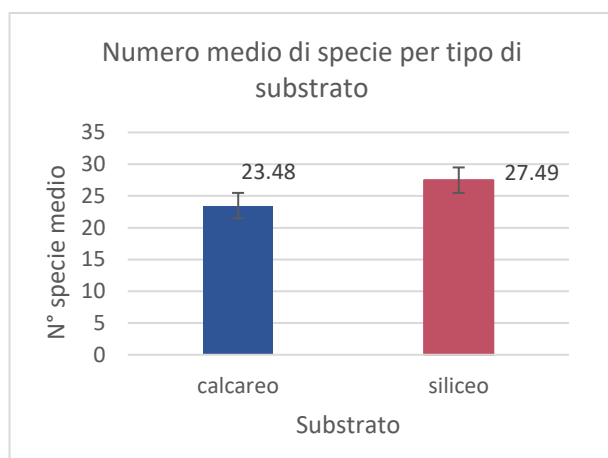


Figura 5.2: Relazione tra il numero medio di specie per tipo di substrato. Numero delle specie considerate  $N = 253$

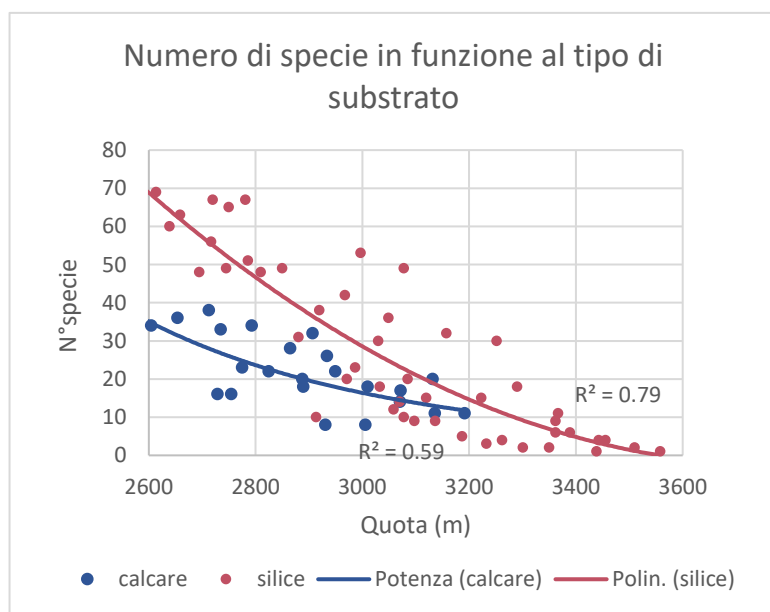


Figura 5.3: Relazione tra il numero di specie, suddivise per tipo di substrato, rilevate nei transetti e la quota (limite inferiore del transetto). Numero di specie considerate  $N = 253$ , numero transetti silicei  $N_s = 49$ , numero transetti calcarei  $N_c = 25$

Il numero di specie rilevato per transetto diminuisce significativamente con l'aumentare della quota fino alla completa sparizione di specie a quota 3600m s.l.m. (Fig. 5.1).

Lo stesso andamento si osserva distinguendo il numero di specie rilevato in funzione al tipo di substrato (Fig. 5.3) ma risulta più accentuato nel caso del substrato siliceo. Inoltre, si può osservare che il numero di specie su substrato siliceo è mediamente più elevato (Fig. 5.2). Bisogna considerare la mancanza di disponibilità di dati per il substrato calcareo oltre la soglia di 3200m s.l.m. poiché non sono presenti vette calcaree in Provincia di tali elevazioni ed è bene precisare che il numero dei transetti considerati per substrato calcareo non è pari a quelli del substrato siliceo.



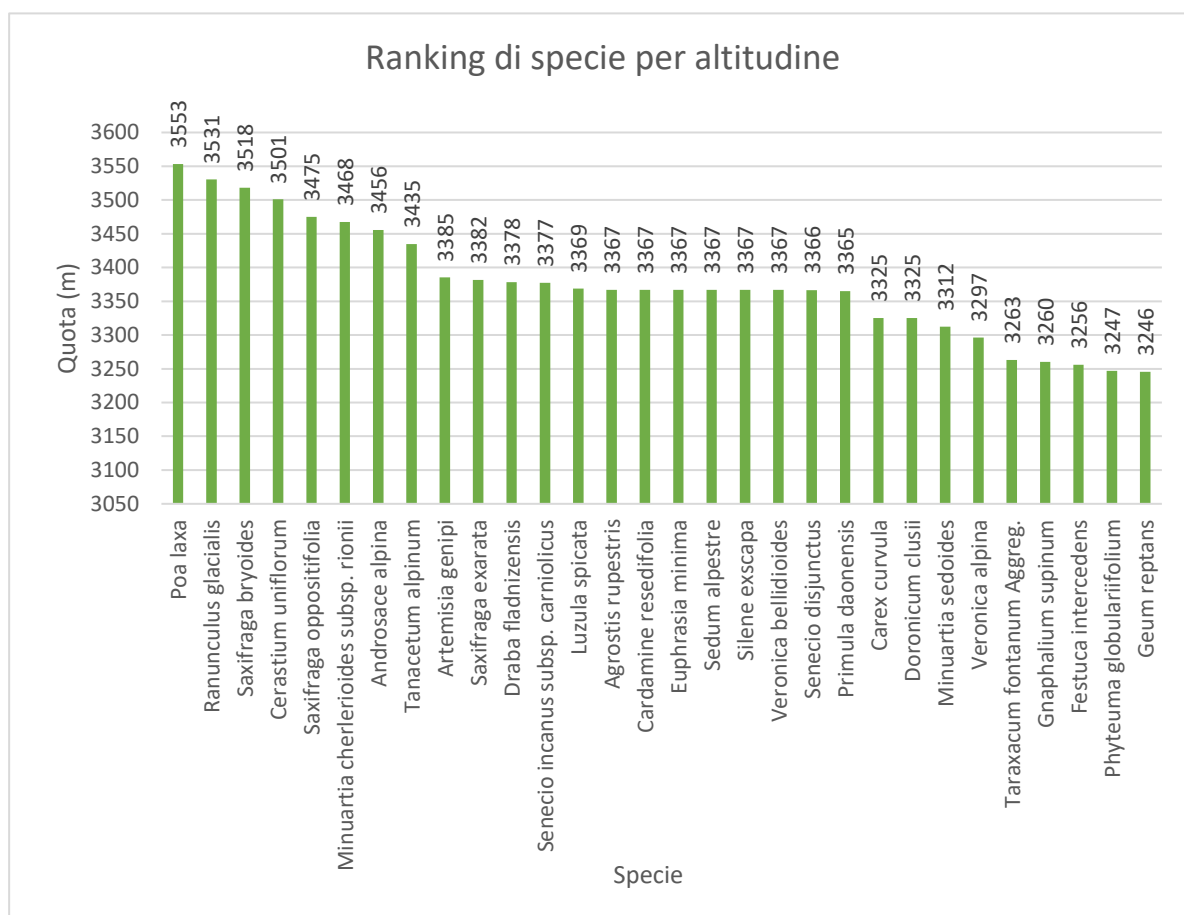


Figura 5.4: in figura sono rappresentate, in relazione alla quota, le 30 specie rilevate hanno raggiunto le elevazioni superiori nell'ambito delle 13 cime campionate.

In Fig. 5.4 sono riportate le 30 specie che hanno raggiunto le quote più elevate; si nota che la specie che ha raggiunto i margini superiori è la *Poa laxa* (quota: 3553m), rilevata sulla vetta della Presanella.



Figura 5.6: *Androsace alpina*, Forcola (silice)



Figura 5.5 *Saxifraga bryoides*, C. Presanella (silice)

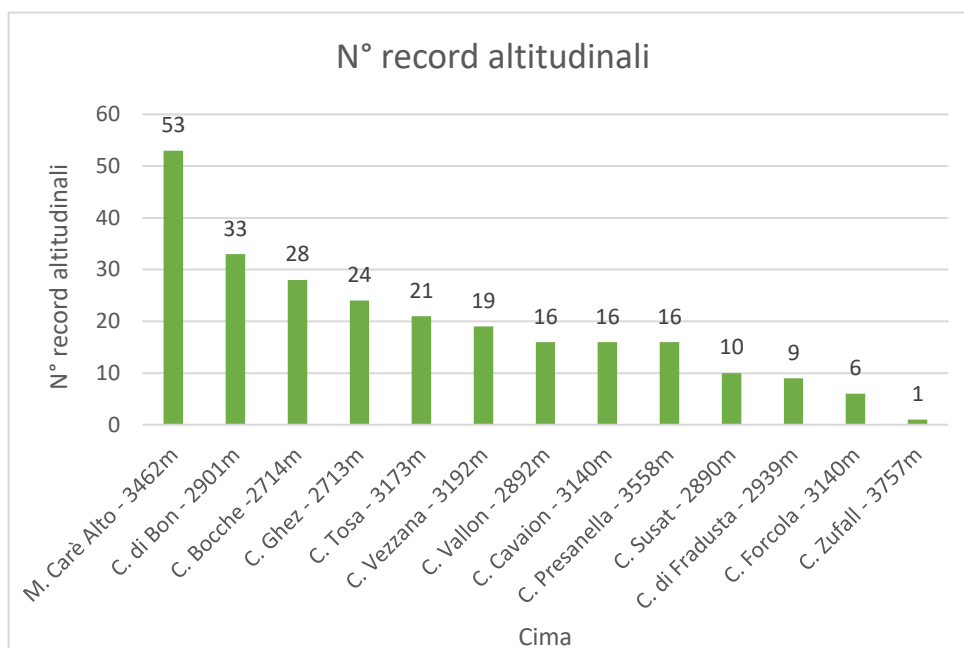


Figura 5.7: Numero di record altitudinali di specie rilevati per cima

Durante il rilevamento sono stati scoperti 252 record di specie provinciali; nonostante non tutte queste cime siano state campionate in precedenza con un protocollo di campionamento come quello adottato, si tratta comunque di importanti novità in quest'ambito. La cima che ha portato alla scoperta di più record, come da atteso, è il Carè Alto con 53 specie (Fig. 5.7); si tratta di un'elevazione considerevole con buona esposizione e posizione più meridionale rispetto agli altri rilievi eseguiti (si deducono temperature medie superiori rispetto alle medie di tali quote). Viceversa, la cima Zufall, caratterizzata da condizioni più rigide anche per la posizione, ha portato al rilievo di un solo record, dato coerente anche con la ricchezza vegetale riscontrata.

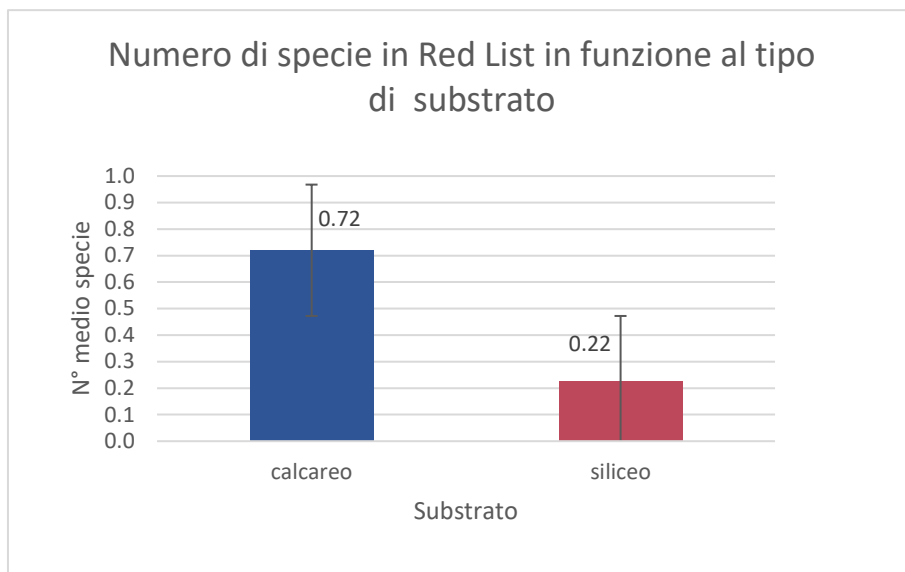


Figura 5.8: Relazione tra il numero medio di specie in Red List per tipo di substrato. Numero delle specie considerate  $N=8$

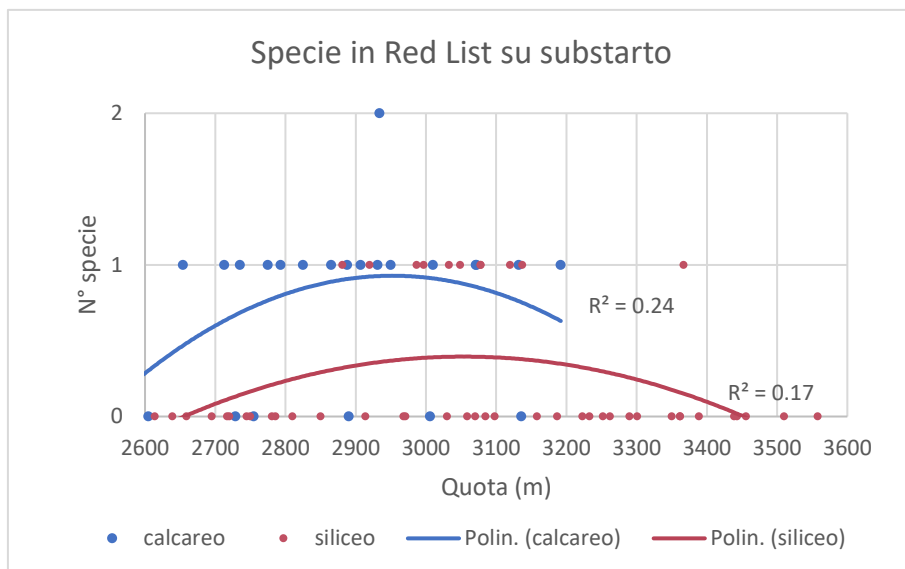


Figura 5.9: Relazione tra il numero di specie in Red List nel transetto per tipo di substrato e la quota (limite inferiore del transetto). Numero delle specie in Red List considerate  $N=8$

Mediamente il numero di specie in RedList è più elevato in ambienti con substrato calcareo (0,7 specie) piuttosto che siliceo (0,2 specie) (Fig. 5.8). Riguardo alla variazione in funzione della quota in entrambi i casi si osserva lo stesso trend (Fig. 5.9): un aumento delle specie in RedList seguito da un declino a circa -300m di quota rispetto alla vetta di massima elevazione caratterizzata da quel substrato.

## Comportamento biologico

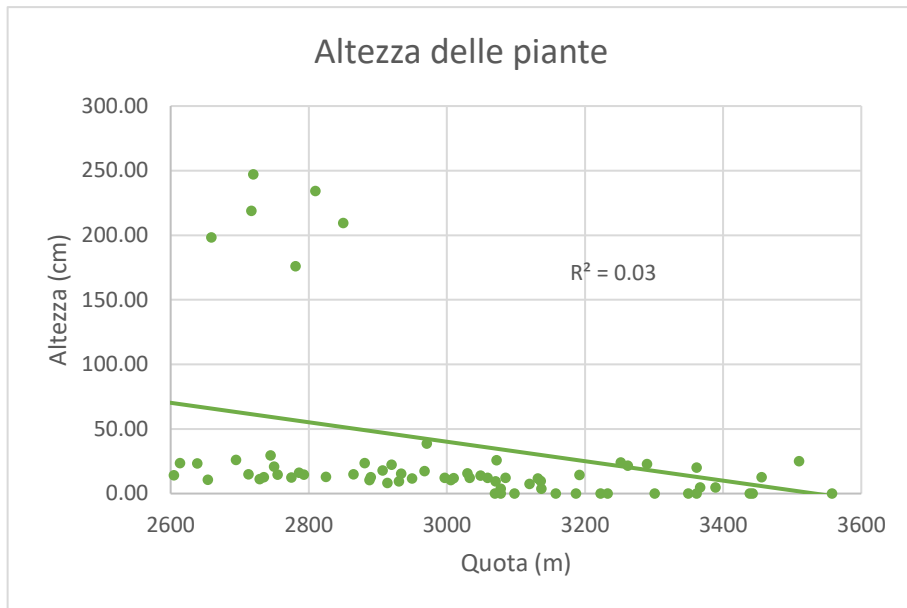


Figura 5.10: Altezza delle specie vegetali media per transetto in relazione alla quota (limite inferiore del transetto). Ogni punto rappresenta un transetto. Numero delle specie considerate  $N=109$

L'altezza media delle specie rilevate per transetto diminuisce con l'aumentare della quota evidenziando una relazione negativa (Fig. 5.10). Le quote massime presentano valori di altezza media inferiori ai 20cm mentre i valori più elevati ottenuti nelle fasce altitudinali inferiori sono dovuti alla presenza in specie arboree come ad esempio *Larix decidua*. Il fattore quota spiega il 3% della variabilità legata all'altezza.

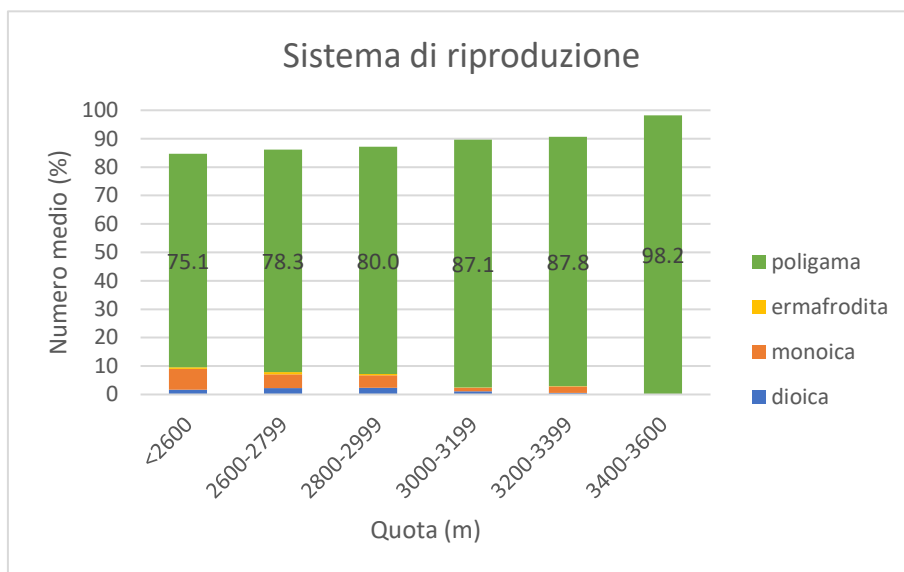


Figura 5.11: Relazione tra la quota (intervallo) e la percentuale media di specie con un dato sistema di riproduzione. Numero delle specie considerate N=246

Per quanto riguarda il sistema di riproduzione ad ogni quota prevale la strategia poligama, caratteristica di specie con presenti sulla stessa pianta sia fiori ermafroditi che unisessuali; questa assume importanza in termini di percentuale rispetto al pool considerato con l'aumentare della quota (Fig. 5.11) mentre sono sfavoriti i sistemi di riproduzione monoica, dioica e ermafrodita.

In alta quota le strategie di disseminazione prevalenti sono bolocoria e metereocoria (Fig. 5.12); delle due solo quest'ultima diventa più rappresentata nei pool di specie rilevati con l'aumentare della quota fino ad essere la strategia di disseminazione caratteristica del più del 40% delle specie superati i 3300m. Con la maggior altitudine è maggiore anche la percentuale di specie con disseminazione autocora.

Tra i metodi di propagazione vegetativa i prevalenti in questi ambienti sono: per gemme laterali, tappezzante (per talea) e tramite stoloni (fig. 5.13). Alle quote più estreme sembra siano favorite le specie con propagazione vegetativa tramite gemme laterali e che si riproducono per talea.

È sempre bene considerare anche la rarefazione dei dati che si riscontra a quote superiori ai 3400m s.l.m. .

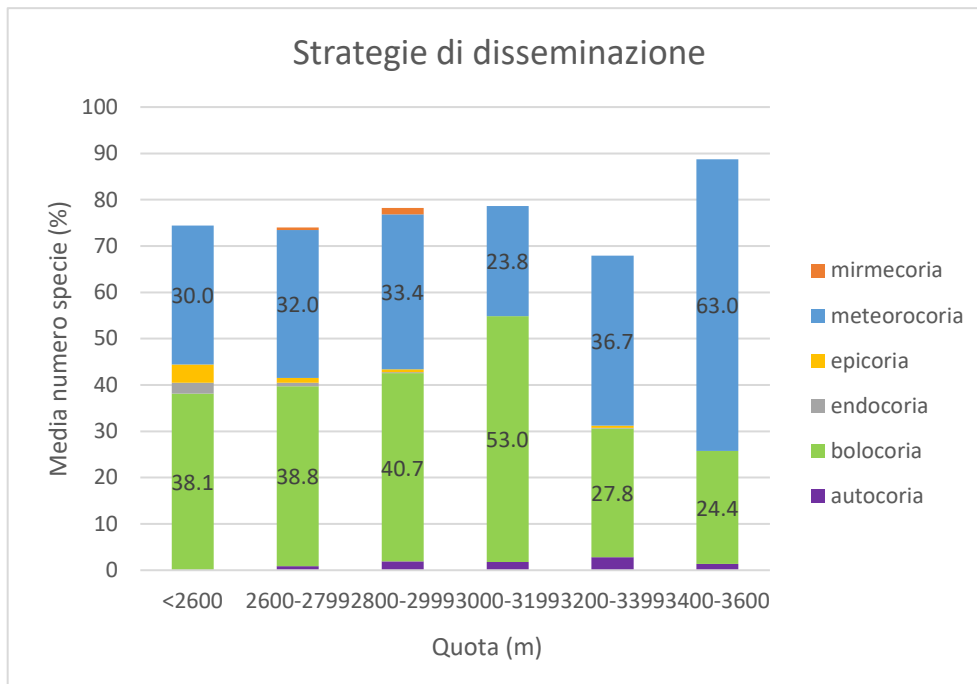


Figura 5.12: Variazioni della strategia di disseminazione adottata dalle specie al variare della quota (per intervallo). Numero di specie considerate N=246

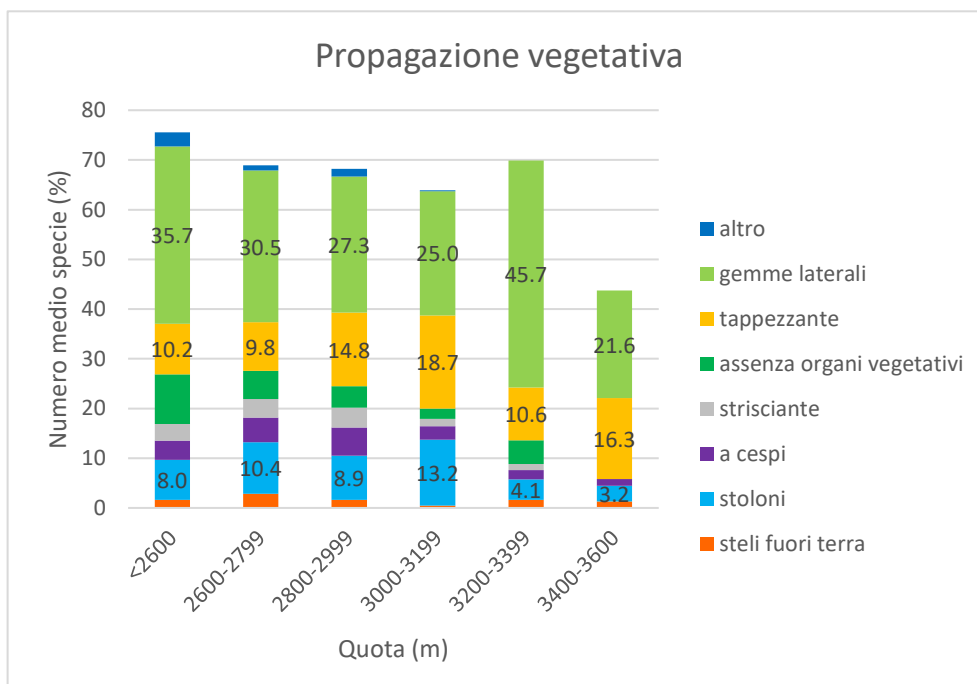


Figura 5.13: Tipologie di propagazione vegetativa adottata dalla specie in relazione alla quota (intervallo). Numero delle specie considerate N=246

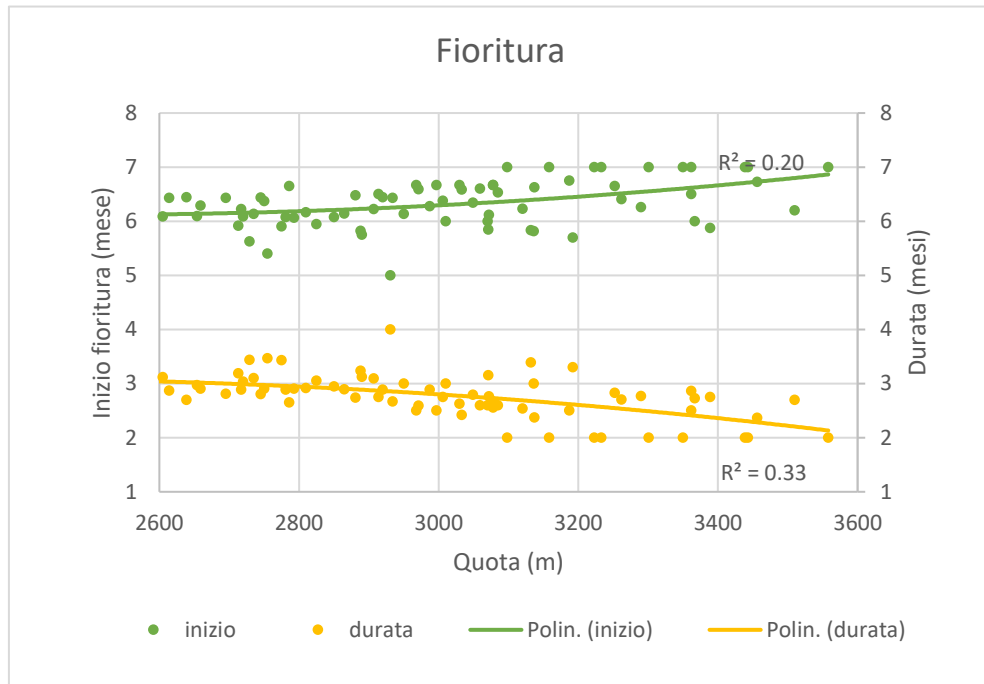


Figura 5.14 Mese di inizio medio e durata media della fioritura delle specie vegetali nel transetto in funzione alla quota (limite inferiore del transetto). Numero delle specie considerate  $N=215$

Per quanto riguarda la fioritura i dati rilevati hanno confermato quanto previsto (Fig. 5.14). Con l'aumentare della quota l'inizio della fioritura è posticipato: mentre a quota 2600m le specie fioriscono mediamente nel mese di giugno, a 3600m questo momento è posticipato di circa 30 giorni. Si osserva inoltre una relazione negativa tra le quota e la durata della fioritura; queste si estende mediamente a 3 mesi a quota 2600m mentre è ridotta 2 mesi a 3600m.

Si osserva (Fig. 5.15) che le modalità di dispersione del polline più importanti per le specie in ambiente alpino siano il vettore insetti e vento. Con il progredire della quota assume maggior rilievo il vettore vento.

La massa media dei semi per transetto delle specie vegetali rilevate (Fig. 5.16) diminuisce salendo con la quota variando da più di 0,60mg a 2600m a meno di 0,30mg a 3600m. Il fattore quota spiega il 40% della variabilità della massa dei semi.





## Presenza

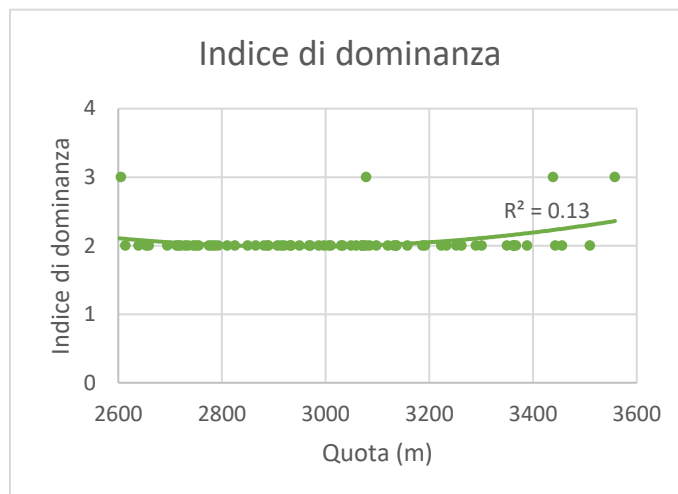


Figura 5.17 Indice di dominanza delle specie medio per transetto in relazione alla quota (limite inferiore del transetto). Ogni punto rappresenta un transetto. Numero di specie considerate  $N=246$

L'indice di dominanza (Fig.5.17) risulta abbastanza stabile in tutta la fascia di rilievo e pari a 2 espressione di una situazione in cui le specie tendono ad essere isolate o organizzate in piccoli gruppi; solo in rari casi tendono a stabilizzarsi in gruppi più grandi (3). Questa tendenza potrebbe cambiare in futuro con la variazione delle condizioni.

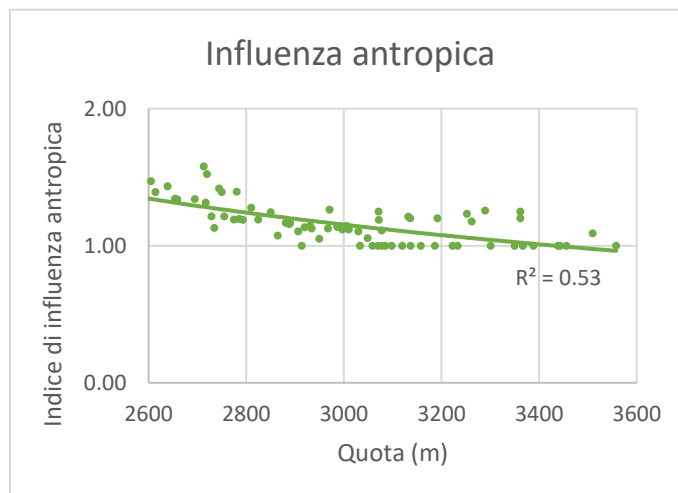


Figura 5.18: Indice di influenza antropica medio per transetto in relazione alla quota (limite inferiore del transetto). A ogni punto corrisponde un transetto. Numero delle specie considerato  $N=246$

L'indice di influenza antropica (fig. 5.18) mostra un trend in sensibile diminuzione con l'aumentare della quota confermando una sempre minore influenza antropica nella distribuzione delle specie al progredire ma la variazione non è significativa oscillando attorno al valore 1, corrispondente a specie strettamente naturali (di ambienti non urbanizzati).

## Strategie

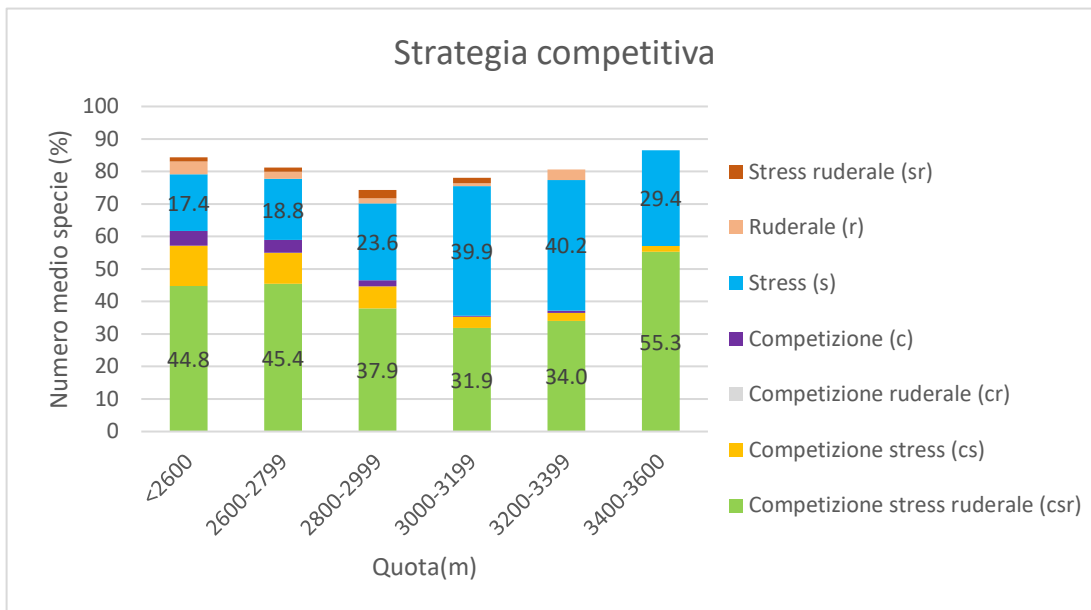


Figura 5.19: Numero di specie (%) e strategia di competizione associata media per intervallo di quota. Numero delle specie considerate  $N=203$

Riguardo alla strategia competitiva, le specie d'alta quota presentano per lo più modalità intermedie (csr), dove competizione, tolleranza allo stress e ruderale (condizioni di alto disturbo) influiscono in ugual modo o con strategia prevalente tolleranti lo stress. Queste diventano le uniche protagoniste alle quote più estreme dove invece si riscontra un calo delle specie con strategia legata alla competizione (Fig. 5.19).

## Indici Landolt

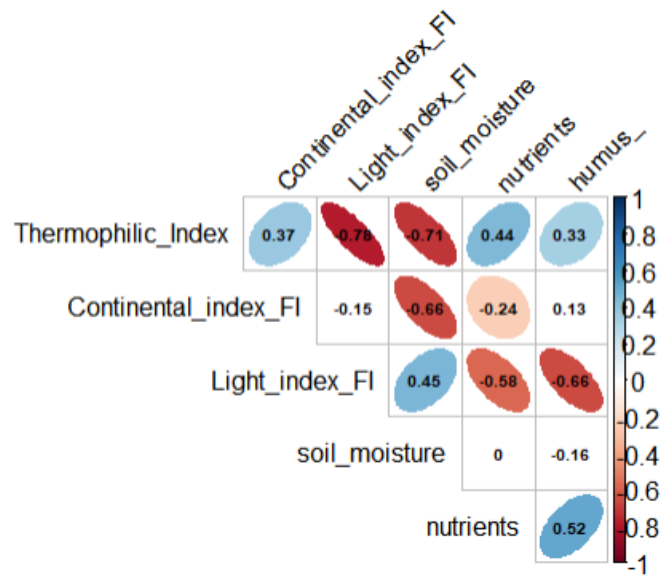


Figura 5.20: correlazione tra gli indici di Landolt

Dall'analisi della correlazione tra gli Indici Landolt (Fig. 5.20) emerge che la maggior parte di essi covariano con la quota: ad esempio si ricava una relazione stretta negativa tra dell'indice di temperatura e gli indici di luminosità e umidità; all'aumentare invece dell'indice di luminosità si verifica una diminuzione degli indici di nitrofilia e humus.

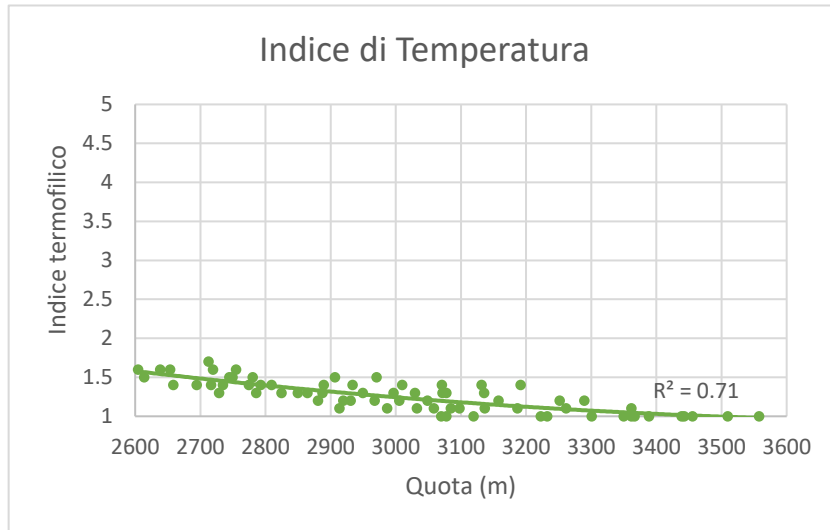


Figura 5.21: Media dell'indice termofilico per transetto al variare della quota (limite inferiore del transetto). Ogni punto rappresenta un transetto. Numero delle specie considerate N=246

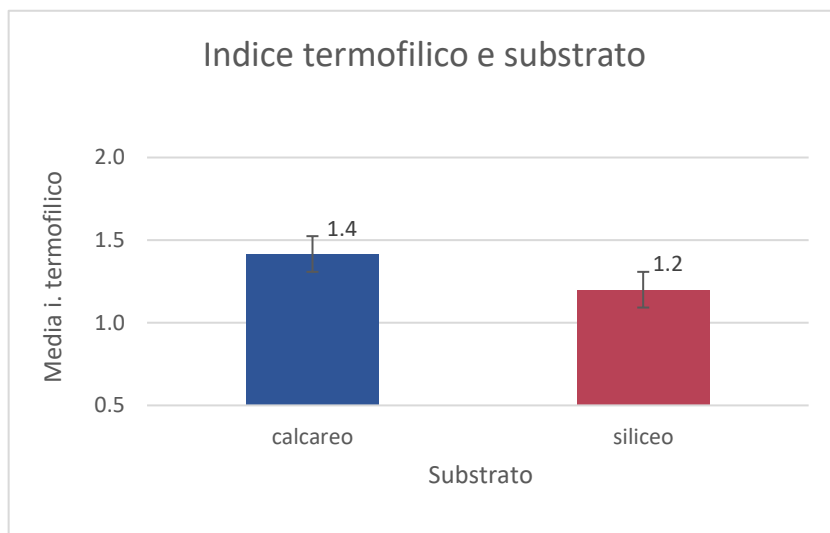


Figura 5.22 Indice termofilico medio per tipo di substrato. Numero di specie considerate N=246

L'indice di temperatura diminuisce con la quota (Fig. 5.21) spostandosi da un valore di 1,5 corrispondente a specie di fasce basso alpine e subalpine superiori, ad 1, indicativo di specie alpine e nivali. È probabile che a lungo andare anche questo trend sarà influenzato dalla variazione delle caratteristiche ambientali accentuandosi o traslando verso valori superiori. Il confronto tra le medie dell'indice termofilico di specie su substrato calcareo e siliceo non è marcata, mostra valori leggermente più alti per il substrato calcareo (Fig. 5.22).

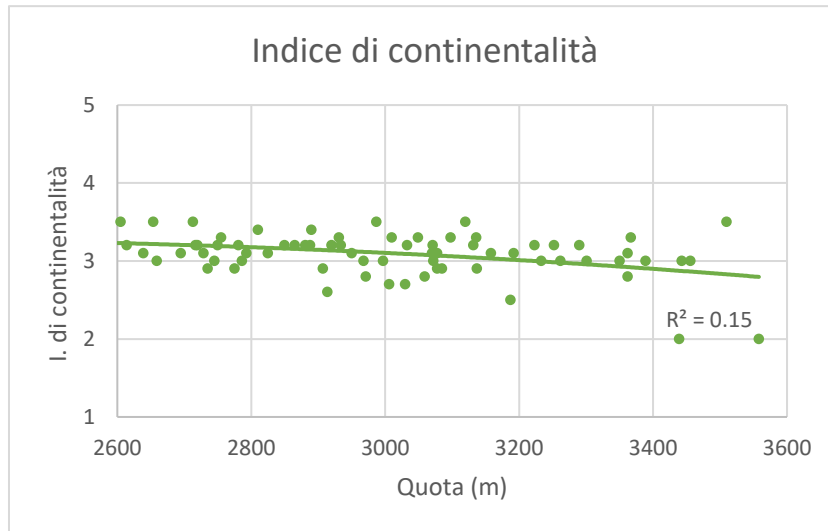


Figura 5.23: Media dell'indice di continentalità per transetto al variare della quota (limite inferiore del transetto). Ogni punto rappresenta un transetto. Numero delle specie considerate  $N=246$

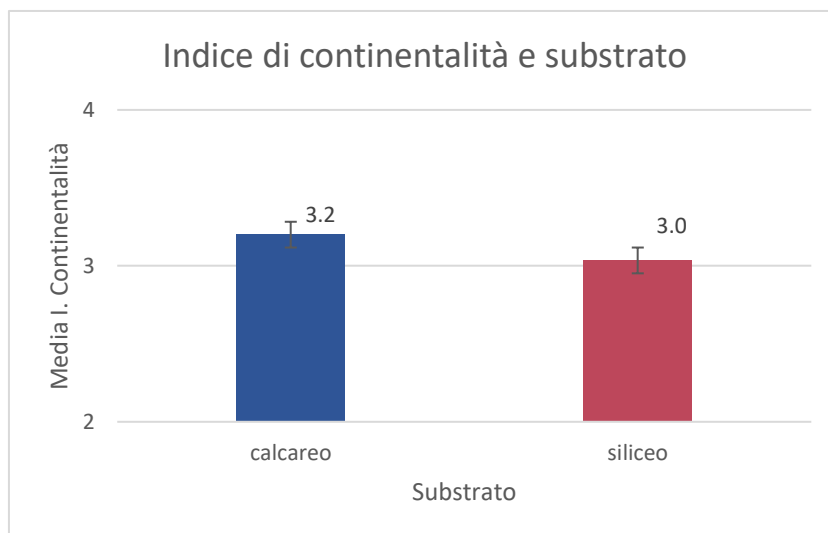


Figura 5.24: Indice di continentalità medio per tipo di substrato. Numero di specie considerate  $N=246$

L'indice di continentalità tende a decrescere con la quota (Fig. 5.23) spostandosi da un valore poco al di sopra di 3 (suboceanico-subcontinentale) a uno di poco inferiore.

Il confronto tra le medie dell'indice di continentalità di specie su substrato calcareo e siliceo non è significativa, mostra valori leggermente più alti per il substrato calcareo (Fig. 5.24).

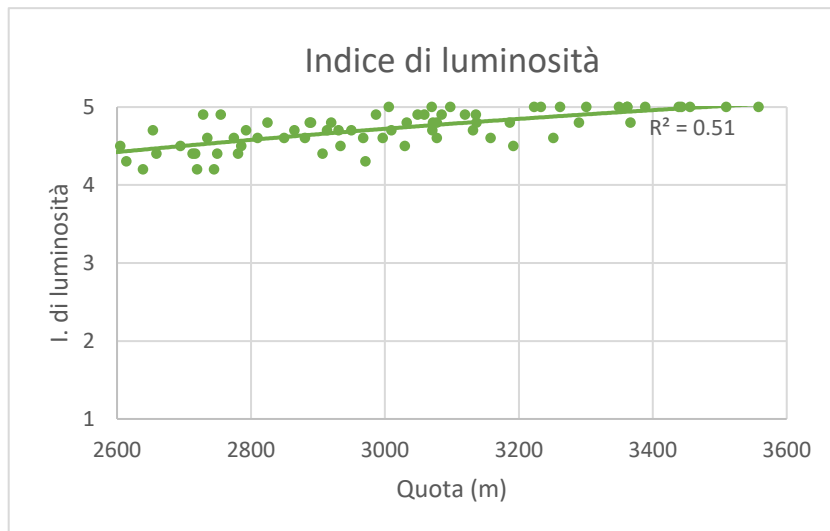


Figura 5.25: Indice di luminosità medio per transetto al variare della quota (limite inferiore del transetto). Ogni punto rappresenta un transetto. Numero delle specie considerate  $N=246$

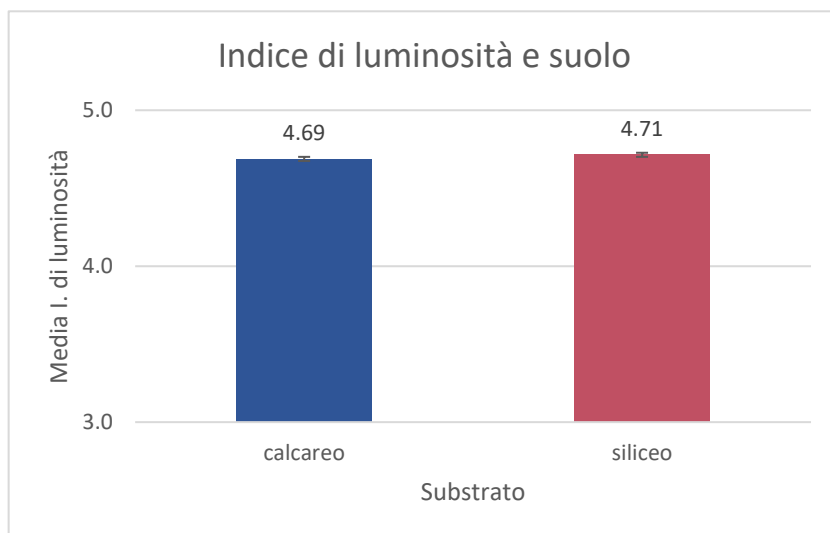


Figura 5.26: Indice di luminosità medio per tipo di substrato. Numero di specie considerate  $N=246$

Le specie della fascia alto-alpina sono caratterizzate da indici di luminosità elevati; il valore di 4, più rappresentativo delle specie a quote intorno ai 2600m è associato ad ambienti luminosi mentre '5' che si raggiunge a quota 3600m ad ambienti molto luminosi (Fig. 5.25). In questo caso il substrato non risulta influenzare l'indice di luminosità associato alle specie rilevate (Fig. 5.26).

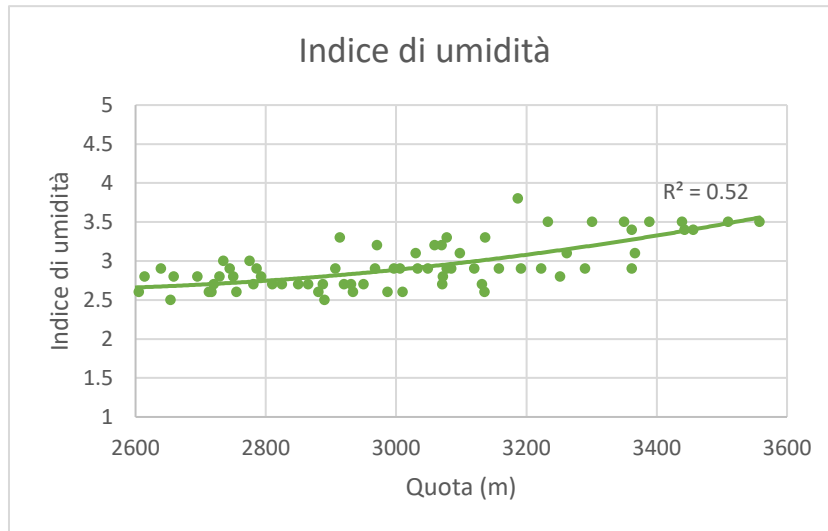


Figura 5.27: Indice di umidità medio per transetto al variare della quota (limite inferiore del transetto). Ogni punto rappresenta un transetto. Numero delle specie considerate  $N=246$

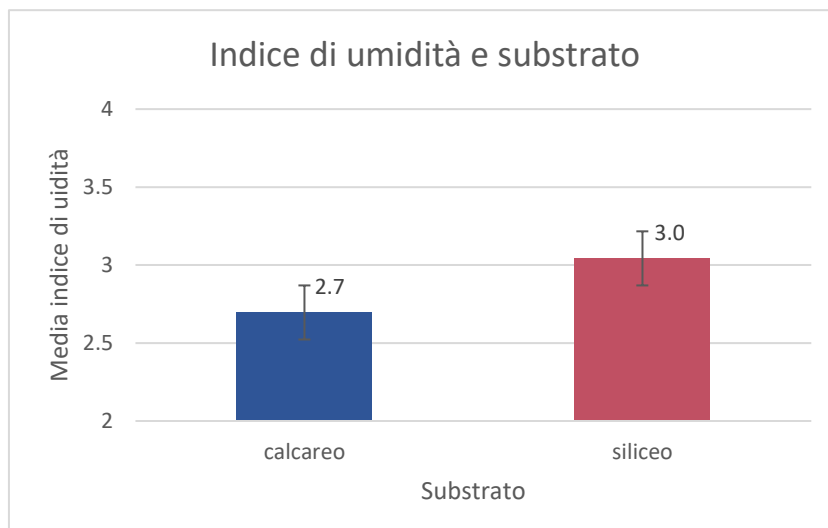


Figura 5.28: Indice di umidità medio per tipo di substrato. Numero di specie considerate  $N=246$

L'indice di umidità varia al progredire della quota, aumentando da 2.5 (suoli freschi) a quota 2600m a 3.5 (suoli umidi) a quota 3600m (Fig. 5.27). Si nota una media dell'indice di umidità di poco superiore (+0,3) nel caso delle specie cresciute su substrato siliceo (Fig. 5.28), a segnalare la presenza di habitat più umidi.

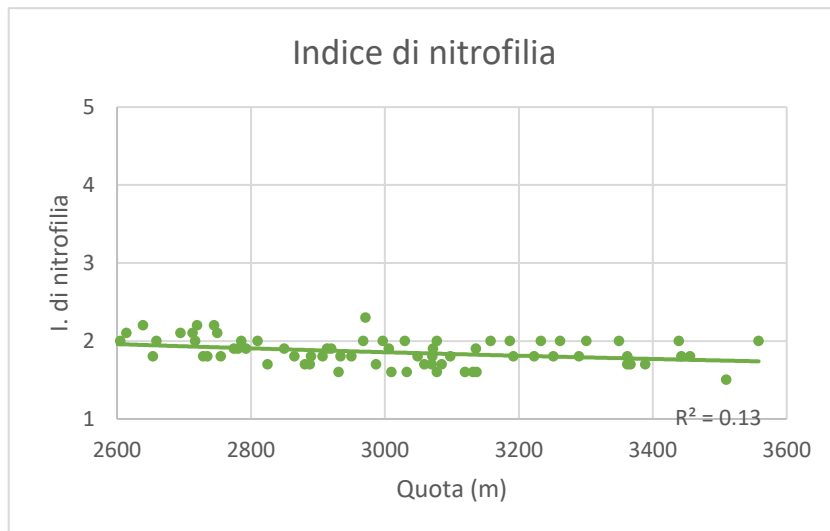


Figura 5.29: Indice di nitrofilia medio per transetto al variare della quota (limite inferiore del transetto). Ogni punto rappresenta un transetto. Numero delle specie considerate  $N=246$

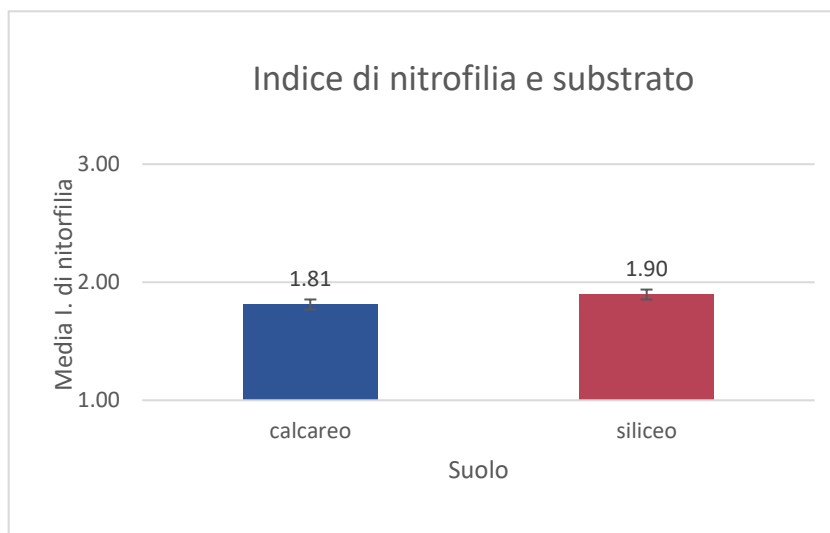


Figura 5.30: Indice di nitrofilia medio per tipo di substrato. Numero di specie considerate  $N=246$

Per quanto riguarda l'indice di nitrofilia associato alle specie si osserva una lieve diminuzione con il salire di quota; i valori si aggirano comunque attorno al valore 2, ovvero specie colonizzatrici di suoli poveri di nutrienti (Fig. 5.29).

Anche in questo caso il tipo di substrato non apporta contributi importanti alla variabilità dell'indice (Fig. 5.30).



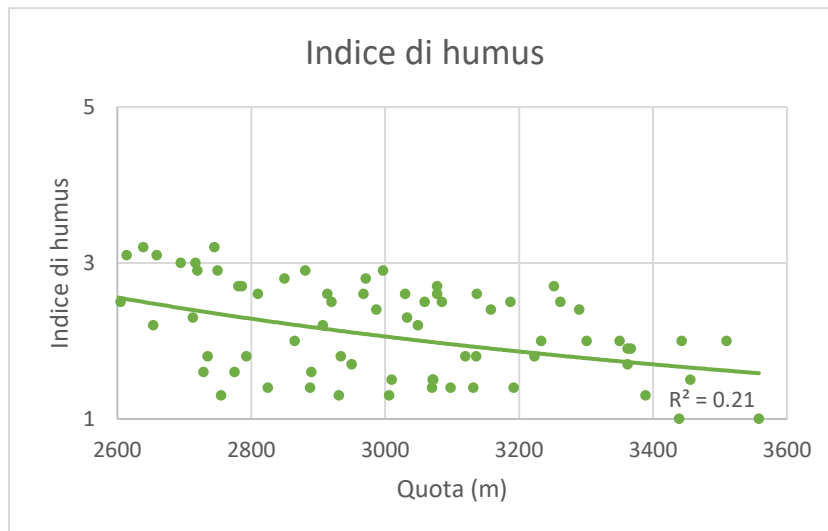


Figura 5.31: Media dell'indice di humus per transetto al variare della quota (limite inferiore del transetto). Ogni punto rappresenta un transetto. Numero delle specie considerate  $N=246$

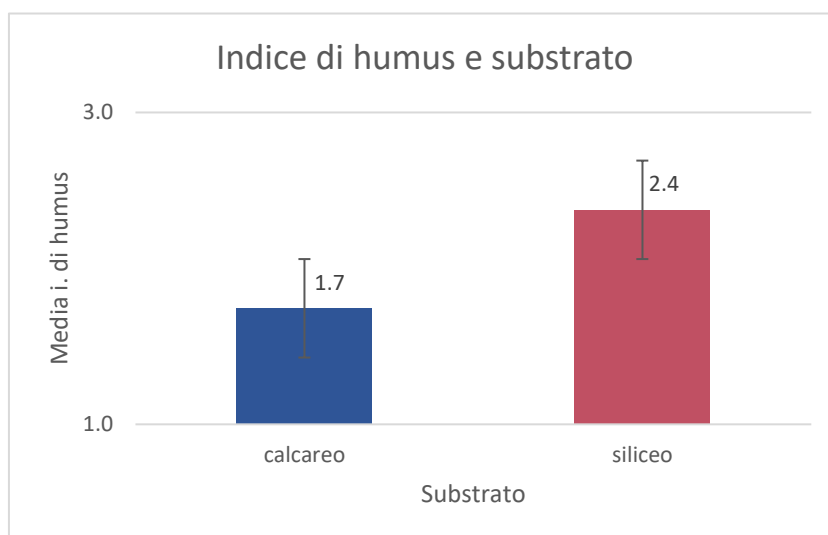


Figura 5.32: Indice di humus medio per tipo di substrato. Numero di specie considerate  $N=246$

L'indice di humus decresce progressivamente con la quota (fig. 5.31); a 2600m s. l. m. i valori dell'indice si avvicinano a 3, situazione in cui le specie sono adattate a suoli con un contenuto medio di humus. A 3600m, invece, si trovano specie colonizzanti suoli estremamente poveri di humus (1).

I suoli silicei ospitano specie che mediamente prediligono una maggior quantità di humus nel suolo (Fig. 5.32).



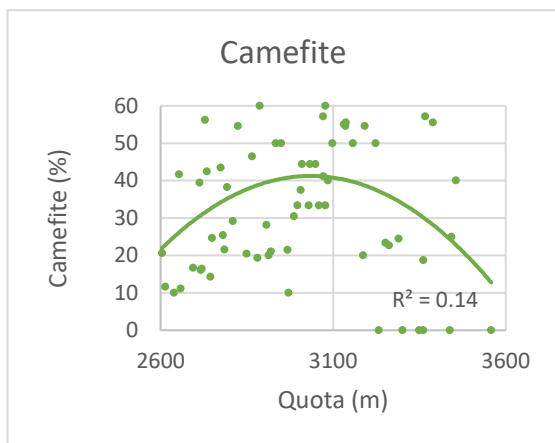


Figura 5.36: Relazione tra il numero percentuale di specie camefite rilevate nei transetti e la quota (limite inferiore del transetto). Numero totale di specie considerate  $N = 247$ , numero camefite  $N_c = 52$

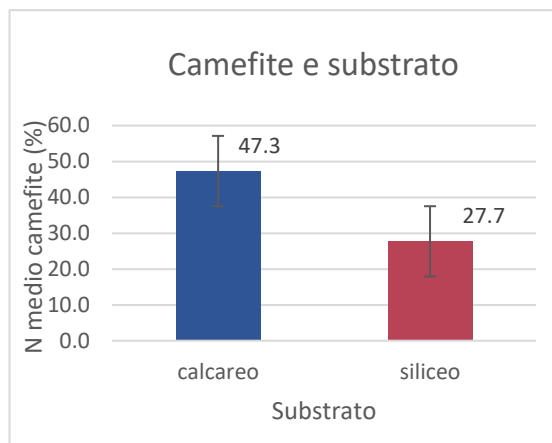


Figura 5.35: Relazione tra il numero medio (%) di specie camefite per tipo di substrato. Numero delle specie considerate  $N = 247$ , numero camefite  $N_c = 52$

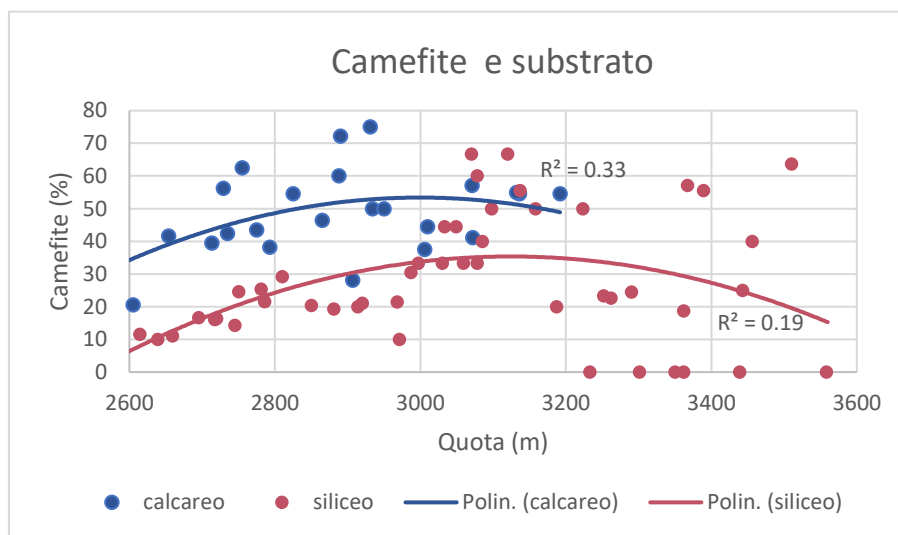


Figura 5.37: Numero percentuale di specie camefite in relazione alla quota e al tipo di substrato. Numero specie considerate  $N = 247$ , numero camefite  $N_c = 52$

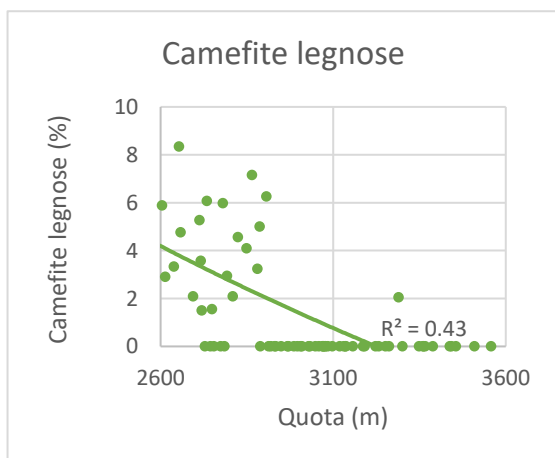


Figura 5.39: Relazione tra il numero percentuale di specie camefite legnose rilevate nei transetti e la quota (limite inferiore del transetto). Numero di specie considerate  $N = 247$ , numero di camefite legnose  $N_z = 15$

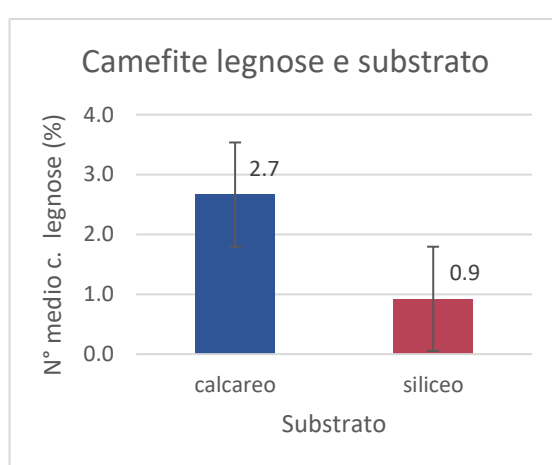


Figura 5.38: Relazione tra il numero medio (%) di specie camefite legnose per tipo di substrato. Numero delle specie considerate  $N = 247$ , numero di camefite legnose  $N_z = 15$

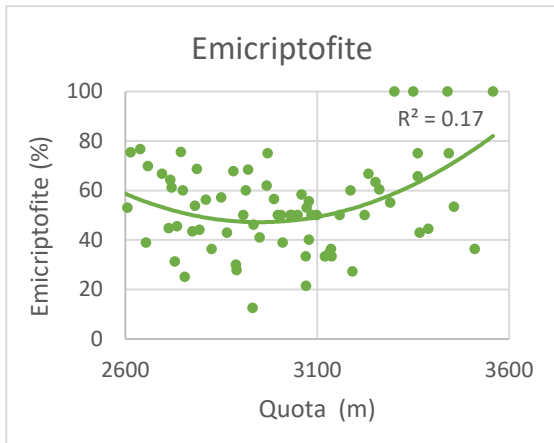


Figura 5.41: Relazione tra il numero percentuale di specie emicriptofite rilevate nei transetti e la quota (limite inferiore del transetto). Numero di specie considerate  $N = 247$ , numero di emicriptofite  $N_h = 146$

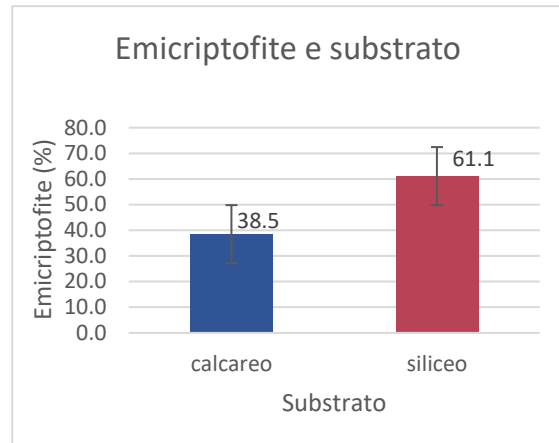


Figura 5.40: Relazione tra il numero medio (%) di specie emicriptofite per tipo di substrato. Numero delle specie considerate  $N = 247$ , numero di emicriptofite  $N_h = 146$

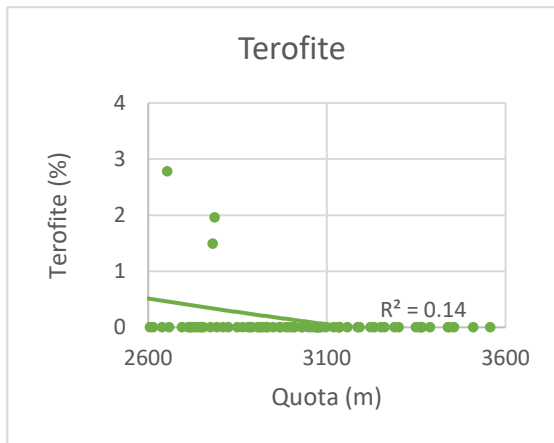


Figura 5.43: Relazione tra il numero percentuale di specie terofite rilevate nei transetti e la quota (limite inferiore del transetto). Numero di specie considerate  $N = 247$ , numero di terofite  $N_t = 2$

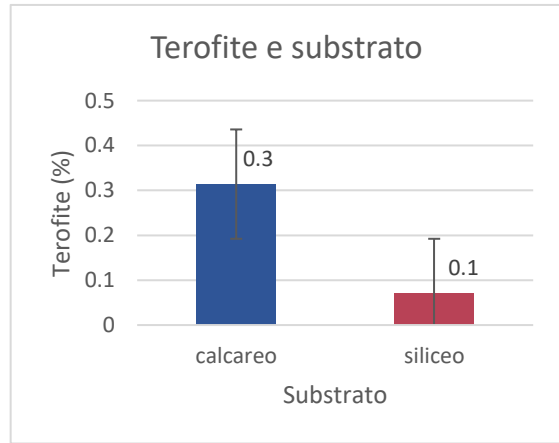


Figura 5.42: Relazione tra il numero medio (%) di specie terofite per tipo di substrato. Numero delle specie considerate  $N = 247$ , numero di terofite  $N_t = 2$

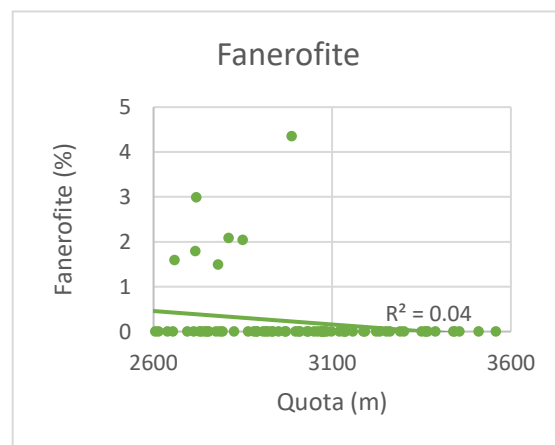


Figura 5.44: Relazione tra il numero percentuale di specie fanerofite rilevate nei transetti e la quota (limite inferiore del transetto). Numero di specie considerate  $N = 247$ , numero fanerofite  $N_p = 2$

## 5.2 Il margine freddo della distribuzione della flora alpina d'alta quota

Le seguenti analisi sono state svolte selezionando le specie per cui erano disponibili almeno 10 rilievi e mettendoli in relazione con il leading, ovvero la quota corrispondente al margine freddo delle specie.

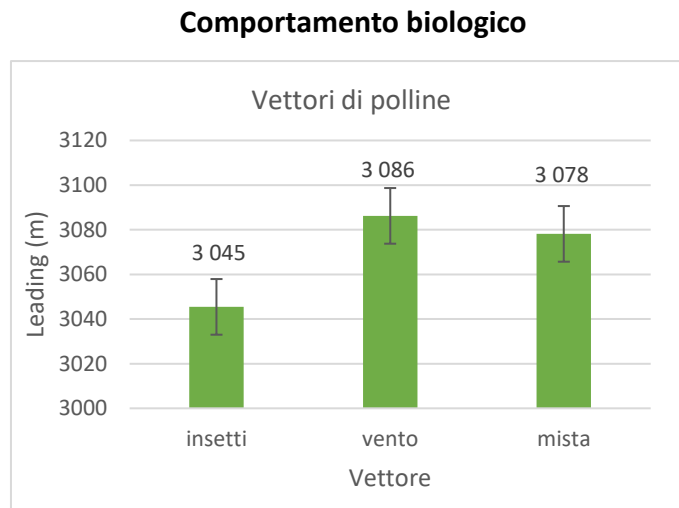


Figura 5.45 Leading medio per tipo di vettore di polline. Numero specie considerate  $N=87$

Il leading più alto in termini di quota è presentato da piante con un'impollinazione di tipo anemofilo mentre quello inferiore è caratteristico di specie dipendenti dagli insetti per la diffusione del polline (Fig 5.45).

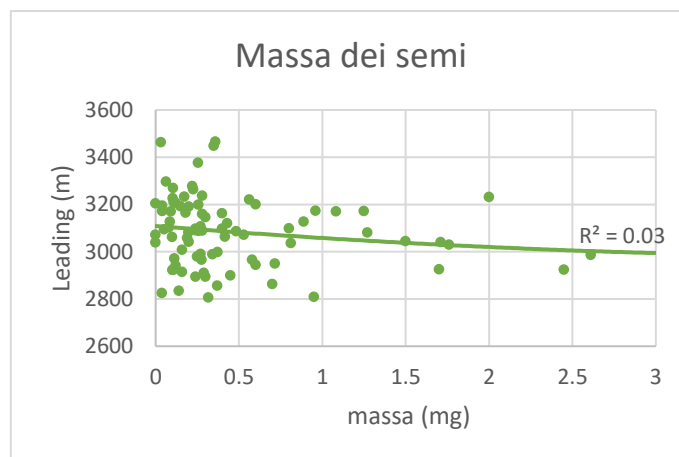


Figura 5.46 Leading medio delle specie in relazione alla massa dei semi. Numero di specie considerato  $N=87$

A masse di semi minori (0-0,5 mg) corrispondono specie con leading mediamente più elevato; con il calare del margine freddo delle specie si nota un aumento della massa (fino a 3.0 mg) (Fig 5.46).

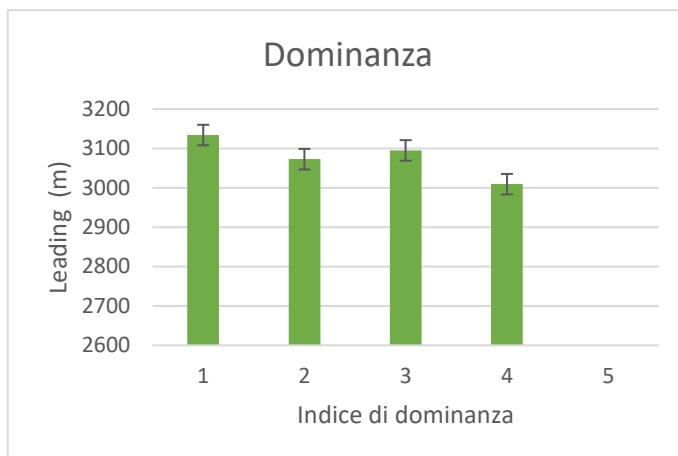


Figura 5.47 Leading medio delle specie per indice di dominanza. Numero di specie considerate N=87.

Le specie caratterizzate da un indice di dominanza minore (1: specie che vivono isolate) hanno un leading generalmente più elevato; questo tende a decrescere con il l'aumentare dei valori dell'indice (Fig. 5.47).

### Presenza

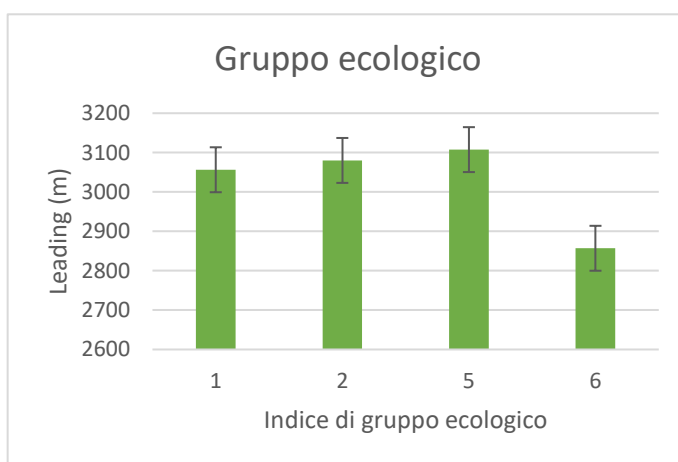


Figura 5.48: Leading medio di specie per indice di gruppo ecologico. Numero delle specie considerate N=87

Il gruppo ecologico delle piante di ambienti umidi (5) comprende le specie con leading maggiore; è seguito da piante montane (2), di foresta (1) e infine, a quote minori dei prati aridi (6) (Fig. 5.48) con leading via via decrescenti.

## Strategie

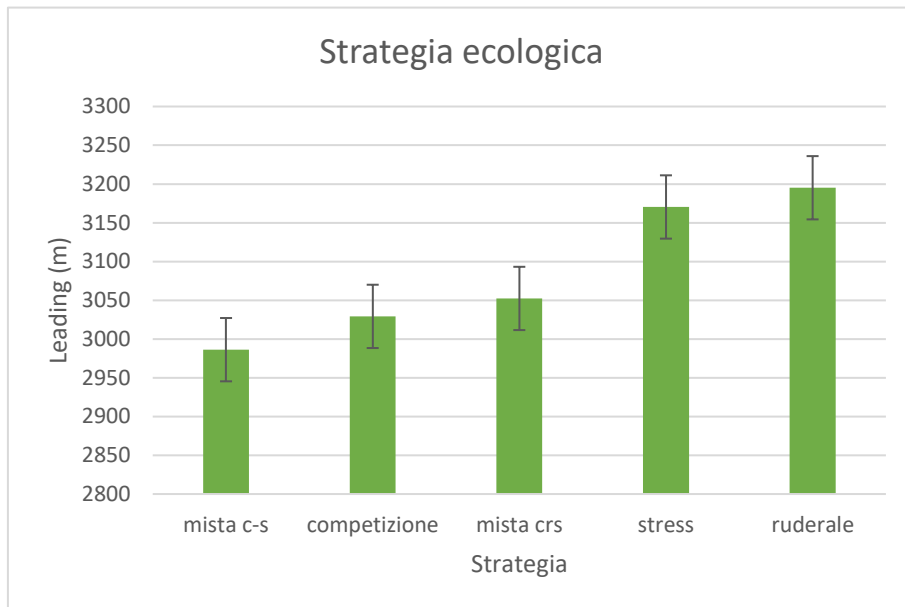


Figura 5.49 Leading medio di specie per strategia ecologica adottata. Numero di specie considerato  $N=87$ .

La strategia ruderale, seguita dalla tolleranza allo stress, è il metodo principale con cui le specie che raggiungono quote più elevate contrastano i fattori ambientali avversi (Fig. 5.49). La competizione è la strategia è prevalente invece in specie con limiti freddi di espansione inferiori, dove le condizioni sono meno severe.

## Indici di Landolt

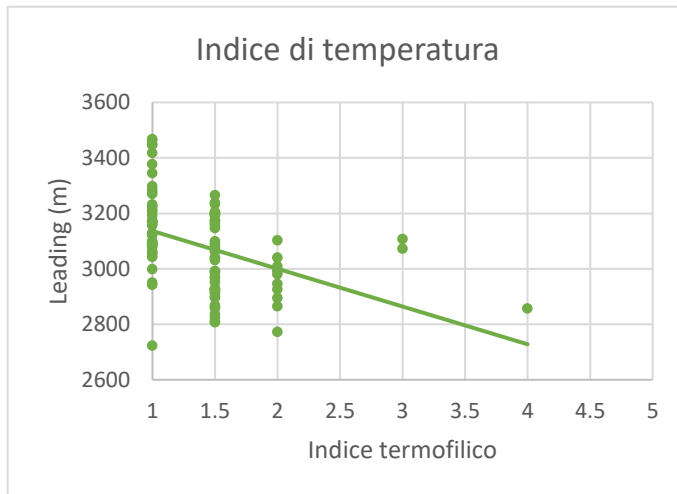


Figura 5.50 Leading medio di specie per indice di temperatura. Numero specie considerate,  $N=87$

Agli indici di temperatura più bassi, rappresentanti habitat alpini, nivali, subalpini corrispondono mediamente specie con margini freddi superiori che raggiungono anche i 3500m (Fig. 5.50). Al crescere del valore dell'indice (es. 4 collinare) coincide un calo della quota del leading medio.

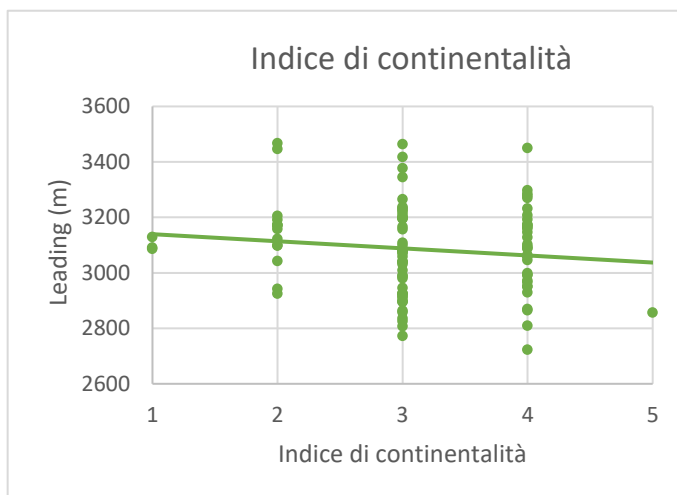


Figura 5.51: Leading medio di specie per indice di continentalità. Numero specie considerate,  $N=87$

I valori dell'indice di continentalità più rappresentati sono 2-3-4 (indicanti specie tipiche di ambienti dal suboceanico al subcontinentale). Anche in questo caso all'aumentare dell'indice (continentalità) il leading medio delle specie considerate decresce (Fig. 5.51).



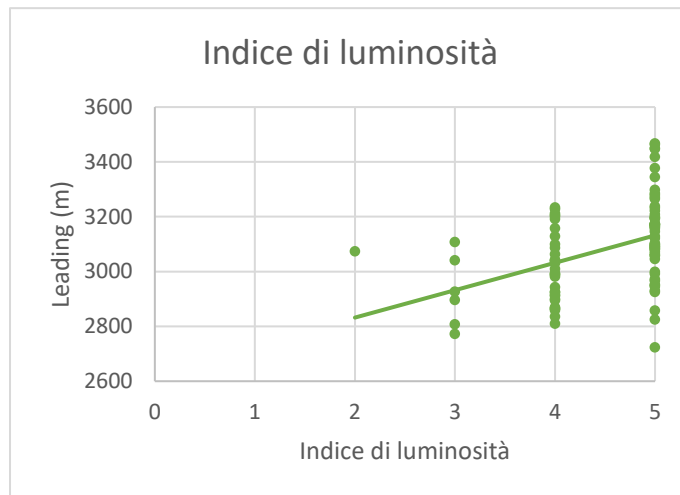


Figura 5.52: Leading medio di specie per indice di luminosità. Numero specie considerate,  $N=87$

Gli indici di luminosità rappresentati nel pool di specie considerato variano da 2 (specie di ambienti ombrosi) a 5 (specie di ambienti molto luminosi), valore che rappresenta il numero maggiore di specie; in questo caso si osserva una relazione positiva tra l'indice di luminosità e la quota media del leading di specie (Fig. 5.52).

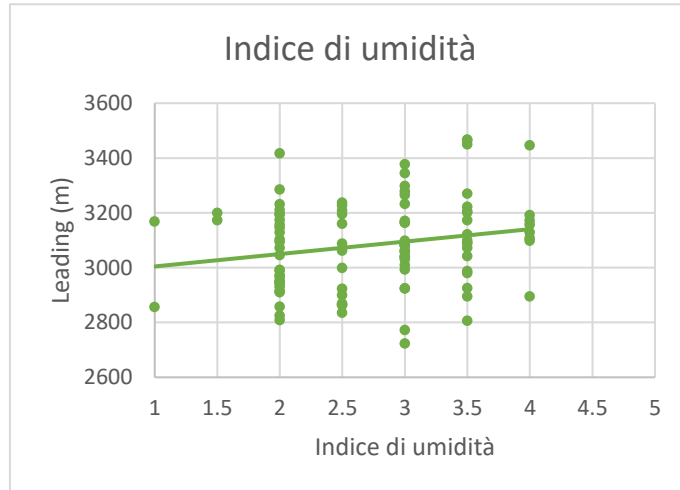


Figura 5.53: Leading medio di specie per indice di umidità. Numero specie considerate,  $N=87$

A indici di umidità minori corrispondono leading medi di specie inferiori (Fig 5.53); i valori rappresentati variano da 1 (molto umido) e con maggior frequenza da 2 (moderatamente umido) a 4 (molto umido).

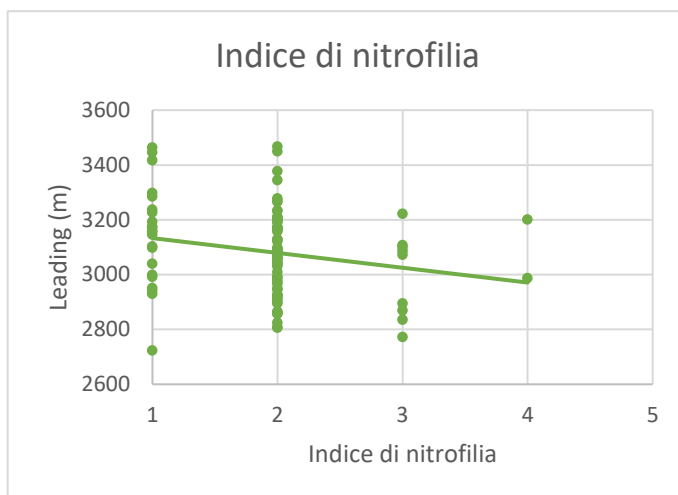


Figura 5.54: Leading medio di specie per indice di nitrofilia. Numero specie considerate, N=87

Gli indici di nitrofilia delle specie riscontrati variano tra 1 (suolo molto povero in nutrienti) a 4 (suolo ricco in nutrienti), questo scarsamente rappresentato. La relazione che lega il valore dell'indice e il leading è negativa (Fig. 5.54).

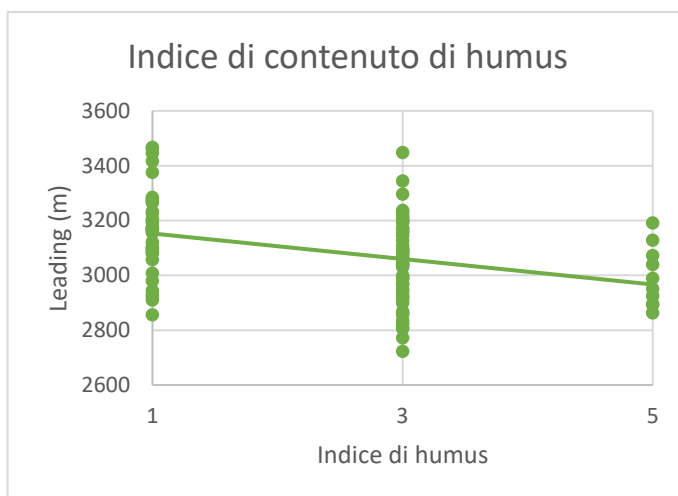


Figura 5.55: Leading medio di specie per indice di humus. Numero specie considerate, N=87

Tutte le condizioni riguardanti il contenuto di humus nel suolo sono rappresentate nel pool (1: povero di humus, 5: alto contenuto di humus). All'aumentare del contenuto di humus nel suolo diminuisce il leading medio delle specie considerate (Fig. 5.55).

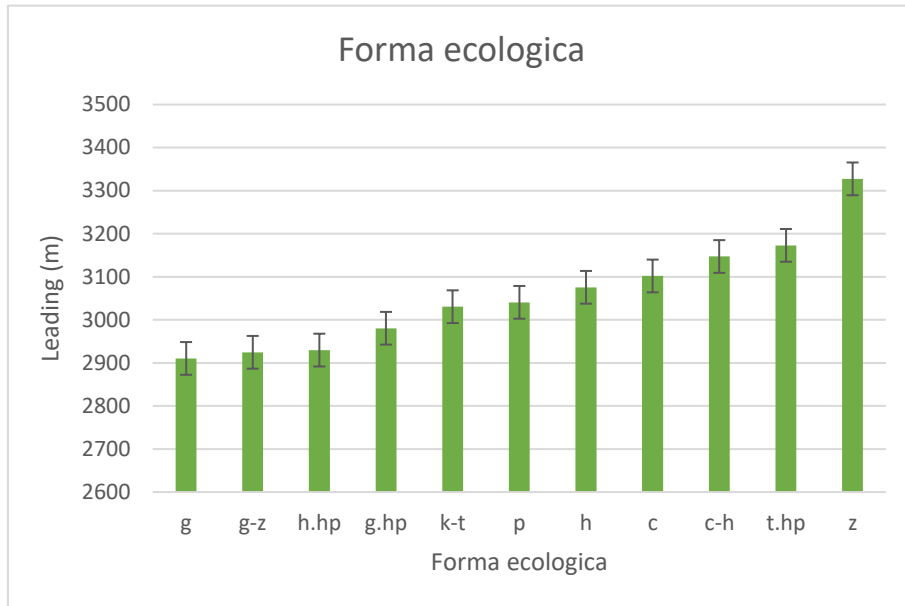


Figura 5.56: Leading medio di specie per forma ecologica. Numero specie considerate N=87.

Le geofite (g) sono caratterizzate dal leading medio minore (poco al di sopra dei 2900m) mentre le specie che raggiungono mediamente margini freddi a quote più elevate sono le camefite legnose seguite dalle terofite semi-parassite (t.hp) (Fig 5.54).

## 6 DISCUSSIONE

Gli ambienti montani, grazie ad una rapida variazione di temperatura in pochi metri, offrono l'opportunità di studiare l'adattamento di organismi vegetali al variare delle condizioni, mediante osservazioni ed esperimenti. In questo studio, il gradiente altitudinale è stato impiegato come proxy della temperatura per fare previsioni riguardo alla possibile evoluzione della composizione della flora alpina come conseguenza del surriscaldamento globale. Occorre però considerare che all'aumento dell'altitudine non è associata solo una diminuzione della temperatura (in media, scende di 5,5 °K/km) ma anche la diminuzione della pressione atmosferica totale e parziale di tutti i gas atmosferici (di cui O<sub>2</sub> e CO<sub>2</sub> sono di particolare importanza per la vita), la variazione dell'umidità (dipendente dalla temperatura), l'aumento della radiazione solare in entrata e la termica notturna in uscita (dovuta anche alla ridotta torbidità atmosferica) nonché una riduzione dell'area a cui vanno aggiunte le peculiarità regionali (precipitazioni, velocità del vento,...). I due fattori ritenuti comunque più influenti per la vita associati all'altitudine sono il declino della temperatura e la riduzione della superficie di terreno per fascia bioclimatica (Körner C., 2007).

### **Ricchezza di specie**

I risultati mostrano una chiara diminuzione della ricchezza specifica nella comunità vegetale spostandosi verso le sommità; superati i 3553 m le condizioni ad oggi non permettono la colonizzazione da parte di piante vascolari, confermando l'esistenza della relazione tra distribuzione delle specie e la variabile temperatura (Vittoz P. et al., 2010). Tuttavia, come affermato in numerosi studi il tasso di colonizzazione di queste aree da parte di specie caratteristiche di fasce ecologiche inferiori sta accelerando (Steinbauer, 2018).

La disponibilità di campioni relativi a regioni silicee e calcaree dà l'opportunità di verificare una possibile influenza del substrato sulla ricchezza delle specie nonché sugli altri tratti analizzati lungo il gradiente altitudinale; si osserva una maggior ricchezza su substrato siliceo. Tuttavia, questo trend non è omogeneo in letteratura e sarebbe necessario un numero maggiore di vette da campionare per avere un confronto più robusto.

Erschbamer et al. (2006), nell'ambito del progetto GLORIA hanno confrontato due regioni con questi substrati nelle Alpi italiane: hanno osservato una maggior ricchezza di specie sul substrato calcareo alla scala sommitale mentre su piccola scala (1 dm<sup>2</sup>), la ricchezza delle

specie era significativamente maggiore per le specie su substrato siliceo (Vittoz P. et al., 2010).

### **Caratteristiche morfologiche**

Riguardo alla morfologia, la tendenza inter ed intraspecifica è quella di una diminuzione dell'altezza media delle specie vegetali presenti in risposta ad un aumento dell'elevazione e dei gradienti ambientali che si verificano (Pellissier L. et al., 2010, Rixen C. et al, 2022). Con l'estensione decrescente nella stagione di crescita, le piante hanno un tempo limitato per svilupparsi e completare il loro ciclo di vita e quindi le forme biologiche che meglio si adattano a queste condizioni sono emicriptofite e camefite. Grazie alla loro bassa statura e alla forma compatta, queste piante beneficiano del calore che si accumula nel suolo stoccandolo, sono protette dal vento e sono in grado di compiere un efficiente riciclaggio dei nutrienti e ritenzione dell'acqua in presenza di roccia. La scomparsa di geofite e terofite con l'altitudine crescente è attribuibile a queste condizioni troppo limitanti per permetterne lo sviluppo (Vittoz P. et al., 2010). La variazione delle temperature oltre a causare un precoce scioglimento della copertura nevosa porterà ad un'estensione della stagione vegetativa permettendo alle piante un maggiore sviluppo sia in termini di altezza che biomassa prodotta, favorendo l'avanzamento forme biologiche che ad oggi si trovano solo in fasce altitudinali inferiori. Questa previsione è supportata da studi in diverse regioni montane delle Alpi svizzere, che hanno verificato correlazioni significative tra la temperatura media dell'aria a maggio/giugno e lo scioglimento della neve, l'inizio della crescita delle piante e l'altezza delle piante (Inouye, D.W., 2020).

### **Strategia ecologica**

La strategia ecologica csr (Grime) predominante negli ambienti di alta quota è la strategia s (stress), tipica delle specie specialiste; le specie stress-tolleranti sono in grado di sopravvivere anche in condizioni di scarse risorse ambientali, risultando in questo modo altamente efficienti e capaci di colonizzare ambienti preclusi ad altre specie. Tuttavia, la strategia caratteristica delle specie con leading medio superiore è la ruderale, tipica di specie spesso pioniere che prediligono condizioni di basso stress e alto disturbo con possibili cambiamenti repentini nella disponibilità delle risorse, riscontrata in ambienti aperti e degradati, non ancora soggetti a competizione (Gentilini R. et al., 2010). La

strategia c (competitiva), propria delle specie generaliste, è protagonista alle quote inferiori ed è strettamente correlata all'altezza e dimensioni delle piante. Con il variare delle condizioni climatiche e la risalita delle specie è probabile che la strategia c (competitiva) assumerà maggior importanza anche alle quote più elevate (Kaufmann R. et al., 2021).

## **Riproduzione**

Viste le condizioni climatiche avverse e le possibili annate sfavorevoli le specie ricorrono per lo più alla riproduzione vegetativa (tramite gemme laterali e talea) per assicurare la riproduzione dell'individuo (Pellissier L. et al., 2010). Per quanto riguarda la riproduzione gamica la strategia più rappresentata è la poligamia, condizione in cui su uno stesso individuo sono presenti sia fiori unisessuali che ermafroditi. Questo tipo di riproduzione è fondamentale a lungo termine poiché consente la dispersione a distanza e garantisce la variabilità genetica delle popolazioni.

Poiché molte specie vascolari prediligono la riproduzione clonale, il parametro della massa dei semi non è un predittore significativo in modelli di determinazione dell'abbondanza di specie al variare del gradiente altitudinale; nonostante ciò, esso migliora le stime indicando un'influenza dei cambiamenti climatici su questi processi (Soudzilovskaia N. A., 2013).

Questo tratto, determinato geneticamente, può infatti concorrere con il sito nel determinare la germinazione e il possibile insediarsi di nuove specie, anche in previsione di un aumento di temperatura.

La massa dei semi prodotti tendenzialmente decresce con l'aumentare della quota (Pellissier L. et al., 2010) e nelle specie con leading medio più elevato non supera i 0,5 mg. Questa caratteristica ha importanti implicazioni per la sopravvivenza degli individui: specie con semi ridotti producono maggiori quantità e la probabilità che questi raggiungano un sito adatto è più elevata; inoltre tendono ad essere sepolti più in profondità nel suolo, favorendo la longevità nella seedbank e aumentando così ulteriormente il successo della specie. Le risorse stoccate nei semi più grandi, tuttavia, possono aiutare la sopravvivenza degli individui e l'insediamento nonostante i rischi ambientali (scarsità di luce, carenza d'acqua, presenza di erbivori); questo si traduce in un maggior tasso di germinazione ma il tempo richiesto per questa fase è più prolungato e questo rappresenta un ostacolo data la limitazione del periodo vegetativo in alta quota (Estrada A. et al., 2015; Venn S.E, 2011; Veselà A. et al., 2020).

La temperatura è infatti una delle variabili climatiche più influenti per la germinazione, permettendo la sincronizzazione dei primi stadi di sviluppo della pianta con le condizioni ambientali ottimali. Il cambiamento climatico globale sta alterando i segnali ambientali, agevolando da un lato alcune specie (favorendo ad esempio specie con semi di massa superiore) ma potenzialmente compromettendo le prime fasi e le prestazioni di alcuni individui (Briceño V.F. et al., 2015; Veselà A. et al., 2020).

La massa dei semi è inoltre strettamente legata ed influenza la dispersione: all'aumento di questo tratto corrisponde una minor distanza di dispersione. Nel caso di specie a diffusione anemocora, ad esempio, il peso influisce sulla velocità di caduta così come l'altezza della pianta può influenzarne la distanza (Johnson J. S. et al., 2019). Con l'aumentare dell'altitudine le piante riducono fortemente il loro investimento nella dispersione producendo capsule; queste rappresentano un sistema di dispersione efficiente vista la grande quantità di semi leggeri che contengono, rendendole efficienti nel caso di forti venti con turbolenze ascensionali tipici di ambienti montani (Pellissier L. et al., 2010).

Come nel caso della disseminazione anche la dispersione del polline alle quote più elevate dipende principalmente dal fattore vento, suggerendo che gli insetti tendono ad essere meno frequenti e meno attivi nella fascia alto-alpina. Questo metodo ha il vantaggio di richiedere strutture più semplici (fiori di dimensioni limitate) e l'indipendenza dagli insetti per l'impollinazione (Pellissier L. et al., 2010). Generalmente gli insetti sono favoriti da alte temperature, per cui la loro abbondanza diminuisce all'aumentare dell'altitudine. È dimostrato, anche della maggior presenza di specie che si affidano agli insetti per l'impollinazione nelle quote inferiori, che questo tipo di vettore sia più efficace del vento e che quindi quest'ultima strategia si sia evoluta in risposta alle limitazioni degli impollinatori in queste condizioni (Pellissier L. et al., 2010). Con gli attuali cambiamenti di temperatura, molte specie di insetti riescono a colonizzare quote più alte (Wilson et al., 2007). La loro presenza avrà diversi impatti sulle piante alpine, ad esempio potrebbe alterare la composizione della comunità favorendo specie con impollinazione entomofila. Non solo insetti impollinatori ma anche altri animali si stanno spostando in associazione alla risalita di specie vegetali di bassa quota a causa dell'innalzamento della temperatura, generando cambiamenti nelle interazioni tra piante e impollinatori (Estrada A. et al., 2015).

La dispersione, la persistenza della seedbank e l'ampiezza dell'habitat sono variabili cruciali per l'espansione degli areali delle specie: specie con un'elevata capacità di dispersione, che

possono mantenere seedbank vitali per più anni (contrastando le fluttuazioni climatiche) e che possono colonizzare diversi habitat (generaliste) avendo una maggior capacità competitiva saranno agevolate nel modificare i loro areali geografici adattandosi al cambiamento climatico (Estrada A. et al., 2015).

Piuttosto che adattare i tratti fisici, le specie vegetali possono regolare i tempi di produzione o maturazione del propagulo in risposta ai cambiamenti degli ambienti. Ad esempio, la variazione della temperatura e delle precipitazioni ha mostrato alterare il tempo di fioritura (Johnson J.S. et al. 2019).

Un inizio della fioritura tardivo così come una minor durata del periodo di fioritura consente solo ad alcune specie di compiere l'intero ciclo biologico in condizioni severe (si è riscontrata una diminuzione del periodo di fioritura così come un inizio più tardivo con il gradiente altitudinale); tuttavia, un allungamento della stagione vegetativa e un precoce scioglimento delle nevi per effetto del cambiamento climatico potrebbe portare ad una fioritura più precoce e permettere la risalita di altre specie.

La fenologia della fioritura può determinare quali specie di impollinatori, o quali caste sociali nelle api, possano interagire con particolari fiori e può anche influenzare i tassi di visitazione, sul tasso di incroci e sulla produzione di semi e sulla limitazione del polline.

Una maggior longevità dei fiori così come una precoce fioritura potrebbe compensare i bassi tassi di visite polliniche in modo da rendere l'impollinazione entomofila (misurata da una combinazione di abbondanza di impollinatori, tassi di visitazione, deposizione di polline e durata della longevità dello stigma) più efficiente (Estrada A. et al., 2015).

Uno spostamento nella tempistica delle fenofasi può però potenzialmente interrompere la sovrapposizione temporale tra impollinatori e piante ospiti creando disallineamenti fenologici in eventi cronologicamente sincronizzati, come l'arrivo di impollinatori, e la disponibilità delle loro risorse floreali (Cornelius C. et al., 2012, Estrada A. et al., 2015, Inouye, D.W., 2020).

### **Indicatori di Landolt**

Si è verificata la covarianza tra gli indici di Landolt; le relazioni più significative sono negative e legano l'indice di temperatura agli indici di luminosità ed umidità del suolo, l'indice di luminosità agli indici di nutrienti e humus. L'indice di temperatura così come quello del contenuto di humus (e in maniera meno significativa continentalità e nitrofilia)



diminuisce con il progredire della quota mentre i valori degli indici di luminosità e umidità si comportano inversamente.

I cambiamenti climatici in atto porteranno, sia direttamente che indirettamente, ad una modificazione delle componenti secondo le quali sono state caratterizzate le specie (temperatura, luminosità, umidità, nitrofilia, continentalità, contenuto di humus); questo si ripercuoterà in un adattamento dei pool di specie in termini di composizione.

Tra gli indicatori che mostrano maggior variabilità e che sembrano più influenzare la vegetazione si trovano l'indicatore termico e quello di umidità. Da studi condotti nelle Alpi tirolesi è emerso che l'indicatore termico è aumentato nel corso di indagini successive, da 1,61 nel 1994 a 1,76 nel 2014; data una fascia di vegetazione di 500 m di estensione verticale, il cambiamento osservato di 0,15 unità nell'indicatore di vegetazione termica corrisponde a 75 m di altitudine. L'innalzamento nel valore è dovuto all'arrivo di specie provenienti da quote inferiori adattate a climi più caldi rispetto alle specie nelle comunità presenti (Steinbauer. M.J., 2018).

Una prova di quanto affermato si ritrova nelle analisi svolte considerando il leading edge delle specie: a 2857m di altitudine si trova il margine freddo di *Thymus praecox*, specie caratterizzata da un indice di temperatura pari a 4, specifico delle specie collinari.

Un effetto di amplificazione ancora più marcato è stato rilevato per l'indicatore di umidità del suolo: i risultati mostrano una variazione delle specie verso composizioni vegetali più resistenti alla siccità. Questi 2 indici sono strettamente correlati: temperature più elevate causano una maggiore evapotraspirazione, portando a una ridotta disponibilità di acqua. Gli scenari regionali sul cambiamento delle precipitazioni sono incoerenti, tuttavia, le proiezioni mostrano che le precipitazioni medie tendono a diminuire in estate mentre in inverno si verificano precipitazioni di carattere piovoso piuttosto che nevoso (Gobiet et al., 2014). La tendenza significativa verso un periodo più lungo senza neve è coerente con il manifestarsi di stagioni di crescita più prolungate. Effetti combinati di temperature più elevate e condizioni meno umide possono portare a forti trasformazioni sulle comunità vegetali adattate al freddo (Lamprecht A. et al., 2018)

In accordo con le correlazioni riscontrate tra gli indici è probabile un aumento medio del valore di nitrofilia delle specie e questa ipotesi concorda con studi già condotti in altri ecosistemi alpini. Nei suoli alpini esiste uno stretto legame tra le trasformazioni microbiche

della sostanza organica del suolo e la disponibilità di nutrienti come per gli elementi P e N; in questo ambiente tali trasformazioni sono un importante fattore limitante per la produzione primaria. Pertanto, la mineralizzazione intensiva della sostanza organica del suolo prodotta dal cambiamento globale negli ambienti alpini potrebbe portare ad una maggiore disponibilità di N e P, che aumenterà l'assimilazione dei nutrienti da parte delle piante (Chersich S. et al., 2015). Oltre al processo di termofilizzazione bisogna valutare anche il contributo della deposizione azotata atmosferica che si è verificata negli ultimi decenni; una maggiore disponibilità di nutrienti favorirà l'avanzamento di specie con maggior grado di nitrofilia (Evangelista A. et al., 2015. Peter M., 2009). Studi riguardanti specie alloctone e invasive (con indici termofilici tendenzialmente maggiori) prevedono che il rischio di invasioni verso altitudini più elevate nelle aree montane aumenterà con il cambiamento climatico (Petitpierre B. et al. 2016).

## 7 CONCLUSIONI

Gli studi effettuati hanno consentito, tramite i tratti funzionali, di presentare una descrizione della flora alpina che caratterizza le vette trentine e di formulare alcune previsioni riguardo all'evoluzione nella composizione che la interesserà come conseguenza dei cambiamenti climatici in atto.

All'aumentare della quota i risultati mostrano una chiara diminuzione della ricchezza specifica nella comunità vegetale; le specie, al crescere del gradiente altitudinale, presentano un'altezza media decrescente e, per quanto riguarda la forma biologica, un'elevata percentuale è rappresentata da camefite e emicriptofite. In questi ambienti ostili alla crescita alla maggior parte di specie, la strategia predominante è la stress-tollerante, mentre la ruderale caratterizza le specie con il leading medio più elevato.

La riproduzione più adatta ad assicurare la successione dell'individuo è la vegetativa, ma sono presenti specie che si riproducono anche per via gamica (poligamia). La massa dei semi prodotti diminuisce con l'aumentare della quota; questo adattamento è legato alla dispersione per anemocoria ed alla durata della stagione vegetativa. Quest'ultimo fattore influenza anche la fenologia della fioritura: il mese di inizio è posticipato con il salire dell'altitudine e così ne risente anche la durata che si riduce.

Si sono verificate relazioni negative significative tra gli indici ecologici di Landolt che legano l'indice di temperatura agli indici di luminosità ed umidità del suolo, l'indice di luminosità agli indici di nutrienti e humus. Il valore dell'indice di temperatura medio associato alle specie così come quello del contenuto di humus (e in maniera meno significativa continentalità e nitrofilia) diminuisce con il progredire della quota; i valori di luminosità e umidità si comportano inversamente.

I cambiamenti climatici influiranno in modo significativo sugli ecosistemi alpini dove si assisterà, oltre ad un aumento della temperatura media che permetterà un allungamento della stagione vegetativa, ad una minor disponibilità idrica e umidità, dovuta ad una maggior evapotraspirazione e ad una diminuzione delle precipitazioni nevose che avranno un tempo di permanenza assai limitato. In concomitanza con queste variazioni si verificherà probabilmente un aumento dei nutrienti disponibili in alta quota, sia per una maggior deposizione atmosferica che per una più alta intensità delle trasformazioni microbiche nel suolo.

Queste mutazioni avranno effetti non solo sulla vegetazione ma anche sulle interazioni biotiche, ad esempio uno spostamento delle fenofasi può interrompere la sovrapposizione temporale con gli insetti.

L'aumento accelerato della ricchezza di specie sulle vette che si sta già verificando è probabilmente il risultato di uno spostamento verso l'alto nei limiti dell'areale superiore di un numero crescente di specie. Le analisi dei tratti suggeriscono che i nuovi colonizzatori mostreranno strategie di crescita caratteristiche di specie di quote inferiori, come un ciclo biologico più lungo e dimensioni maggiori, sia in termini di altezza che per quanto riguarda la massa dei semi. Questi tratti sono dovuti ad una più lunga stagione vegetativa e alla maggior disponibilità di nutrienti, associati ad un'ascensione da parte degli impollinatori e quindi un incremento delle specie a diffusione entomofila.

Con l'arrivo di nuove specie colonizzanti è probabile un aumento in termini di importanza della strategia c (competizione).; questa prevale infatti nelle specie generaliste, capaci di adattarsi ad un numero superiore di habitat e con limiti climatici meno circoscritti, maggior capacità di dispersione e in grado di rimanere vitali nelle seedbank per lunghi periodi. Questa strategia potrebbe essere inoltre accentuata dal diminuire della superficie disponibile che si riscontra con l'aumentare della quota. Specie specialiste e meglio adattate alle condizioni più severe attuali, di conseguenza, saranno portate all'estinzione.

Con il subentrare di nuove specie da quote inferiori anche i valori medi degli indici di Landolt dei pool di specie rilevati subiranno un cambiamento; in particolare si risconterà un aumento dell'indice di temperatura e nitrofilia, a testimonianza della presenza di specie più esigenti dal punto di vista termico e della presenza di nutrienti, ed una diminuzione degli indici di umidità e luminosità, a dimostrazione dell'insediamento di specie che prediligono condizioni più aride e ombrose (a causa anche della competizione). Ad essere favorite non saranno solo specie native ma anche le esotiche, adattate a condizioni meno rigide rispetto a quelle alpine.

Per quanto riguarda il paragone dei tratti delle specie in base al tipo di substrato (calcareo/siliceo) è necessario il campionamento di nuove cime e la selezione per range altitudinale per rendere il dataset di dati confrontabile.

Altri tratti funzionali (tolleranza alla salinità, ai metalli, età massima, profondità delle radici...) non sono stati presi in considerazione per la mancanza di informazioni relative ad

un numero di specie elevato; disporre di questo tipo di dato permetterebbe di svolgere analisi e previsioni più approfondite rispetto alla possibile evoluzione della flora alpina.

Includere la variabile morfologica delle cime in analisi di questo tipo potrebbe ulteriormente spiegare alcuni risultati e migliorare le successive ipotesi: sommità aspre e con versanti verticali ospiteranno difficilmente popolazioni vegetali, nonostante la variazione delle condizioni climatiche.

Questo studio si focalizza sull'evoluzione della vegetazione considerando le variazioni dovute ai fattori climatici degli ambienti in cui si sono stabilizzate; tuttavia, quello alpino è un sistema complesso: spesso non sono valutati ed integrati nelle predizioni i mutamenti che avverranno nel sistema montano dal punto di vista geo-morfologico. Come verificato anche in campo durante questi rilievi, l'aumentare delle temperature sta causando lo scioglimento del permafrost causando la destabilizzazione dei versanti: scariche di detriti sono sempre più frequenti nonché collassi localizzati. Questo genere di disturbo può interagire con il possibile insediamento e la colonizzazione da parte di nuove specie impedendoli o creando ulteriori nicchie ecologiche.

## 8 BIBLIOGRAFIA

Aeschimann D., Lauber K., Moser D. M. e Theurillat J.-P., 2004. Flora alpina. Bologna, Zanichelli.

Agenzia Provinciale per la protezione dell'ambiente (APPA), 2020. [http://www.appa.provincia.tn.it/rapporto\\_ambiente\\_2020/](http://www.appa.provincia.tn.it/rapporto_ambiente_2020/)

Andreatta S., Festi F. e Prosser F., 2017. "Un'applicazione Android per rilievi floristici con smartphone nelle province di Trento e Verona." *Ann. Mus. civ. Rovereto* 31 (2017): 125-135.

Armani L., 2020. Assetto vegetazionale; Alla ricerca della vita sulle Dolomiti di Brenta; Atti dell'incontro collegiale del 30 novembre 2019

Bellard C., Bertelsmeier, C., Leadley, P., Thuiller, W., & Courchamp, F., 2012. Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecology letters*, 15(4), 365-377

Bertolli A., Guella E., Maiolini B., Odasso M., Pedrini P., Prosser F., Sarzo A., Sottovia L., Taufer G. e Volcan G., 2012. Naturalmente Trentino: i paesaggi, la natura, i luoghi. Trento: Società degli alpinisti tridentini, Trento: Curcu & Genovese

Briceño V.F., Hoyle e Nicotra A.B., 2015. Seeds at risk: How will a changing alpine climate affect regeneration from seeds in alpine areas? *Alp Botany* 125, 59–68

Chersich S., Rejšek, K., Vranová, V., Bordoni, M., e Meisina, C., 2015. Climate change impacts on the Alpine ecosystem: an overview with focus on the soil. *Journal of forest science*, 61(11), 496-514.

Cornelius C., Estrella, N. Franz H. e Menzel A., 2013. Linking altitudinal gradients and temperature responses of plant phenology in the Bavarian Alps. *Plant Biology*, 15: 57-69.

Erschbamer B., Niederfriniger Schlag R., e Winkler E., 2008. Colonization processes on a central Alpine glacier foreland. *Journal of Vegetation Science*, 19(6), 855-862.

Estrada A., Meireles C., Morales-Castilla I., Poschlod P., Vieites D., Araújo M. B. e Early R., 2015. Species' intrinsic traits inform their range limitations and vulnerability under environmental change. *Global Ecology and Biogeography*, 24(7), 849-858.

Evangelista A., Frate L., Carranza M. L., Attorre F., Pelino G., & Stanisci A. (2016). Changes in composition, ecology and structure of high-mountain vegetation: a re-visitation study over 42 years. *AoB Plants*, 8.

Gentili R., Armiraglio S., Rossi G., Sergio Sgorbati, Carlo Baroni, 2010. Floristic patterns, ecological gradients and biodiversity in the composite channels (Central Alps, Italy), Volume 205, Issue 6, Pages 388-398,

GLORIA, 2022. <https://www.gloria.ac.at/>

- Gobiet A., Kotlarski S., Beniston M., Heinrich G., Rajczak J., e Stoffel M., 2014. 21st century climate change in the European Alps—A review. *Science of the total environment*, 493, 1138-1151
- Guisan A., Theurillat J. P., e Kienast F., 1998. Predicting the potential distribution of plant species in an alpine environment. *Journal of Vegetation Science*, 9(1), 65-74.
- Inouye D.W., 2020. Effects of climate change on alpine plants and their pollinators. *Ann. N.Y. Acad. Sci.*, 1469: 26-37.
- IPCC, 2018: Summary for Policymakers. In: Global Warming of 1.5°C. An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty [Masson-Delmotte V., Zhai P., Pörtner H.-O., Roberts D., Skea J., Shukla P.R., Pirani A., Moufouma-Okia W., Péan C., Pidcock R., Connors S., Matthews J.B.R., Chen Y., Zhou X., Gomis M.I., Lonnoy E., Maycock T., Tignor M., e Waterfield T. (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, pp. 3-24.
- Jaccard, P., 1912. The distribution of the flora in the alpine zone. 1. *New phytologist*, 11(2), 37-50.
- Jiménez-Alfaro, B., Abdulhak, S., Attorre, F., Bergamini, A., Carranza, M. L., Chiarucci, A., e Winkler, M., 2021. Post-glacial determinants of regional species pools in alpine grasslands. *Global Ecology and Biogeography*, 30(5), 1101-1115.
- Johnson J.S., Cantrell R.S., Cosner C., Hartig F., Hastings A., Rogers H.S., Schupp E.W., Shea K., Teller B.J., Yu X., Zurell D. e Pufal G., 2019. Rapid changes in seed dispersal traits may modify plant responses to global change. *AoB Plants*, 11(3)
- Kaufmann R., Mayer R., Schallhart N. e Erschbamer B. 2021. Effects of Climate Change vs. Grazing Exclusion on Species Diversity Over 18 Years Along an Elevation Gradient in the European Alps. *Front. Ecol. Evol.* 9
- Körner C., 2007. The use of 'altitude' in ecological research. *Trends in ecology & evolution*, 22(11), 569-574
- Lamprecht A., Semenchuk P.R., Steinbauer K., Winkler M. e Pauli H., 2018. Climate change leads to accelerated transformation of high-elevation vegetation in the central Alps. *New Phytol*, 220: 447-459.
- Moser D., Dullinger S., Englisch T., Niklfeld H., Plutzer C., Sauberer N. e Grabherr G., 2005. Environmental determinants of vascular plant species richness in the Austrian Alps. *Journal of Biogeography*, 32(7), 1117-1127.

Olsen S. L., e Klanderud K., 2014. Biotic interactions limit species richness in an alpine plant community, especially under experimental warming. *Oikos*, 123(1), 71-78.

Orlando F., 2022. Global warming e ricostruzioni climatologiche. Quale futuro ci attende? [https://www.fondazionemcr.it/news.jsp?ID\\_NEWS=2418&areaNews=48&GTemplate=default.jsp](https://www.fondazionemcr.it/news.jsp?ID_NEWS=2418&areaNews=48&GTemplate=default.jsp)

Parco del Monviso, 2019. <https://www.parcomonviso.eu/ambiente/la-flora/la-flora-alpina>

Parco Naturale Adamello Brenta (PNAB), 2020. BioMiti - Alla ricerca della vita sulle Dolomiti di Brenta; Atti dell'incontro collegiale del 30 novembre 2019

Pauli H., Gottfried M. e Grabherr G., 2003. Effect of climate change on the alpine and nival vegetation of the Alps. *Journal of Mountain Ecology*. 7. 9-12.

Pellissier L., Fournier B., Guisan A. e Vittoz P., 2010. Plant traits co-vary with altitude in grasslands and forests in the European Alps. *Plant Ecol* 211, 351–365

Peter M., Gigon A., Edwards, P.J. e Lüscher A., 2009. Changes over three decades in the floristic composition of nutrient-poor grasslands in the Swiss Alps. *Biodivers Conserv* 18, 547–567

Petitpierre, B., McDougall, K., Seipel, T., Broennimann, O., Guisan, A., e Kueffer, C., 2016. Will climate change increase the risk of plant invasions into mountains? *Ecological Applications*, 26(2), 530–544.

Prosser F., Bertolli A., Festi F. e Perazza G., 2019. Flora del Trentino, Fondazione Museo Civico di Rovereto con Edizioni Osiride

Provincia Autonoma di Trento, 2006. “Piano generale di utilizzazione delle acque pubbliche”

Provincia autonoma di Trento. Giunta, 2008. Progetto Clima 2008; Previsioni e conseguenze dei cambiamenti climatici in Trentino

Rixen C., Wipf S., Rumpf S. B., Giejsztowt J., Millen J., Morgan J. W., e Deslippe J. R., 2022. Intraspecific trait variation in alpine plants relates to their elevational distribution. *Journal of Ecology*, 110(4)

Rogora M., Frate L., M.L. Carranza, M. Freppaz, A. Stanisci, I. Bertani, R. Bottarin, A. Brambilla, R. Canullo, M. Carbognani, C. Cerrato, S. Chelli, E. Cremonese, M. Cutini, M. Di Musciano, B. Erschbamer, D. Godone, M. Iocchi, M. Isabellon, A. Magnani, L. Mazzola, U. Morra di Cella, H. Pauli, M. Petey, B. Petriccione, F. Porro, R. Psenner, G. Rossetti, A. Scotti, R. Sommaruga, U. Tappeiner, J.-P. Theurillat, Tomaselli M., D. Viglietti, R. Viterbi, P. Vittoz, M. Winkler, G. Matteucci, 2018. Assessment of climate change effects on mountain



ecosystems through a cross-site analysis in the Alps and Apennines, *Science of The Total Environment*, Volume 624

Shaheen H., Ibrahim M., e Ullah Z., 2019. Spatial patterns and diversity of the alpine flora of Deosai plateau, western Himalayas. *Pak. J. Bot*, 51(1), 205-212.

Soudzilovskaia N.A., Elumeeva T.G., Onipchenko V.G., Shidakov I.I., Salpagarova F.S., Khubiev A.B., Tekeev D.K. e Cornelissen J.H., 2013 Functional traits predict relationship between plant abundance dynamic and long-term climate warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 110.

Steinbauer M. J., Grytnes J. A., Jurasinski G., Kulonen A., Lenoir J., Pauli H., e Wipf S., 2018. Accelerated increase in plant species richness on mountain summits is linked to warming. *Nature*, 556(7700), 231-234.

Theurillat J. P., e Guisan A., 2001. Potential impact of climate change on vegetation in the European Alps: a review. *Climatic change*, 50(1), 77-109

Ufficio Stampa della Provincia autonoma di Trento, 2017. <https://www.fmach.it/Comunicazione/Ufficio-stampa/Comunicati-Stampa/Dalle-temperature-ai-ghiacciai-la-ricerca-racconta-un-clima-che-cambia>

Venn S.E., Green K., Pickering C.M. e Morgan J.W. 2011. Using plant functional traits to explain community composition across a strong environmental filter in Australian alpine snowpatches. *Plant Ecol* 212, 1491–1499

Vesela A., Dostálek T., Rokaya M.B. e Münzbergová Z., 2020. Seed mass and plant home site environment interact to determine alpine species germination patterns along an elevation gradient. *Alp Botany* 130, 101–113

Vittoz P., Camenisch M., Mayor R., Miserere L., Vust M., e Theurillat J. P., 2010. Subalpine-nival gradient of species richness for vascular plants, bryophytes and lichens in the Swiss Inner Alps. *Botanica Helvetica*, 120(2), 139-149.

Wilson, R. J., Gutierrez, D., Gutierrez, J., & Monserrat, V. J., 2007. An elevational shift in butterfly species richness and composition accompanying recent climate change. *Global Change Biology*, 13(9), 1873-1887.



## 9 ALLEGATI

### 9.1 Lista delle specie rilevate

*Achillea clavenae*  
*Achillea moschata*  
*Achillea nana*  
*Achillea oxyloba*  
*Acinos alpinus*  
*Adenostyles glabra*  
*Adenostyles leucophylla*  
*Agrostis alpina*  
*Agrostis rupestris*  
*Agrostis schraderana*  
*Alchemilla flabellata*  
*Androsace alpina*  
*Androsace hausmannii*  
*Androsace helvetica*  
*Androsace vitaliana*  
*Antennaria carpatica*  
*Antennaria dioica*  
*Anthoxanthum alpinum*  
*Anthyllis vulneraria subsp. alpestris*  
*Arabis alpina*  
*Arabis caerulea*  
*Arabis pumila subsp. stellulata*  
*Arenaria biflora*  
*Arenaria ciliata*  
*Armeria alpina*  
*Arnica montana*  
*Artemisia genipi*  
*Artemisia mutellina*  
*Asplenium viride*  
*Aster alpinus*  
*Athamanta cretensis*  
*Athyrium distentifolium*  
*Avenella flexuosa*  
*Avenula versicolor*  
*Bartsia alpina*  
*Botrychium lunaria*  
*Bupleurum stellatum*  
*Calluna vulgaris*  
*Campanula barbata*  
*Campanula cochleariifolia*  
*Campanula scheuchzeri*  
*Cardamine alpina*  
*Cardamine resedifolia*  
*Carduus defloratus Aggreg.*  
*Carex atrata*  
*Carex capillaris*  
*Carex curvula*  
*Carex firma*  
*Carex frigida*  
*Carex fuliginosa*  
*Carex mucronata*  
*Carex ornithopodioides*  
*Carex parviflora*  
*Carex rupestris*  
*Carex sempervirens*  
*Cerastium alpinum*  
*Cerastium arvense*  
*Cerastium pedunculatum*  
*Cerastium uniflorum*  
*Chamorchis alpina*  
*Cirsium spinosissimum*  
*Coeloglossum viride*  
*Crepis aurea*  
*Crepis kernerii*  
*Cryptogramma crispa*  
*Cystopteris fragilis*  
*Cystopteris regia*  
*Daphne striata*  
*Deschampsia caespitosa*  
*Doronicum clusii*  
*Draba aizoides*  
*Draba dolomitica*  
*Draba dubia*  
*Draba fladnizensis*  
*Draba tomentosa*  
*Dryas octopetala*  
*Dryopteris assimilis*  
*Dryopteris filix-mas*  
*Dryopteris villarii subsp. villarii*  
*Elyna myosuroides*

*Empetrum hermaphroditum*  
*Epilobium angustifolium*  
*Erigeron polymorphus*  
*Erigeron uniflorus*  
*Eritrichium nanum*  
*Euphrasia alpina*  
*Euphrasia minima*  
*Euphrasia salisburgensis*  
*Festuca alpina*  
*Festuca curvula*  
*Festuca halleri*  
*Festuca intercedens*  
*Festuca nigrescens*  
*Festuca nigricans*  
*Festuca pumila*  
*Festuca scabriculmis subsp. luedii*  
*Festuca varia*  
*Galium anisophyllum*  
*Galium baldense*  
*Gentiana acaulis*  
*Gentiana bavarica var. subacaulis*  
*Gentiana brachyphylla*  
*Gentiana nivalis*  
*Gentiana orbicularis*  
*Gentiana punctata*  
*Gentiana utriculosa*  
*Gentianella anisodonta*  
*Geum montanum*  
*Geum reptans*  
*Gnaphalium hoppeanum*  
*Gnaphalium supinum*  
*Gymnocarpium dryopteris*  
*Helianthemum alpestre*  
*Helianthemum tomentosum*  
*Hieracium alpinum*  
*Hieracium intybaceum*  
*Hieracium lactucella*  
*Hieracium piliferum*  
*Hieracium pilosella*  
*Homogyne alpina*  
*Huperzia selago*  
*Hutchinsia alpina*  
*Hutchinsia alpina* Aggreg.  
*Hypochoeris uniflora*  
*Juncus jacquini*  
*Juncus monanthos*  
*Juncus trifidus*  
*Juniperus communis subsp. alpina*  
*Larix decidua*  
*Leontodon helveticus*  
*Leontopodium alpinum*  
*Ligusticum mutellina*  
*Ligusticum mutellinoides*  
*Linaria alpina*  
*Lloydia serotina*  
*Loiseleuria procumbens*  
*Lotus alpinus*  
*Luzula alpino-pilosa*  
*Luzula lutea*  
*Luzula spicata*  
*Melica ciliata*  
*Minuartia cherlerioides subsp. cherlerioides*  
*Minuartia cherlerioides subsp. rionii*  
*Minuartia gerardii*  
*Minuartia recurva*  
*Minuartia sedoides*  
*Moehringia ciliata*  
*Myosotis alpestris*  
*Nardus stricta*  
*Nigritella rhellicani*  
*Oreochloa disticha*  
*Oxyria digyna*  
*Oxytropis jacquinii*  
*Papaver rhaeticum*  
*Parnassia palustris*  
*Pedicularis kernerii*  
*Pedicularis tuberosa*  
*Pedicularis verticillata*  
*Petrocallis pyrenaica*  
*Peucedanum ostruthium*  
*Phleum alpinum*  
*Phyteuma globulariifolium*  
*Phyteuma hedraianthifolium*  
*Phyteuma hemisphaericum*  
*Phyteuma sieberi*  
*Picea abies*  
*Poa alpina*  
*Poa laxa*  
*Poa minor*  
*Polygonum viviparum*

*Polystichum lonchitis*  
*Potentilla aurea*  
*Potentilla crantzii*  
*Potentilla frigida*  
*Potentilla grandiflora*  
*Potentilla nitida*  
*Primula daonensis*  
*Primula glutinosa*  
*Primula minima*  
*Pulsatilla apiifolia*  
*Pulsatilla vernalis*  
*Ranunculus alpestris*  
*Ranunculus glacialis*  
*Ranunculus grenieranus*  
*Ranunculus oreophilus*  
*Rhinanthus glacialis*  
*Rhodiola rosea*  
*Rhododendron ferrugineum*  
*Sagina saginoides*  
*Salix helvetica*  
*Salix herbacea*  
*Salix reticulata*  
*Salix retusa*  
*Salix serpillifolia*  
*Saponaria pumila*  
*Saussurea discolor*  
*Saxifraga androsacea*  
*Saxifraga bryoides*  
*Saxifraga burseriana*  
*Saxifraga caesia*  
*Saxifraga depressa*  
*Saxifraga exarata*  
*Saxifraga facchinii*  
*Saxifraga moschata*  
*Saxifraga oppositifolia*  
*Saxifraga paniculata*  
*Saxifraga sedoides*  
*Saxifraga seguieri*  
*Saxifraga squarrosa*  
*Scabiosa lucida*  
*Sedum alpestre*  
*Selaginella selaginoides*  
*Sempervivum montanum*  
*Senecio disjunctus*  
*Senecio incanus*  
*Senecio incanus* subsp. *carniolicus*  
*Sesleria sphaerocephala*  
*Sesleria sphaerocephala* subsp. *leucocephala*  
*Sibbaldia procumbens*  
*Silene acaulis*  
*Silene excapa*  
*Silene exscapa*  
*Silene nutans*  
*Silene pusilla*  
*Silene rupestris*  
*Silene vulgaris*  
*Silene vulgaris* subsp. *glareosa*  
*Silene vulgaris* subsp. *vulgaris*  
*Soldanella alpina*  
*Soldanella pusilla*  
*Solidago virgaurea*  
*Solidago virgaurea* subsp. *minuta*  
*Solidago virgaurea* subsp. *virgaurea*  
*Tanacetum alpinum*  
*Taraxacum alpestre* Aggreg.  
*Taraxacum alpinum* Aggreg.  
*Taraxacum fontanum* Aggreg.  
*Thlaspi rotundifolium*  
*Thymus praecox* subsp. *polytrichus*  
*Trifolium alpinum*  
*Trifolium repens*  
*Trisetum spicatum*  
*Urtica dioica*  
*Vaccinium gaultherioides*  
*Vaccinium myrtillus*  
*Vaccinium vitis-idaea*  
*Valeriana elongata*  
*Valeriana supina*  
*Veronica alpina*  
*Veronica aphylla*  
*Veronica bellidioides*  
*Veronica fruticans*  
*Viola biflora*