

UNIVERSITA' DEGLI STUDI DELL'INSUBRIA-VARESE

Facoltà di Scienze Matematiche, Fisiche e Naturali

Corso di Laurea in Analisi e Gestione delle Risorse Naturali



RELAZIONI TRA CLIMA, PERMAFROST E FENOLOGIA  
DELLA VEGETAZIONE IN AMBIENTE ALPINO D'ALTA  
QUOTA

Relatore: Prof. Mauro GUGLIELMIN

Correlatrice: Prof.ssa Nicoletta CANNONE

Tesi di laurea di:

Michele DALLE FRATTE

Matr. n. 703925

Anno Accademico 2009-2010

*«il grande ritmo della Natura pervade tutto,  
e l'uomo ne è intimamente coinvolto  
sia nel corpo,  
sia nello spirito»*

Lama Anagarika Govinda, *La via delle nuvole bianche*

# INDICE

<b>1. INTRODUZIONE E OBIETTIVI</b>	<b>pag. 1</b>
<b>2. STATO DELL'ARTE</b>	<b>pag. 7</b>
<b>2.a. Elementi geomorfologici</b>	<b>pag. 7</b>
<b>2.a.1. Ambiente glaciale</b>	<b>pag. 7</b>
<b>2.a.2. Ambiente periglaciale</b>	<b>pag. 8</b>
<b>2.a.3. Ambiente gravitativo</b>	<b>pag. 13</b>
<b>2.a.4. Sintesi dello stato dell'Arte</b>	<b>pag. 14</b>
<b>2.b. Flora e vegetazione</b>	<b>pag. 17</b>
<b>2.b.1. Comunità e associazione vegetale</b>	<b>pag. 17</b>
<b>2.b.2. Quadro sintassonomico</b>	<b>pag. 18</b>
<b>2.b.3. Quadro sindinamico</b>	<b>pag. 19</b>
<b>2.b.4. Forme biologiche</b>	<b>pag. 22</b>
<b>2.b.5. Tipi corologici</b>	<b>pag. 23</b>
<b>2.b.6. Sintesi dello stato dell'Arte</b>	<b>pag. 25</b>
<b>2.c. Fenologia delle specie alpine e cambiamento climatico</b>	<b>pag. 28</b>
<b>2.c.1. Cambiamento climatico</b>	<b>pag. 28</b>
<b>2.c.2. Fenologia delle specie alpine</b>	<b>pag. 30</b>
<b>2.c.2. Sintesi dello stato dell'Arte</b>	<b>pag. 32</b>
<b>3. DESCRIZIONE DELL'AREA IN STUDIO</b>	<b>pag. 39</b>
<b>3.a. Inquadramento geografico e climatico</b>	<b>pag. 39</b>
<b>3.b. Inquadramento geologico e geomorfologico</b>	<b>pag. 43</b>
<b>3.c. Inquadramento floristico</b>	<b>pag. 45</b>
<b>3.d. Progetto Rete Natura 2000</b>	<b>pag. 53</b>
<b>4. MATERIALI E METODI</b>	<b>pag. 55</b>
<b>4.a. Evoluzione del manto nevoso</b>	<b>pag. 55</b>
<b>4.a.1. Caratteristiche nivologiche: gradiente termico e densità del manto nevoso</b>	<b>pag. 55</b>
<b>4.a.2. Misure dell'altezza della neve</b>	<b>pag. 57</b>
<b>4.b. B.T.S ( Bottom Temperature of winter Snow cover)</b>	<b>pag. 59</b>
<b>4.c. Data loggers</b>	<b>pag. 60</b>
<b>4.c.1. TDD (Thawing Degree Days), FDD (Freezing Degree Days) e</b>	

GDD (Growing Degree Days)	<i>pag. 57</i>
4.d. Rilievo fenologico della vegetazione	<i>pag. 61</i>
<b>5. RISULTATI</b>	<i>pag. 65</i>
5.a. Evoluzione del manto nevoso	<i>pag. 65</i>
5.a.1. <i>Gradiente termico e densità del manto nevoso</i>	<i>pag. 65</i>
5.a.2. <i>Pattern di evoluzione del manto nevoso</i>	<i>pag. 67</i>
5.b. B.T.S, distribuzione del permafrost	<i>pag. 72</i>
5.c. Data loggers	<i>pag. 77</i>
5.c.1. <i>GST, regime termico del suolo a 2 e 10 cm</i>	<i>pag. 73</i>
5.c.2. <i>Confronto del GST tra suolo nudo e diversi tipi di vegetazione</i>	<i>pag. 76</i>
5.c.3. <i>Confronto del GST con il periodo d'innevamento</i>	<i>pag. 81</i>
5.c.4. <i>TDD, FDD e GDD</i>	<i>pag. 86</i>
5.d. Fenologia della vegetazione	<i>pag. 84</i>
5.d.1. <i>Confronti intraspecifici e tra associazioni vegetali</i>	<i>pag. 86</i>
5.d.2. <i>Andamento medio delle forme di crescita</i>	<i>pag. 90</i>
5.d.3. <i>Distanza delle fasi fenologiche dallo snowmelt</i>	<i>pag. 92</i>
5.d.4. <i>Confronto della fenologia con TDD e GDD</i>	<i>pag. 93</i>
<b>6. DISCUSSIONE</b>	<i>pag. 96</i>
6.a. Caratteristiche nivologiche	<i>pag. 96</i>
6.b. BTS, distribuzione del permafrost	<i>pag. 97</i>
6.c. Pattern di evoluzione del manto nevoso	<i>pag. 98</i>
6.d. Regime Termico Superficiale e Regime Termico del Suolo	<i>pag. 99</i>
6.e. Analisi della fenologia della vegetazione in ambiente alpino d'alta quota	<i>pag. 101</i>
<b>7. CONCLUSIONI</b>	<i>pag. 108</i>
<b>8. RINGRAZIAMENTI</b>	<i>pag. 110</i>
<b>9. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI</b>	<i>pag. 111</i>
<b>10. APPENDICI</b>	<i>pag. 118</i>

## **1. INTRODUZIONE E OBIETTIVI**

Il riscaldamento globale e le pressioni antropiche stanno inducendo importanti cambiamenti dell'ambiente montano, che costituiscono un tema di profonda attualità e vengono studiati usando diversi approcci, tra i quali lo studio del dinamismo glaciale, del dissesto idrogeologico, delle condizioni climatiche e degli ecosistemi e delle loro risposte agli impatti del cambiamento climatico.

Gli ecosistemi e gli ambienti alpini (in particolare di alta quota), analogamente agli ecosistemi polari, presentano una maggiore sensibilità agli impatti del cambiamento climatico rispetto ai sistemi ambientali delle medie e basse latitudini o di bassa quota (IPCC, 2001, 2007). Per questo motivo il loro studio è di prioritaria importanza per riconoscere in anticipo e contrastare gli impatti negativi del cambiamento climatico.

La vegetazione alpina d'alta quota, infatti, costituisce un ottimo esempio di equilibrio tra i biomi ed i fattori ambientali ed è un marker molto importante per studiare gli effetti del *Global change*, in quanto l'ecosistema alpino è molto sensibile e caratterizzato dalla presenza di risposte più veloci ai cambiamenti del clima, rispetto ad un qualsiasi ecosistema mesofilo o di pianura (Cannone *et al.*, 2007). Gli impatti del cambiamento climatico sui sistemi vegetali comprendono modificazioni della distribuzione spaziale, della composizione floristica, della struttura, ma anche del funzionamento e dei ritmi stagionali (fenologia) delle specie e di intere comunità vegetali (Keller, 2005; Ramming *et al.*, 2009; Forrest *et al.*, 2010). Si può così studiare la fenologia delle piante per vedere quanto può esserne influenzata, (in quanto direttamente correlata ad alcuni importanti parametri climatici), oppure si può analizzare la dinamica delle popolazioni e quindi vedere a lungo termine l'espansione in quota della vegetazione. Inoltre è importante studiare la fenologia delle piante alpine per poter usufruire di modelli da applicare ad altre piante e altri settori, dal forestale, all'agronomico, all'agricolo, nonostante non vi sia concordanza sull'estrapolazione di modelli predittivi alle vegetazioni di bassa quota, in quanto le aree alpine sarebbero debolmente accoppiabili a quelle di pianura (Barry, 1990; Greenland, 1989).

La vegetazione alpina d'alta quota, infatti, è caratterizzata da ecosistemi molto specializzati a resistere alle determinate condizioni di rigidità climatica date dal manto nevoso, dai forti venti, da una maggiore insolazione, dai cicli di gelo e disgelo molto frequenti, e da altri fattori strettamente legati allo sviluppo altimetrico. Un ecosistema di questo tipo risulta essere molto sensibile in quanto si trova in perfetto equilibrio con l'ambiente che lo circonda, e quindi strettamente legato anche solo ad un minimo cambiamento dei fattori ambientali.

Da un punto di vista geomorfologico, l'ambiente alpino è caratterizzato dalla presenza di due elementi di grande importanza: i ghiacciai ed il permafrost. Inoltre in ambito alpino, sono frequenti e caratterizzanti, eventi geomorfologici che costituiscono un notevole pericolo anche per l'uomo, quali dissesti da valanga, frane, smottamenti, debris flow, eventi molto comuni nell'area studiata nel corso della ricerca, in quanto collegabili molto spesso alla presenza di permafrost, ed alla sua degradazione. A titolo di esempio basta pensare ai 10-15 milioni di m<sup>3</sup> di roccia caduti nel 18 settembre 2004 dalla Punta Thurwieser (gruppo Ortles-Cevedale); o al crollo della parete del M.te Cervino nell'estate del 2003.

Ma che cos'è il permafrost?

Negli ultimi anni l'interesse da parte delle Istituzioni e anche da parte dell'opinione pubblica sul permafrost è aumentato notevolmente, nonostante via sia ancora molta confusione su questo aspetto. Si definisce permafrost "un qualsiasi materiale che rimane al di sotto della temperatura di 0°C per più di due anni consecutivi"(Brown e Kupsch,1974); da qui si deduce che il permafrost può essere sia un corpo contenente acqua gelata sia un corpo asciutto, può contenere acqua liquida, in seguito ad un punto di congelamento dell'acqua più basso, può essere sia un ammasso roccioso sia un terreno sciolto, ed è caratterizzato da movimenti di



**Figura 1.1:** vista del rock glacier Foscagno dalle pendici del M.te Sattaron.

aggradazione (aumento) e degradazione (diminuzione) del volume in seguito ai cambiamenti dei parametri climatici. L'area oggetto di studio, la Vallaccia Corta, in alta Valtellina,

comprende un circolo glaciale, nel quale si estende un vasto rock glacier, con un corpo di ghiaccio e permafrost di notevole dimensioni (figura 1.1). Tra gli elementi del paesaggio periglaciale Alpino, i rock glaciers sono riconosciuti come una delle principali manifestazioni della presenza di permafrost (Haeberli, 1985; Barsch, 1996).

La dinamica del permafrost è molto complessa così come le interazioni con il clima e la biosfera, ma il bilancio energetico dipende dal tipo di copertura che, in ambiente alpino, è rappresentata dalla copertura nivale e dalla copertura vegetale.

La vegetazione, infatti, influisce notevolmente sull'evoluzione del manto nevoso, e quindi è utile studiarla ai fini di capire l'influenza sul bilancio energetico netto dei suoli. In particolare, diversi tipi di copertura vegetale influenzano in modo diretto sulla superficie, facendone variare albedo, remissività e modificando i flussi di calore latente e calore sensibile, in quanto diversi tipi di vegetazione modificano il contenuto d'acqua del terreno e la velocità del vento in superficie. La vegetazione agisce anche aumentando in alcuni casi la velocità di scioglimento della neve: in genere per individui con struttura alta e ramificata, che uscendo prima dal manto nevoso, e, avendo albedo minore rispetto alla neve, divengono fonti di calore (Pomeroy, 2006; Guglielmin *et al.*; 2007). Questo fenomeno è dovuto inoltre alla densa struttura delle piante di alta quota, che per proteggersi dai rigori dell'inverno, si compatta e diventa ad esempio ad arbusto nano o cuscinetto, creando un aumento notevole della temperatura all'interno della pianta (ad esempio è documentato un aumento fino a tre volte superiore la temperatura dell'aria esterna in *Loiseleurietum*, Reisingl e Keller, 2001). Inoltre la vegetazione influisce anche sulla rugosità della superficie abbassando la velocità del vento e favorendo così l'accumulo della neve.

Da ultimo, il 2010, ormai alla conclusione, è stato proclamato dall'Assemblea generale delle Nazioni Unite quale Anno Internazionale della Biodiversità. L'ambiente alpino contribuisce ad aumentare la biodiversità delle nostre regioni e della nostra penisola dal punto di vista animale, vegetale e paesaggistico. Dal punto di vista vegetale esso risulta infatti essere ricco di specie e associazioni che popolano i pascoli di alta quota, i pendii rocciosi, le creste ventose, le vallette nivali, le torbiere, le cime delle montagne rendendo questi ambienti del tutto "biodiversi". Ma anche all'interno delle singole vegetazioni, per esempio in una prateria alpina, esiste una complessa rete di rapporti trofici che caratterizza questi ecosistemi. Guardando quindi anche con un approccio "ecologico" a questi tipi di ambienti si possono evidenziare i meccanismi che regolano la dinamica degli ecosistemi e rendono possibile la diversità degli organismi viventi.



*Fig 1.2: vista frontale del rock glacier*

Il presente studio è finalizzato a diversi obiettivi, ma in primo luogo a sottolineare quali sono le dinamiche e le relazioni che intercorrono tra vegetazione, neve e permafrost. Infatti il bilancio termico annuale del permafrost, che è molto importante per studiare l'evoluzione climatica, è strettamente legato al manto nevoso, e non tanto in termini di quantità, ma soprattutto in termini di durata, ossia per quanto tempo questo tende a rimanere sulla superficie. Esso dipende anche dal tipo di struttura della vegetazione, dalla quale a sua volta dipende l'accumulo nevoso. Per studiare l'evoluzione del manto nevoso è stata misurata, durante questo studio, la persistenza della neve in diversi punti del rock glacier Foscagno. Lo scioglimento totale della neve, "*snow melt*", segna l'inizio della stagione vegetativa, ed è quindi di fondamentale importanza nello studio della fenologia delle piante: infatti piante con differenti periodi di fioritura e di formazione delle foglie rispondono in modo diverso al prolungamento della durata del manto nevoso (Walker, 1993; Galen & Stanton, 1995). Per esempio le piante sempreverdi accorciano il periodo di vita della foglia oppure gli arbusti decidui avranno a disposizione un periodo vegetativo più lungo, come conseguenza di uno snow melt anticipato. Per quanto riguarda invece la senescenza fogliare, essa avviene con minori variazioni nel periodo autunnale in quanto controllata foto periodicamente (Kudo,1992).

Studiare la fenologia delle piante significa studiare le fasi del ciclo vitale della pianta. E' una disciplina che interessa molti settori, ma nel nostro studio servirà per capire il legame con i fattori ambientali e di conseguenza quali possono essere le potenziali implicazioni col cambiamento climatico. La fenologia infatti rappresenta una risposta molto immediata agli

stimoli ambientali (Suzuki & Kudo, 1997; Price & Waser, 1998; Aerts, 2004; Studer *et al.*, 2005; Sherry, 2007; Cleland, 2007; IPCC, 2007).

Con questo lavoro si è andati a misurare gli stadi fenologici di diverse specie target, per poter fare dei confronti, in fase elaborativa, tra questi e i parametri abiotici. Le piante sono state scelte secondo determinati criteri, e sono state studiate negli stessi punti in cui si è misurato lo snow-melt, segnalati con delle paline “da slalom”.

In corrispondenza di alcune di queste paline sono presenti dei data loggers, installati ormai da diversi anni, per la misura della temperatura del suolo, a due diverse profondità (2 cm e 10 cm). E' stato possibile anche usufruire dei dati della stazione meteo presente nelle vicinanze dell'area in studio (ARPA, Stazione meteo Vallaccia di Livigno), concessi da ARPA meteo, regione Lombardia. Confrontando diversi tipi di vegetazione, il suolo nudo, su diversi tipi di morfologie di versante, si può caratterizzare ulteriormente la relazione neve – vegetazione – permafrost. Infatti il bilancio termico superficiale, e di conseguenza il “*Ground Surface Temperature*” (GST), regime superficiale del suolo, e il “*Ground Thermal Regime*” (GTR), regime termico del suolo, possono essere notevolmente influenzati dalla copertura vegetale, e a loro volta, sono i fattori principali nella regolazione delle dinamiche del permafrost, come dimostrato sui suoli dell'Antartide (Cannone & Guglielmin, 2009).

Inoltre per lo studio delle caratteristiche termiche dello strato attivo del permafrost e per indagarne la diffusione spaziale, è stato usato il metodo del BTS (*Bottom Temperature of winter Snow cover*), un metodo di indagine da poco usato sulle Alpi (Guglielmin e Tellini, 1993-1994), ma che mostra forti correlazioni con altri metodi di indagine del permafrost, ad esempio con la sismica a rifrazione (Haeberli & Patzelt, 1983), oppure con le prospezioni elettriche (Guglielmin & Lozej, 1992). Il metodo consiste nella misurazione della temperatura alla base del manto nevoso. Il BTS, è un indicatore perfetto del bilancio termico dello strato attivo e quindi della presenza di permafrost; da un altro punto di vista costituisce anche un utile aiuto per studiare la vegetazione, in quanto essendo indicatore della diffusione spaziale del permafrost, permette di verificare quanto possano essere correlate le piante con la distribuzione di suolo gelato. Infatti le piante possono indicare la diversa distribuzione del manto nevoso invernale (Clark *et al.*, 1993), e allo stesso tempo anche il tipo di drenaggio del suolo (Liu Qingren *et al.*, 1993) e quindi indirettamente la presenza di permafrost.

In sintesi gli obiettivi della presente ricerca sono:

-analisi della distribuzione del manto nevoso su 69 punti, presenti sul rock glacier Foscagno e in prossimità di questo, scelti secondo il tipo di rilievo e diversi pattern di colonizzazione vegetale del piano subalpino, alpino e nivale;

- uso del metodo del BTS per indagare la distribuzione del permafrost; in aggiunta confrontando osservazioni nivologiche in tre punti con valori di BTS diversi;
- studio del regime termico delle porzioni più superficiali dei suoli (a 2 e 10 cm di profondità) attraverso l'utilizzo di data loggers, confrontando l'effetto tampone di diversi tipi di copertura vegetale rispetto al suolo nudo: *Vaccinium uliginosum*, *Rhododendron ferrugineum*, *Salix herbacea*, *Carex curvula*, *Loiseleuria procumbens*, *Cerastium uniflorum*.
- analisi della fenologia di alcune specie target del piano subalpino (*Vaccinium uliginosum*, *Rhododendron ferrugineum*), alpino e nivale (*Carex curvula*, *Loiseleuria procumbens*, *Salix herbacea*, *Luzula alpino-pilosa*, *Doronicum clusii*, *Poa laxa*, *Geum reptans*, *Veronica alpina*, *Cerastium uniflorum* e *Ranunculus glacialis*), scelte in base al tipo di ecologia e di forma strutturale tra le 37 specie monitorate nei 69 punti dove è stata analizzata la distribuzione nivale nel periodo invernale.

## 2. STATO DELL'ARTE

### 2.a. ELEMENTI GEOMORFOLOGICI

L'area in studio, così come tutte le valli alpine, è il risultato di diversi tipi di processi morfogenetici, che nel corso del tempo l'hanno modellata e hanno dato il risultato che oggi possiamo vedere. Di seguito si riportano i tre tipi di ambienti morfogenetici principali riscontrabili nell'area oggetto di studio.

#### 2.a.1. *Ambiente glaciale*

I ghiacciai sono un agente morfogenetico importante, sia a piccola scala ma anche a grande scala. Nell'area investigata sono presenti forme geomorfologiche di origine glaciale che sono la testimonianza della passata presenza dei ghiacciai nel periodo Tardiglaciale (Guglielmin, 1997):

- **Rocce montonate:** rientrano tra le forme di erosione a piccola scala con dimensioni che vanno dal metro a qualche decina di metri; sono rocce lisce ed arrotondate nel verso del ghiacciaio, presentano un lato liscio sopraflusso ed un tronco sottoflusso che si genera per trazione del ghiaccio sulla roccia.
- **Rocce a dorso di balena:** rocce lisce ed arrotondate dal ghiacciaio, ma che sono lisce su tutti i lati. Per capirne l'orientamento si fa riferimento ad altre forme di erosione ad una scala ulteriormente più piccola.
- **Circhi glaciali:** depressioni sub circolari a forma di anfiteatro, generalmente chiuse in direzione verso valle da una soglia rialzata, detta appunto *soglia glaciale*, dove spesso troviamo rocce montonate o a dorso di balena e contornate da pareti molto ripide sui lati a monte. Rientrano tra le forme di erosione a grande scala dell'ambiente glaciale, anche se non sono dovuti solo all'erosione ad opera del ghiacciaio. Ad esempio una componente importante per la loro formazione è l'escavazione delle acque durante i periodi di disgelo che si alternano ai periodi glaciali. Non sono altro che una grossa depressione a forma di conca in contropendenza, e possono essere pieni di detriti. Nell'emisfero boreale, i circhi glaciali sono generalmente rivolti verso NE, poiché questo orientamento garantisce una maggiore protezione dall'irraggiamento (Casati, 1990). Sono molto diffusi sulle Alpi dove è in atto un forte processo di deglaciazione, infatti rappresentano il termine ultimo del processo di ritiro del ghiacciaio, una sorta di strategia difensiva, insieme al ricoprimento

di questo di una “coperta” di detriti. Qui infatti la neve tende ad accumularsi, come anche le valanghe, arriva meno luce e quindi il bilancio di massa del ghiacciaio risulta essere meno negativo.

- **Cordoni morenici:** forme di deposito glaciale, che si formano nella zona di ablazione del ghiacciaio, per accumulo di materiale endoglaciale o sopraglaciale. Sono quindi composti da *till*, cioè depositi non selezionati, eterogenei dal punto di vista granulometrico. In funzione della modalità di trasporto si ha la produzione di depositi morenici differenti sia nella struttura che nell'orientamento. La dimensione del deposito è funzione della durata, della posizione e della permanenza del ghiacciaio in questa posizione.
- **Fluted moraine:** forme allungate che si sviluppano in *till di alloggiamento*, cioè till che si deposita per spalmatura del detrito glaciale alla base di un ghiacciaio, per fusione da pressione o altri processi meccanici e possono essere presenti in ghiaie e in sabbie fluvioglaciali. La maggior parte si sviluppa a valle di grossi massi, e presenta una forma con una punta diretta verso valle in direzione del flusso. I clasti presenti sono sagomati a ferro da stiro e hanno l'asse maggiore parallelo alla direzione del flusso. Si formano per estrusione (*squeezing*) di till saturo in acqua, nella cavità che si viene a formare a valle del masso. Vanno da dimensioni di cento metri fino a chilometri, ma sulle Alpi, così come nella zona in studio le dimensioni sono più piccole. Normalmente sono distanziate un paio di metri l'una dall'altra. Rientrano nella categoria delle morfologie sottoglaciali parallele al flusso del ghiacciaio.

### **2.a.2. Ambiente periglaciale**

Si definisce come tale un ambiente con temperatura media annua inferiore ai  $-3^{\circ}\text{C}$  e precipitazioni annue inferiori ai 2500 mm annui. In una prima accezione del termine si intendevano le condizioni climatiche associate ai processi di alterazione dovuti al gelo, *frost weathering* (Lozinski, 1909). In una seconda accezione si fa riferimento alle condizioni climatiche e geomorfiche delle aree marginali delle calotte glaciali pleistoceniche (French, 1986), e nella letteratura moderna viene esteso a diversi ambienti geograficamente distanti.

All'interno dell'ambiente periglaciale possiamo identificare un campo più ristretto che è l'ambiente con permafrost, il quale normalmente viene collocato con temperatura media annua dell'aria (MAAT) minore di  $-1^{\circ}\text{C}$  e precipitazioni sempre inferiori ai 2500 mm annui. La prima definizione di permafrost è “un qualsiasi terreno che rimane congelato per più di un anno” (Muller, 1947). In una visione più moderna si definisce permafrost “*qualsiasi terreno*

*che rimane sotto alla temperatura di 0°C per più di due anni consecutivi*” (Brown e Kupsch, 1974). Esso occupa il 26 % della superficie terrestre, con uno spessore che varia in genere tra i 10 e i 500 m, anche se in zone come la Siberia raggiunge i 1400 m di profondità (Guglielmin, 1997). E' presente sia alle alte latitudini sia alle quote più elevate delle medie e basse latitudini. Per le Alpi Italiane si stima per eccesso un'area di 50.000 km<sup>2</sup>.

Sulla formazione del permafrost sono state fatte varie ipotesi, secondo alcuni Autori si è formato durante condizioni climatiche del Pleistocene, secondo altri, durante condizioni del clima più recente. Il permafrost non implica la presenza di ghiaccio, e può esserlo sia un corpo roccioso, sia del suolo indipendentemente dalle caratteristiche tessiturali e litologiche. La sua presenza è strettamente legata alla temperatura media annua del suolo (TMASS), che definisce la porzione di terreno che rimane per due anni inferiore a 0°C (Guglielmin, 1997), identificando la *tavola del permafrost* (French, 1988). Una caratteristica del permafrost è di avere uno *strato attivo* superficiale, che durante la stagione calda può trovarsi al di sopra del punto di congelamento, di spessore variabile da pochi centimetri a qualche metro in base alle condizioni climatiche. La prima classificazione del permafrost infatti viene fatta su base climatica, con l'ausilio della temperatura media annua dell'aria, MAAT, e delle precipitazioni, ppt (Haeberli, 1985):

- *Permafrost continuo*: MAAT < -8°C ; ppt < 500 mm/anno
- *Permafrost discontinuo*: -8°C < MAAT < -1°C ; ppt < 2500 mm/anno
- *Permafrost sporadico*: MAAT > -1°C ; ppt < 2500 mm/anno ; TMASS ≤ 0°C

Una seconda classificazione viene data secondo classi percentuali (Harris, 1986):

- *Permafrost continuo*: >80%
- *Permafrost discontinuo*: 30% < permafrost < 80%
- *Permafrost sporadico*: < 30%

Il permafrost reagisce in modo diverso in funzione dell'intensità e della durata delle variazioni di temperatura superficiale, diventando in questo modo uno strumento utile come indicatore climatico a scale temporali diverse con risoluzioni differenti (Guglielmin, 2007):

- Variazioni dello spessore dello strato attivo (stagionali)
- Variazioni del profilo termico sino alla Profondità di Oscillazione Minima Annua (POMA=ZAA, *Zero Annual Amplitude*) (annuali)
- Variazioni del profilo termico al di sotto di POMA (decennali-secolari)
- Variazioni dello spessore del permafrost (variazioni decennali-millennari)

Le variazioni del permafrost possono essere rilevanti anche dal punto di vista idrologico, basta pensare alle conseguenze dell'ispessimento dello strato attivo che porterebbe ad un

aumento dell'infiltrazione ed una diminuzione del deflusso superficiale, con implicazioni rilevanti sulla vegetazione, e di nuovo con feedback imprevedibili sull'evoluzione stessa del permafrost (Cannone *et al.*, 2007).

I processi periglaciali si caratterizzano più che altro per l'intensità e la frequenza con la quale agiscono più che per l'esclusività a questo ambiente:

- **Frost heave o criosollevamento:** consiste nel sollevamento di particelle di suolo per opera di lenti di ghiaccio che si vengono a formare all'interno del suolo a causa del gelo (French, 1976). L'acqua risale dagli strati inferiori non congelati e raggiunge queste lenti alimentandone dal basso verso l'alto, ne consegue un innalzamento del sedimento sovrastante.
- **Frost creep o reptazione crionivale:** durante i cicli di gelo e disgelo, il suolo subisce rigonfiamenti e contrazioni, durante le quali sui versanti più inclinati, le particelle più esposte non tornano in posizione originaria, ma si spostano verso valle, con un movimento proporzionale all'inclinazione del pendio.
- **Geliflussione :** si tratta di un movimento plastico verso valle della parte superficiale del suolo che avviene quando la copertura detritica viene imbibita dalle acque meteoriche o dalle acque di disgelo (Carton & Pelfini, 1991) .
- **Nivazione:** termine col quale si intendono i processi geomorfici operati dalla neve che accadono ad opera del gelo e delle basse temperature.
- **Termocarsismo:** corrisponde al collasso della superficie topografica per fusione localizzata del permafrost.

Questi processi portano alla creazione di particolari forme, suddivisibili in base alla scala in *mesoforme* e *microforme*, le prime riconoscibili da foto aeree, e le secondo di dimensioni minori (Guglielmin,1997). Nell'area investigata sono presenti le seguenti forme:

- **Lobi e terrazzi di geliflusso:** accumuli detritici in forma di lobi allungati (*lobi di geliflusso*), oppure a forma di terrazzo, più larghi che lunghi (*terrazzi di geliflusso*), possono essere coperti o meno dalla vegetazione, hanno margini netti, da qualche centimetro fino a qualche metro.
- **Pipe creeps o aghi di ghiaccio:** cristalli di ghiaccio a struttura fibrosa, lunghi alcuni centimetri, che si formano in direzione perpendicolare rispetto alla superficie topografica. Sono dovuti all'effetto dell'improvviso raffreddamento notturno, della parte più superficiale di un terreno umido. Durante il giorno si sciolgono e danno luogo a quel

fenomeno detto *reptazione crionivale*, se superiore ai 2° di inclinazione, altrimenti è semplice sollevamento. Il ripetersi di numerosi di questi cicli provoca il movimento di una discreta quantità di materiale, in base all'inclinazione del pendio e alla consistenza degli aghi.

- **Block field o Campi di pietre:** superfici pianeggianti costituite prevalentemente da blocchi angolari appoggiati con la faccia più ampia sulla superficie o disposti a spigolo (Carton & Pelfini, 1991). Caratterizzati da assenza di materiale fine gradualmente asportato dalle acque di fusione nivale.
- **Block streams:** accumuli di blocchi spigolosi, con composizione litologica uguale a quella del substrato, che hanno origine in zone pianeggianti o con scarsa pendenza. Sono utilizzati come indicatori di permafrost continuo e discontinuo (Guglielmin, 1997).
- **Blocchi aranti:** blocchi di dimensioni anche metriche che in seguito a fenomeni di geliflussione scivolano verso valle con maggior velocità rispetto al terreno circostante. Creano forme particolari con a monte del masso un solco nel terreno, e a valle una ruga, costituita dal materiale spinto in avanti.
- **Festoni semilunari:** forme con un contorno terroso o ricoperto di specie vegetali erbose e sono orientati lungo la stessa direzione; sono caratteristici di terreni piani o in leggero pendio, lungo il quale migrano verso valle per fenomeni di geliflusso.
- **Suoli strutturati:** forme dovute ai cicli di gelo e disgelo e di imbibizione e disseccamento e presentano una grande varietà dal punto di vista della selezione del materiale, della morfologia e della disposizione superficiale (Guglielmin, 1997). Nell'area in questione si possono incontrare i seguenti suoli strutturati:
  - **cuscineti erbosi e cuscineti di terra:** piccoli rigonfiamenti, di norma presenti in gruppo, su terreni umidi. Sono alti alcuni decimetri e in sezione presentano una forma arrotondata, sul piano, o una forma poligonale, su un pendio. Al loro interno si trova un nucleo di suolo gelato che ne provoca il rigonfiamento, nel periodo di gelo, o al contrario ne provoca il collasso con la fusione. Si tratta di suoli strutturati ma non selezionati.
  - **suoli striati:** suoli che presentano un andamento alternato con strisce di materiale grossolano e di terriccio disposte in modo parallelo, o per lo meno allineate lungo la linea di massima pendenza.
  - **suoli a gradinata:** sono suoli strutturati caratterizzati dalla presenza di forme dall'aspetto a gradino, costituite da un piano ricoperto di ciottoli o blocchi e da un

salto coperto interamente o parzialmente da vegetazione. I gradini sono tra loro paralleli e seguono l'andamento delle isoipse (Carton & Pelfini, 1991).

- **Nivomorene o *Protalus Rampart*:** sono accumuli detritici ubicati ai piedi di falde detritiche e che sono caratterizzati da uno sviluppo parallelo alle linee di livello con una scarpata verso valle più acclive di quella verso monte. Vi sono due modelli particolarmente accreditati per quanto riguarda la loro formazione: il primo secondo il quale il materiale detritico scivola sul nevaio e si accumula al suo piede, il secondo per il quale depositi detritici in condizioni criotiche possono deformarsi per *creep* generando accumulo al piede, tale fenomeno cessa se il substrato sottostante non ha una inclinazione favorevole.
- **Ghiaccio stagionale:** particolare tipologia di ghiaccio che si origina all'interno di terreni interessati dall'alternarsi di una fase di congelamento, durante la stagione invernale (Guglielmin,1997), e di una successiva fase di scongelamento in concomitanza con la stagione estiva.
- **Frane da disgelo:** frane di distacco limitate allo spessore dello strato attivo. La tavola del permafrost funge da piano di scivolamento e da impermeabile, favorendo la saturazione dello strato attivo stesso fino alla rottura. Tali frane possono evolvere in colate di fango.
- **Rock Glaciers:** sono corpi costituiti da blocchi angolari in superficie, di forma lobata, linguoide o spatolata con evidenti strutture di flusso superficiali, rughe alternate a solchi lungo i fianchi e anche al centro, paralleli alla direzione di flusso. La caratteristica di questi corpi è quella di avere al loro interno del ghiaccio, il quale può avere origini diverse; infatti un rock glacier può derivare dal ricoprimento di un piccolo ghiacciaio relitto da parte di detriti grossolani (*ice-cored rock Glacier*), oppure da accumulo di ghiaccio per congelamento di acque percolanti, o per compattazione di detriti e neve di valanga (*ice-cemented rock Glacier*) (Potter, 1972; White,1971). Un' ulteriore classificazione viene fatta per quei rock glacier situati alla base di un ghiacciaio e per i quali il deposito che li costituisce è *till*: questi sono detti *Debris rock Glaciers*; quando si trovano ubicati ai piedi di una falda detritica e sono fatti di depositi detritici di versante sono chiamati *Talus rock Glaciers*.

Nel corso degli anni sono state proposte varie classificazioni dei rock glaciers, ma quella attualmente più usata fa riferimento al dinamismo, ossia alla presenza o assenza di movimento superficiale; si distinguono pertanto rock glaciers *attivi*, *inattivi*, *relitti* e *fossili*. Una buona distinzione tra i rock glaciers inattivi e fossili può essere fatta in base alla presenza o meno di ghiaccio relitto (Barsch, 1988). Inoltre i rock glaciers attivi hanno

una fronte molto inclinata con un angolo maggiore rispetto all'angolo di riposo del materiale che la costituisce.

Anche le caratteristiche e i pattern di vegetazione permettono di discriminare i rock glaciers attivi da quelli inattivi (Fraunfelder, 1997; Cannone, 1997; Cannone, 1999). Tanto che la vegetazione viene utilizzata tra i criteri descrittivi delle caratteristiche morfodinamiche dei rock glaciers (Seppi, Baroni *et al.*, 2004). Esistono comunque molti lavori sulle relazioni tra le dinamiche delle vegetazioni e i rock glaciers e/o il permafrost (Jhonson, 1963; Burga, 1987; Burga, 2004).

Invece, un'ulteriore classificazione dei rock glaciers attivi può essere tra quelli *in equilibrio*, cioè quelli “con il profilo medio della parte centro-frontale del corpo convesso e con uno strato attivo di spessore inferiore ai 5 m”, e quelli *non in equilibrio*, “morfologicamente instabili con profilo medio della parte centro-frontale quasi piano o concavo e strato attivo, o porzione di sedimenti non congelata, di spessore superiore ai 5m” (Guglielmin, 1997). Alcuni autori inoltre ritengono che la causa principale del movimento dei rock Glacier sia da imputare al creep del permafrost (Wahrhafting & Cox, 1959; Linder & Marks, 1985; Carton & Pelfini, 1991). Le ondulazioni e le rughe presenti sulla superficie sono la testimonianza del lento movimento, che anche nel caso di una forma “veloce”, non supera il metro all'anno, contro le decine di metri di movimento di un ghiacciaio caldo. Inoltre la loro forma ad arco convesso indica una maggior mobilitazione al centro rispetto ai lati.

### **2.a.3. Ambiente gravitativo**

Le principali forme gravitative di versante rinvenibili nell'area in studio sono:

- **Debris flow:** fenomeno che consiste nel trasporto di materiale solido da parte di un fluido. Sono flussi gravitativi in cui il fango è dal punto di vista dinamico la componente dominante della dispersione. Sono miscele di detriti eterometrici, fango (limo, argilla e sabbia), e acqua. La densità tipica varia da 1,8 g/cm<sup>3</sup> a 2,5 g/cm<sup>3</sup>. Un debris flow si comporta come un fluido incoerente monofase, in quanto la parte fluida è intrappolata tra gli spazi dei detriti più grossolani. Sono fenomeni molto pericolosi in quanto si possono muovere verso valle con una velocità che può raggiungere i 10 m/s.
- **Depositi di frana di crollo:** le frane di crollo consistono nel distacco improvviso di grosse masse di roccia, disposte su pareti molto ripide. Il movimento si svolge

prevalentemente nell'aria. Le principali cause innescanti sono l'aumento della circolazione idrica, cicli di gelo e disgelo, cicli umido-asciutto, aumento del carico sovrastante e lo sviluppo di apparati radicali di piante. Le falde detritiche e i coni detritici sono le forme più tipiche di accumulo del materiale franato e i clasti costituenti sono sempre angolosi o sub angolosi.

- **Falde di detrito:** in presenza di un versante con una pendenza più o meno regolare, dalla parete, per vari processi di alterazione si possono staccare dei blocchi o dei ciottoli che si accumulano in questo piano. A valle si trovano ciottoli più grossi, mentre verso monte prevale la presenza di materiale fine.
- **Canaloni di valanga:** localizzate in aree di alta montagna sovente soggette a fenomeni valanghivi. Consistono in ampi solchi a fondo concavo, che si sviluppano lungo la linea di massima pendenza (Carton & Pelfini, 1991); alla base dei solchi si accumula il materiale detritico trascinato dalle valanghe che forma strutture a coni e a lobi.
- **Deformazioni gravitative profonde:** fenomeni di grandi dimensioni che interessano i versanti in profondità, il cui movimento interessa in maniera evidente la parte più alta del versante. Si verificano in versanti con alta energia di rilievo e presentano una velocità di deformazione molto bassa. Possono manifestarsi in diversi modi localmente: creste doppie, trincee, fratture beanti, doline in cresta, superfici di collasso immerse a franapoggio, contropendenze sui versanti, vallette parallele al versante, rigonfiamento della parte bassa del versante (morfologia hummocky del versante).

#### **2.a.4. Sintesi dello stato dell'arte**

- Nangeroni, 1954: descrive accuratamente le forme geomorfologiche presenti sui monti del Livignasco, soffermandosi in particolare sui processi che le hanno generate.

- Pietracarpina, 1963: fornisce una dettagliata descrizione dei monti ad ovest del gruppo Ortles-Cevedale nelle Alpi Retiche, enunciandone le caratteristiche geologiche, geomorfologiche e climatiche. In base alla vegetazione presente, l'autore suddivide l'area in tre zone altitudinali: fondovalle (1200-1600 m, foreste di aghifoglie), medio-alpina (1600-2000 m, brughiera ad arbusteti nani), alpina (oltre 2000 m, vegetazione erbacea).

-Guglielmin; 1989: pubblica la carta geomorfologica del Monte Foscagno, riportandone le forme geomorfologiche principali presenti.

-Carton & Pelfini; 1991: in un capitolo del loro lavoro descrivono il paesaggio periglaciale d'alta montagna, soffermandosi sulle singole forme e sui processi ad esse legate.

-Guglielmin & Tellini; 1992: analizzano 79 rock glaciers del Livignasco (Alta Valtellina), su un'area di 620 km<sup>2</sup>. E' stata impiegata la foto interpretazione per l'individuazione delle forme, riportate successivamente su una cartografia; lo studio prevedeva anche analisi di campo. I rock glaciers vengono classificati come attivi, inattivi, complessi, dubbi e totali, individuando le quote massime e le quote minime, le esposizioni e la tipologia delle diverse aree. Il 50% dei rock glaciers sono risultati attivi.

-Cannone; 1997: studia la vegetazione periglaciale e crionivale presente su 9 rock glaciers e 3 boulder streams, presentando le relazioni tra vegetazioni e forme periglaciali, ed associando la presenza della stessa a permafrost discontinuo. Le differenze nelle tipologie di vegetazione sono state attribuite al diverso grado di attività delle forme.

-Guglielmin; 1997: propone uno studio approfondito del permafrost alpino presente in Alta Valtellina, descrivendone le fasi di evoluzione, le classificazioni presenti in letteratura, le forme periglaciali ad esso connesse e i metodi di individuazione.

-Cannone; 1999: propone lo studio della dinamica dei rock glaciers presenti in Alta Valtellina tramite l'utilizzo del rilievo fitosociologico, individuando modelli di movimento superficiale, la cui intensità risulta essere legata al grado di attività e non all'età o alla quota a cui si trovano le forme.

-Guglielmin, Cannone, Dramis; 2001: studiano le correlazioni esistenti fra la distribuzione attuale del permafrost montano della valle del Foscagno e nell'area dello Stelvio con l'evoluzione del glacialismo olocenico. Per la ricostruzione del glacialismo è stata impiegata l'analisi geomorfologica, la foto interpretazione e il rilievo fitosociologico.

-Hoersch, Braun e Schmidt; 2002: mettono in relazione la vegetazione alpina di Wallis (Svizzera) con le forme geomorfologiche presenti, impiegando metodologie GIS e di telerilevamento.

-Cannone & Gerdol; 2003: hanno proposto lo studio dell'instabilità superficiale di due rock glaciers attivi (Pisella e La Foppa, Alta Valtellina), utilizzando la vegetazione come indicatore ecologico di instabilità superficiale. La vegetazione delle due forme è stata inoltre confrontata con quella presente sui rock glacier inattivi, individuando alcuni pattern di colonizzazione.

-Cannone, Guglielmin, Hauck, Vonder, Mühl; 2003: mettono in relazione la dinamica passata di un ghiacciaio sullo Stelvio con la presenza di permafrost montano, abbinando tecniche geomorfologiche, geofisiche e fitosociologiche.

-Guglielmin; 2004: approfondisce l'uso del monitoraggio dello strato attivo e del regime termico del permafrost come chiave di interpretazione dei cambiamenti climatici attuali. In particolare nelle regioni alpine la variazione dello strato attivo (tra 193 e 229 cm di profondità) avviene in concomitanza con la variazione della copertura nivale e della temperatura dell'aria. Al contrario nei siti Antartici, il fenomeno sembra essere regolato solamente dalle fluttuazioni termiche dell'aria.

-Guglielmin, Camusso, Polesello, Valsecchi; 2004: vengono mostrati i risultati delle analisi chimiche e cristallografiche effettuati sui campioni del nucleo di ghiaccio estratti dalla parte frontale del rock glacier Foscagno. Sono state effettuate 58 sezioni verticali sottili lungo l'enorme nucleo di ghiaccio, che si trova tra i 2,5 e i 7,5 m di profondità. All'interno di questo è presente una stratigrafia geochemica stagionale; questo fa sì che il rock glacier Foscagno diventi un potenziale archivio paleo climatico, che con ulteriori analisi, può fornire informazioni che riguardano le evoluzioni climatiche registrate nelle Alpi nel periodo Olocenico.

-Brown, Milner, Hannah; 2007: viene approfondita la variabilità temporale e spaziale legata alla fusione della copertura nivale e allo scioglimento dei ghiacciai, il contributo dato dalle acque sotterranee nel giocare un ruolo importante nella disponibilità di acqua degli ecosistemi alpini. Questo studio evidenzia il fatto che la falda sotterranea e le sue caratteristiche, sono molto importanti per la rete idrica alpina e per la biodiversità associata a questi siti.

-Cannone, Guglielmin e Gerdol; 2004: analizzano le relazioni tra le forme periglaciali e la distribuzione della vegetazione delle Isole Svaldbard, impiegando il rilievo fitosociologico e l'analisi statistica (PCA e RDA) per evidenziare le interrelazioni.

## **2.b. FLORA E VEGETAZIONE**

### **2.b.1. Comunità e associazione vegetale**

Le *comunità* rappresentano la parte vivente degli ecosistemi, in esse gli organismi interagiscono e i vegetali svolgono il compito di produzione primaria.

Essendo complesso studiare le comunità nella loro interezza, vengono studiati comparti tassonomici o funzionali (comunità vegetale, comunità dei decompositori, ecc).

Per *comunità vegetale* si intende quindi l'insieme dei vegetali che convivono in un biotopo e che in esso interagiscono; ossia l'insieme delle diverse popolazioni di specie vegetali presenti.

L'interpretazione delle comunità è sempre stata controversa in quanto il concetto di comunità oscilla tra il continuum ecologico (graduale sostituzione di specie) e quello di comunità discrete, ben individuabili in base alla composizione floristica; sebbene quest'ultima, ai fini applicativi, sia la scelta migliore. Il concetto usato per riconoscere comunità discrete è quello del *minimo areale*, quest'area è definibile come il punto oltre il quale aumentando di molto la superficie di campionamento il numero di specie si stabilizza attorno ad un valore.

Sul concetto di comunità discrete si è evoluta l'idea dell'*associazione vegetale*, "un raggruppamento vegetale più o meno stabile ed in equilibrio con il mezzo ambiente, caratterizzato da una composizione floristica determinata, in cui certi elementi quasi esclusivi (specie caratteristiche) rivelano con la loro presenza un'ecologia particolare ed autonoma" (Braun Blanquet, 1951). All'interno di un'associazione si ha per cui coordinazione tassonomica (composizione floristica più o meno costante), spaziale (esistenza di una stratificazione specifica), temporale (stessa fenologia), spazio-temporale (stessa dinamica) e fisiologica (specie sinecologiche).

La storia geologica delle Alpi e dei suoi popolamenti viventi è stata mutevole. Se ora proviamo a rappresentare separatamente e ad ordinare gerarchicamente vari aggruppamenti

vegetali (*sintassonomia*) dobbiamo essere consapevoli del fatto che si tratterà di un'astrazione semplificatrice della realtà effettiva.

In ogni caso la sintassonomia definisce dei *sintaxa*, ciascuno con proprie caratteristiche e con una determinata nomenclatura data da una specifica desinenza:

- Classe: -etea ;
- Ordine: -etalia;
- Alleanza: -ion;
- Associazione: -etum;

Le classi hanno dunque un significato fisionomico, gli ordini un significato ecologico, mentre le alleanze tendono ad avere un significato biogeografico.

### **2.b.2. Quadro sintassonomico (*substrati silicei*)**

- **Orizzonte alpino e nivale**

#### **Vegetazione delle rupi**

**Asplenetea trichomanis** Br.-Bl.;1934

**Androsacetalia vandellii** Br.-Bl.;1926

Androsacion vandellii Br.-Bl.;1926

Androsacetum vandellii Br.-Bl.;1918

#### **Vegetazione delle pietraie e dei detriti**

**Thlaspietea rotundifolii** Br.-Bl.;1926

Androsacetalia alpinae Br.-Bl.;1926

Androsacion alpinae Br.-Bl.;1926

Androsacetum alpinae Br.-Bl.;1918

Oxyrietum digynae (Lüdi,1921) Br.-Bl.;1926

Luzuletum spadiceae (Brockm.-Jer.,1907) Br.-Bl.;1926

#### **Vegetazione delle vallette nivali**

**Salicetea herbaceae** Br.-Bl.,1947

Salicetalia herbaceae Br.-Bl.;1926

Salicion herbaceae Br.-Bl.;1926

Polytrichetum sexangularis (Rübel, 1912) Br.-Bl., 1926

Salicetum herbaceae (Rübel, 1912) Br.-Bl., 1913

**Vegetazione delle praterie alpine acidofile**

**Caricetea curvulae** Br.-Bl., 1948

Caricetalia curvulae Br.-Bl.; 1926

Caricion curvulae Br.-Bl.; 1925

Caricetum curvulae (Kerner, 1863) Borckm.-Jer., 1907

Caricetum hygrocurvuletosum Br.-Bl., 1948-50

Nardion strictae Br.-Bl.; 1926

Nardetum alpigenum Br.-Bl.; 1949

- **Orizzonte alpino inferiore e subalpino**

**Vegetazione degli arbusti nani**

**Vaccinio Piceetea** Br.-Bl.; 1939

Vaccinio Piceetalia Br.-Bl.; 1939

Loiseleurio Vaccinion Br.-Bl.; 1926

Loiseleurio Cetrarietum Br.-Bl.; 1926

Rhododendro Vaccinion Br.-Bl.; 1939

Vaccinium Rhododendretum ferruginei Br.-Bl.; 1927

**2.b.3. Quadro sindinamico (substrati silicei)**

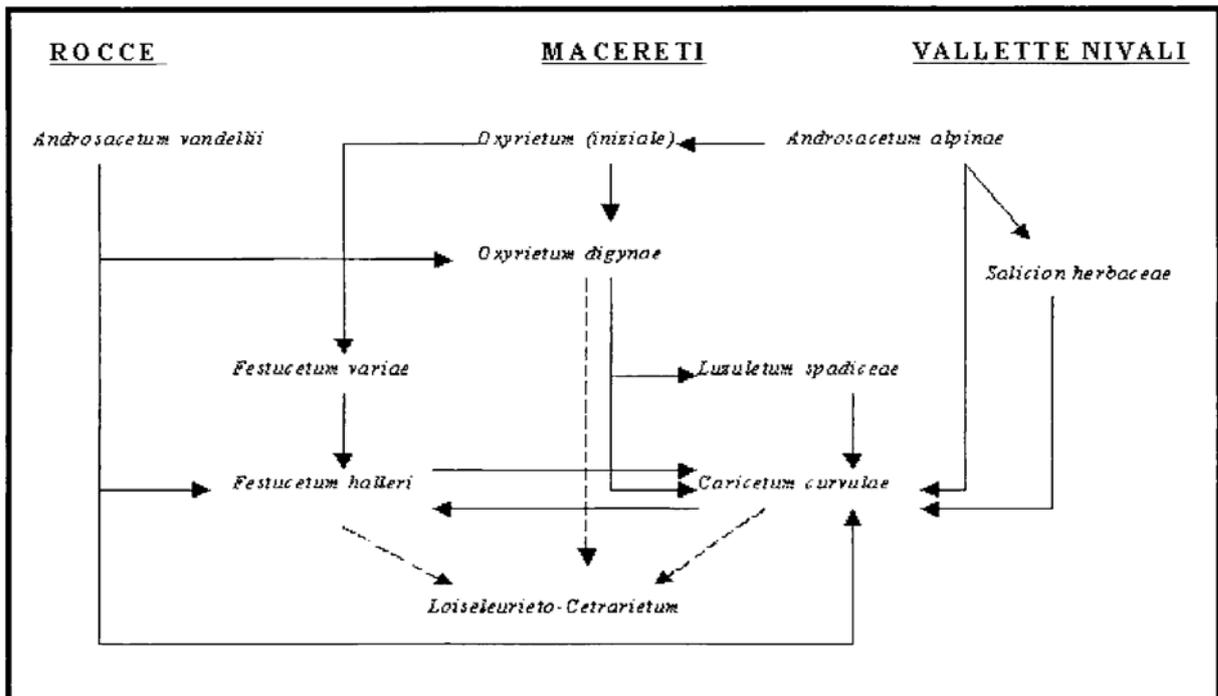
Le vegetazioni non sono stabili nel tempo, ma sono soggette a cambiamenti. Questi possono essere semplici *fluttuazioni*, variazioni stagionali, variazioni legate al ciclo biologico, variazioni legate al ciclo d'utilizzo antropico. Oppure *successioni*, ossia variazioni permanenti che comportano il succedersi di popolazioni di differenti specie e comunità nello stesso luogo (*serie*). Le successioni possono essere primarie se hanno inizio su suolo sterile, o secondarie se si innescano in seguito al disturbo di una vegetazione preesistente, oppure anche cicliche se causate da eventi catastrofici ricorrenti.

Quando si stabilisce un ottimale stato di equilibrio tra terreno, clima e mondo vegetale, si parla di vegetazione climax zonale, dove invece uno o più fattori (vento, umidità, carenza di

acqua, freddo, calore, scarsa disponibilità di sostanze nutritive, influsso antropico) impediscono lo sviluppo verso uno stato ottimale si parla invece di “associazioni finali extrazonali” (Reisigl & Keller, 1990), oppure *subclimax*, o *climax edafico* o *climax stazionale*.

Il limite altitudinale oltre il quale si può parlare di vegetazione alpina è ovviamente molto variabile in base alle latitudini in cui si trova il rilievo montuoso. Nelle Alpi questo limite oscilla tra i 2000 e i 2300 m di altitudine, a seconda dei vari distretti: più basso nelle catene periferiche a clima piovoso-oceanico, più alto nel settore centrale a clima asciutto continentale (come in Alta Valtellina).

La dinamica della vegetazione acidofila nel piano alpino ha una fase iniziale data da tre associazioni: *Androsacetum vandellii*, tipica associazione rupestre; *Oxyrietum digynae*, tipica dei macereti; *Androsacetum alpinae* di vallette nivali e macereti (figura 2.1). L' *Androsacetum vandellii* si può evolvere in *Festucetum hallerii* o *Curvuletum*, a seconda della quota e dell'esposizione. Verso Sud si ha la formazione del *Festucetum*, verso Nord del *Curvuletum*. A volte l'*Androsacetum* può evolvere in *Oxyrietum digynae*, quando cioè l'ambiente rupestre diventa un macereto.



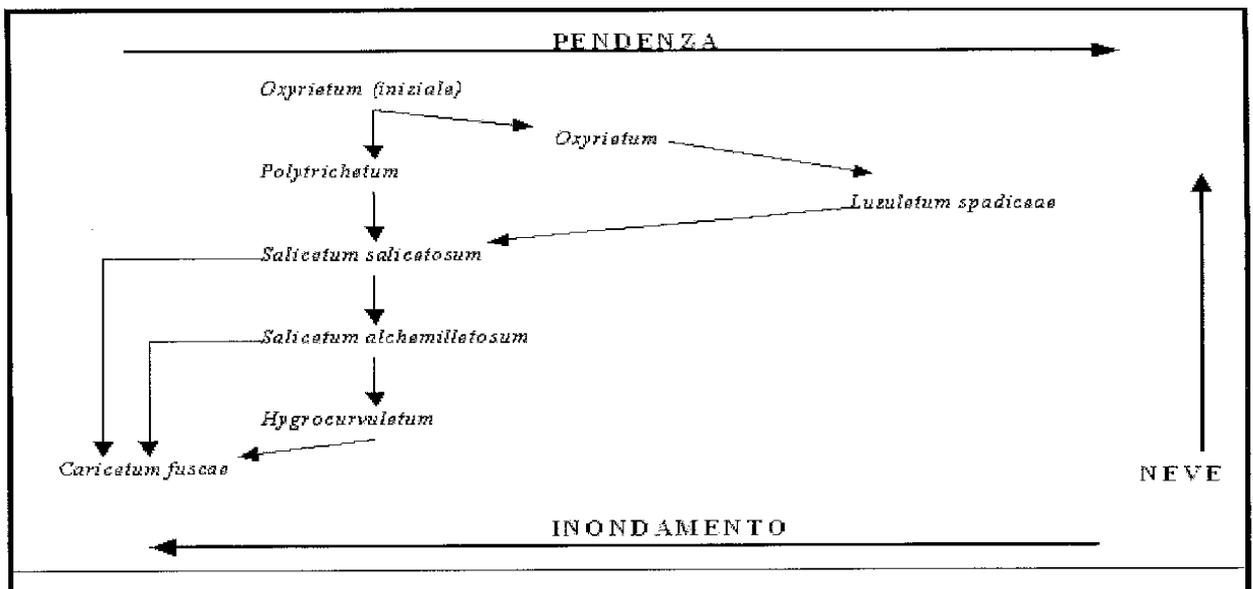
**Figura 2.1:** Dinamica della vegetazione alpina su substrato siliceo; le linee tratteggiate indicano i passaggi provocati dall'azione del vento (da Giacomini e Pignatti, 1955).

L'*Oxyrietum digynae*, associazione pioniera dei macereti, parte con uno stadio iniziale composto da poche specie. A seconda della quota può evolvere Nel *Festucetum hallerii* o nel

*Curvuleto*; nel primo caso il substrato deve raggiungere però una granulometria minore, il *Curvuleto* invece può essere raggiunto o direttamente, o passando attraverso il *Luzuletum spadicea*. Questo si sviluppa tramite una graduale colonizzazione del terreno, che porta quindi ad un arricchimento in sostanza organica. Resta comunque uno stadio evolutivo e di passaggio verso il *Curvuleto*. Laddove i substrati si fanno dolci e poco acclivi si possono osservare fasce di vegetazione in transizione fra il *Luzuletum spadicea* e il *Salicetum herbacea*.

L'*Androsacetum alpinae*, stadio primario di colonizzazione delle vallette nivali, può evolvere nelle fasi iniziali dell'*Oxirietum*, o in un *Curvuleto*, o a una serie tipica delle vallette nivali, il *Salicion herbacea*. Spesso però l'*Androsacetum* non evolve e resta limitato allo stadio iniziale.

Infine il *Caricetum curvulae* rappresenta l'associazione climax delle stazioni esposte a Nord, di norma comprese tra i 2350 e i 2750 m, essa non tende ad evolvere ulteriormente, a meno che non vengano modificate le condizioni ambientali, anche ad opera di pressioni antropiche o legate alla pastorizia. Le specie del *Curvuleto* necessitano di un periodo vegetativo di 4/5 mesi, quindi sono molto suscettibili ad accumuli nevosi persistenti. Infatti nel momento in cui il periodo vegetativo sarebbe ridotto, molte specie non sopravviverebbero e si assisterebbe ad una regressione della serie.



**Figura 2.2:** dinamica della vegetazione delle vallette nivali su substrato siliceo (da Giacomini e Pignatti, 1955)

Anche un aumento dell'umidità può agire sull'evoluzione del *Cariceto*, facendolo evolvere a *Caricetum fuscae* (figura 2.2).

Uno dei fattori che possono intervenire nelle serie di vegetazioni è il vento (figura 2.1). Infatti quando l'azione del vento si fa intensa da queste associazioni si ha lo sviluppo del *Loiseleurieto-Cetrarietum*. Questo tuttavia non rappresenta un'associazione climax, sebbene sia molto diffuso, ma solo uno stadio dovuto a condizioni climatiche particolari. In ogni caso è una serie che richiede tempi molto lunghi per la sua formazione, e questo è provato dal grado di sviluppo dei suoli sui quali troviamo il *Loiseleurieto*.

#### **2.b.4. Forme biologiche**

Le piante possono essere classificate secondo “forme biologiche”, “forme di crescita” e “forme architettoniche”.

Raunkier (1907) ha definito le forme biologiche in base alla posizione delle gemme durante la stagione sfavorevole, che sulle Alpi è senza dubbio rappresentata dal periodo invernale:

- **FANEROFITE (P)**: piante perenni legnose, con gemme situate sugli apparati aerei a più di 30 cm dal suolo (alberi, cespugli e liane);
- **CAMEFITE (Ch)**: piante perenni legnose o lignificate alla base con gemme situate sul fusto a meno di 20-30 cm dal suolo (piccoli arbusti e piante succulente);
- **NANOFANEROFITE (NP)**: categoria intermedia tra le precedenti (piccoli arbusti, cespugli bassi);
- **EMICRIPTOFITE (H)**: piante perenni erbacee con gemme a livello del suolo e protette da fusti e foglie morti o ancora assimilanti, possono essere *rosulate*, *subrosulate* o *scapose*;
- **GEOFITE (G)**: piante perenni erbacee che portano le gemme su organi ipogei (bulbi, rizomi, tuberi ecc.), possono essere *rizomatose* o *bulbose*;
- **IDROFITE (I)**: piante perenni acquatiche con gemme sommerse;
- **TEROFITE (T)**: piante annuali che superano la stagione avversa sotto forma di semi;
- **BIENNALI (H bienn)**: Piante bienni monocarpiche, che superano la prima stagione sfavorevole come emicriptofite e la seconda come terofite;
- **HELOFITE (He)**: categoria intermedia tra idrofite e geofite.

Vi sono poi ulteriori suddivisioni, in base al portamento globale e alla durata del ciclo di vita, indicate con una desinenza da aggiungere alla lettere sopra elencate: caesp (cespitate); rept (reptanti); scap (scapose); ros (rosulate); par (parassite); tall (tallofiche).

In particolare in montagna abbondano piante con forma compatta e molto aderente al suolo, questo perché la pianta tende a modificare la morfologia per usare la temperatura a proprio vantaggio: più la pianta è aderente al suolo, maggiore è la quantità di calore accumulata dalla pianta. Tuttavia questa caratteristica delle piante alpine non è dovuta alle condizioni di rigidità ma a caratteri genetici: ad esempio, le ‘piante a cuscinetto’ mantengono la loro forma di crescita nel momento in cui sono esposte a condizioni più favorevoli (Rauh 1940, Spomer 1964).

In tabella 2.1 un esempio riportato in *Alpine Plant Life (Körner)* relativo allo spettro biologico di specie Alpine sui monti dell’ Hindu Kush (Afghanistan) sopra i 4000m. E’ evidente la dominanza di piante erbacee perenni, qui rappresentate dalla categoria delle “emicriptofite” (H), una caratteristica comune a tutte le flore alpine.

<i>Altitudinal range</i>	Ph	Ch	H	G	H bienn	T
>5400 m	-	10	70	10	10	-
5200-5400	-	16	74	5	5	-
5000-5200	-	12	71	4	8	6
4800-5000	-	12	72	4	6	5
4500-4800	2	12	69	7	4	7
4000-4500	3	17	61	7	2	9

*Tabella 2.1: spettro biologico (in %) delle specie alpine della Catena Montuosa Hindu Kush, sopra i 4000 m. (da Breckle, 1995)*

A titolo di confronto possiamo esaminare lo spettro biologico dell’area in studio (tabella 2.2). Si può notare la stretta correlazione che esiste tra i due spettri biologici presi in esame, nonostante la diversa collocazione geografica.

In questo lavoro non vengono trattati alghe e funghi sebbene essi rappresentano una percentuale notevole e giocano un ruolo fondamentale nell’ambiente alpino, costituendo delle associazioni tipiche degli orizzonti più difficili in alta quota.

<i>Altitudinal range</i>	Ph	Ch	H	G	T	NP
2400-2600 m	3,1	19,7	66,1	12,7	0,8	3,1

*Tabella 2.2: Spettro biologico(in %) delle specie presenti nell’area in studio.*

### 2.b.5 Tipi corologici

I corotipi rappresentano gli areali di distribuzione geografica a cui appartiene un insieme di specie (generi o famiglie); sono molto utili per analizzare la distribuzione floristica di un territorio.

**COROTIPI DELLA FLORA ITALIANA**

*ARTICO-ALPINE*: zone fredde circumartiche e alpine elevate (fig. 2.3)

*CIRCUM-BOREALI*: zone temperato fredde oloartiche (Eurasia e N.America)

*EURO-SIBERIANE*: zone temperato fredde paleoartiche (Eurasia)

*OROFITE (S)EUROPEE*: principali catene europee, specialmente meridionali (Carpazi, Pirenei, Alpi, Alpi Dinariche)

*(ENDEMICHE) ALPICHE*: limitate alle sole Alpi, eventualmente anche in catene periferiche (Jura, Selva Nera ecc.)

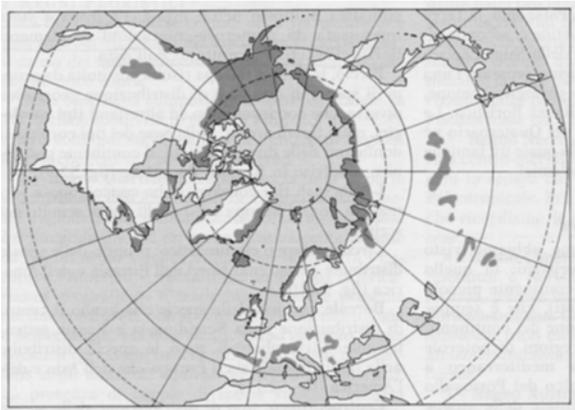
Inoltre si riconoscono anche i seguenti corotipi:

*COSMOPOLITE*: in tutte le regioni biogeografiche

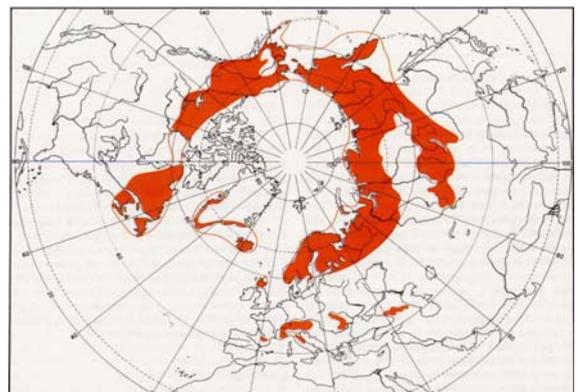
*SUB-COSMOPOLITE*: molto diffuse ma con importanti lacune (es. continenti o intere zone bioclimatiche)

*AVVENTIZIE e ESOTICHE NATURALIZZATE*: popolazioni temporanee o permanenti di specie di altre regioni biogeografiche

*ENDEMICHE*: a distribuzione estremamente limitata



*fig 2.3: esempio di distribuzione artico alpina di Saxifraga oppositifolia.*



*fig 2.4: esempio di distribuzione artico-alpina di Empetrum hermaphroditum*

#### 2.b.4. Sintesi dello stato dell'arte

Tutti gli articoli scientifici raccolti all'interno di questo lavoro di ricerca, vengono presentati in un ordine cronologico temporale e suddivisi per argomentazioni:

- **Analisi delle successioni ecologiche e delle dinamiche di colonizzazione in alta quota ed a seguito di deglaciazione; rappresentazione della vegetazione:**

-Credaro; 1955: analizza la vegetazione di morene recenti del Bernina, distinguendo diverse fasi della colonizzazione legate alla presenza di *Androsacetum alpinae*, *Oxyrietum digynae*, *Luzuletum spadiceae* e *Epilobietum fleischeri*.

-Giacomini e Pignatti; 1955: descrivono la flora e la vegetazione dell'Alta Valle del Braulio, allegando una carta fitosociologia, che rappresenta il primo lavoro di cartografia fitosociologia prodotta in Italia. Presentano inoltre le principali relazioni sin dinamiche che contraddistinguono la vegetazione studiata.

-Pirola; 1959: descrive la composizione fitosociologica della flora e della vegetazione periglaciale nel contesto dell'Isola glaciale Marinelli-Bombardieri, a Sud del Bernina. Si tratta di uno dei primi lavori di analisi del fenomeno del ritiro dei ghiacciai alpini associato alla variazione degli ecosistemi.

-Palmer e Miller; 1961: analizzano le relazioni tra la vegetazione e la recessione del ghiacciaio austriaco Rotmoos. La colonizzazione è stata seguita per diversi anni, in particolare viene evidenziato che dopo il primo anno è presente solo *Saxifraga aizoides*. Le specie di *Salix* presenti (*S.herbacea*, *S.reticulata*, *S.helvetica*) sono state utilizzate per tentare di datare il ritiro del ghiacciaio; per fare questo è stata valutata l'età massima di queste specie.

-Credaro & Pirola; 1993,1994: studiano l'evoluzione della vegetazione su una morena laterale della vedretta di Caspoggio (versante italiano del gruppo del Bernina, Alpi Retiche), concentrando le analisi su un quadrato permanente installato nel 1957. L'articolo più recente presenta un'analisi più dettagliata della colonizzazione di questo tipo di ambiente. Il sito preso in esame era stato abbandonato dal ghiacciaio 15 anni prima e quindi presentava una vegetazione pioniera a *Oxyrietum digynae*. I risultati sono stati ottenuti mediante 5 rilievi

fitosociologici analizzati tra il 1957 e il 1987. La crono sequenza così ottenuta è stata confrontata con una topo sequenza dell'*Oxyrietum digynae* risalente al 1957, la quale mostrava il passaggio di varie fasi di questa associazione pioniera: iniziale, tipica, *Cerastietosum* e *Luzuletosum*. Nella crono sequenza sono state riconosciute le prime tre fasi, mentre la fase *Luzuletosum* è stata rilevata esclusivamente ad uno stadio iniziale.

-Müller e Güsewell; 2003: studiano la ricchezza floristica dei pascoli alpini delle Alpi svizzere settentrionali, attraverso un inventario della presenza/assenza di specie indicatrici.

-Dirnböck, Dullinger, Ginzler, Gottfried e Grabherr; 2003: presentano uno studio sull'integrazione fra il rilievo della vegetazione in campo e l'impiego di immagini digitali.

-Pfeffer, Pebesma, Burrough; 2003: presentano una carta della vegetazione per un'area sciistica delle Alpi Austriache, attraverso l'utilizzo di attributi topografici, derivati con una procedura di modellistica digitale (DEM), e i dati vegetazionali acquisiti in situ trattati con analisi statistica (DCA). Il confronto fra i dati derivati dalle due tipologie di modellizzazione ha evidenziato una stretta correlazione fra le informazioni spaziali e la composizione della vegetazione nei siti stessi.

- **Analisi delle caratteristiche e degli adattamenti fisiologici ed ecologici delle specie d'alta quota:**

-Reisigl & Keller; 1990: descrivono in particolar modo le correlazioni che esistono tra i parametri abiotici e la vegetazione nell'orizzonte Alpino, oltre ad una descrizione esaustiva degli orizzonti della vegetazione alpina, con particolare riferimento alla morfologia e alla genesi delle Alpi.

-Carlsson e Callaghan; 1991: individuano quali sono le interazioni tra le piante e gli ambienti aspri, registrando un risultato significativo nel numero di semi e nella struttura delle foglie.

-Fenaroli; 1998: classifica le specie vegetali presenti negli ambienti montani in Italia, descrivendo le caratteristiche geomorfologiche, geografiche, climatiche, edafiche e biotiche.

-Larl e Wagner; 2006: viene studiata la morfologia e le fasi di sviluppo di *Saxifraga oppositifolia*, rispettivamente in un sito alpino ed in uno subnivale, evidenziando le differenze di sviluppo tra i due siti, legate alla differente lunghezza della stagione di crescita.

-Körner; 1999: descrive gli adattamenti ecologici, funzionali e morfotipici delle piante alpine di alta quota.

-Mathews; 1992: descrive l'ecologia dell'ambiente periglaciale, in particolare degli ambienti appena deglaciati, con un particolare approccio geoecologico alle successioni primarie della vegetazione.

- **Clima e Vegetazione: impatti del cambiamento climatico sulla vegetazione alpina:**

-Gottfried; 1998: realizza un progetto a lungo termine per monitorare i cambiamenti della vegetazione nell'ecotono alpino-nivale in un sito dell'Austria (Schrankogel-Tyrol). In particolare si arriva alla conclusione che l'ambiente alpino-nivale è un eccellente indicatore degli effetti del Cambiamento Climatico in atto.

-Doležal, Šrůtek; 2002: studiano il cambiamento registrato nella composizione e nella struttura delle comunità vegetali, analizzando il suolo, la copertura nevosa e altri fattori abiotici lungo un transetto altitudinale da 1150 a 1750 m ed utilizzando tecniche di analisi multivariata per comprendere le relazioni tra le variabili in gioco.

-Keller e Körner; 2003: studiano la risposta fenologica in base alla durata e alla temperatura del giorno di 33 specie di piante d'alta quota delle Alpi Centrali (2600-3200 m), in Austria. L'area fogliare specifica e la durata del periodo in cui sono presenti le foglie, sono una risposta al fotoperiodo e alla temperatura. Il riscaldamento globale potrebbe tracciare un cambiamento del fotoperiodo, che innescerebbe una serie di aggiustamenti evolutivi all'interno della comunità.

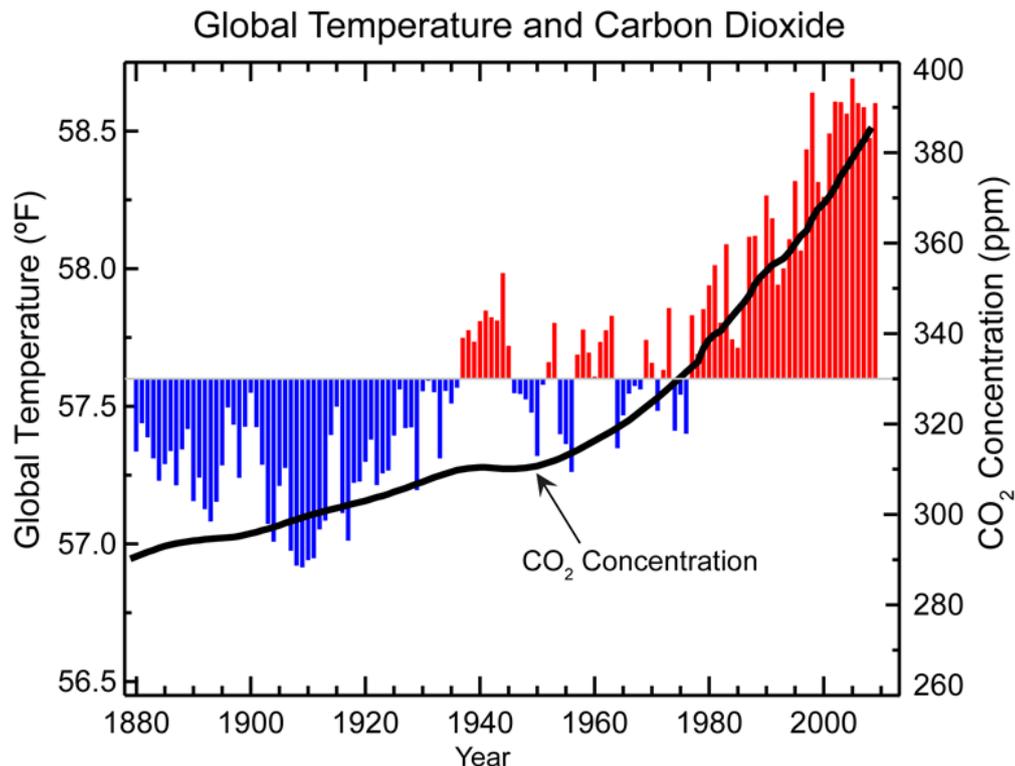
-Lading e Wagner; 2007: studiano la capacità di *Saxifraga bryoides* di raggiungere le quote più elevate, evidenziando che questa specie può trarre molto beneficio dal prolungamento della stagione vegetativa, causato dal cambiamento climatico.

## 2.c. FENOLOGIA DELLE SPECIE ALPINE E CAMBIAMENTO CLIMATICO

### 2.c.1. Cambiamento climatico

Riscaldamento del clima?

L' IPCC (Comitato Intergovernativo sui Cambiamenti climatici) ha indicato che, a livello

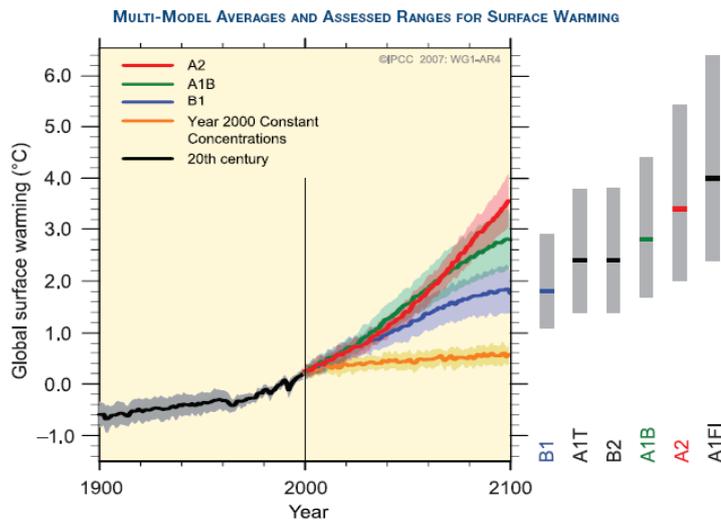


*Figura 2.5: trend di aumento della temperatura e della concentrazione di Co<sub>2</sub> in atmosfera nell'ultimo secolo (da NOAA)*

globale, undici degli ultimi dodici anni (1995–2006) sono stati tra gli anni più caldi che hanno registrato un record significativo delle temperature sulla superficie terrestre (dal 1850).

Ma non vi sono solo questi due parametri ad indicare un cambiamento del clima in questi anni. Infatti in accordo con NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, USA), vi sono altri scenari che vanno dal trend di aumento dei gas serra in atmosfera, all'aumento della temperatura del suolo, del livello del mare, o una diminuzione delle precipitazioni nevose, della degradazione della componente criotica, o ancora, un aumento degli sconvolgimenti climatici. Questi ed altri componenti rappresentano con chiarezza lo scenario del nostro secolo (figura 2.5).

### Gli scenari dell' IPCC SRES



**A1.** La trama e lo scenario A1 descrive un mondo futuro con una crescita economica molto rapida, la popolazione mondiale registra un picco nella metà del secolo, diminuendo subito dopo, e la rapida introduzione di nuove e più efficienti tecnologie. I principali temi basilari sono la convergenza tra le regioni, lo sviluppo delle infrastrutture, le crescenti interazioni sociali e culturali, con una

sostanziale riduzione delle differenze regionali sul reddito pro capite. Lo scenario familiare si sviluppa in tre gruppi che descrivono direzioni alternative dei cambiamenti tecnologici nel sistema energetico. I tre gruppi A1 sono stati distinti in base alla propria enfasi tecnologica: combustibile fossile intensivo (A1FI), fonti energetiche non fossili (A1T) o un equilibrio tra tutte le fonti (A1B) (dove bilanciato è definito non come dipendente troppo pesantemente da una particolare fonte energetica, dall'ipotesi che simili tassi di miglioramento sono applicabili a tutte le forniture energetiche e finiscono per usare le tecnologie).

**A2.** La trama e lo scenario A2 descrive un mondo molto eterogeneo. Il tema fondamentale è l'indipendenza e la conservazione delle identità locali. I modelli di fertilità tra le regioni convergono molto lentamente, determinando un continuo incremento della popolazione. Lo sviluppo economico è principalmente rivolto all'ambito regionale e la crescita economica pro capite e i cambiamenti tecnologici più frammentati e lenti rispetto ad altre trame.

**B1.** La trama e lo scenario B1 descrive un mondo convergente con la stessa popolazione mondiale, che registra un picco nella metà del secolo e diminuisce subito dopo, come nella trama A1, ma con un rapido cambiamento nelle strutture economiche rivolto all'economia dei servizi e dell'informazione, con riduzioni nell'intensità materiale e l'introduzione di tecnologie pulite e con risorse efficienti. L'enfasi riguarda le soluzioni globali alla sostenibilità economica, sociale e ambientale, includendo un'equità migliorata, ma senza iniziative climatiche aggiuntive.

**B2.** La trama e lo scenario B2 descrive un mondo in cui si pone enfasi sulle soluzioni locali, sulla sostenibilità economica, sociale e ambientale. Si tratta di un mondo con una popolazione globale in continua crescita, ad un tasso inferiore rispetto a quello A2, livelli di sviluppo economico intermedi, e cambiamenti tecnologici meno rapidi e più diversi rispetto alle trame B1 e A1. Mentre lo scenario è orientato anche alla tutela dell'ambiente e all'equità sociale, esso si focalizza sul livello regionale e locale.

Tutti gli scenari dovrebbero essere considerati ugualmente validi. Gli scenari del SRES non comprendono iniziative climatiche aggiuntive, il che significa che non sono inclusi gli scenari che presuppongono esplicitamente la Convenzione Quadro sul Cambiamento Climatico delle Nazioni Unite o gli obiettivi sui livelli di emissioni fissati del Protocollo di Kyoto.

Per le proiezioni generali sul clima dell'Europa ci si basa principalmente sugli scenari forniti da IPCC-SRES utilizzando il periodo climatico (1961- 1990) come linea base e come proiezione per l'anno 2070.

L'IPCC ha concluso che le concentrazioni atmosferiche globali di anidride carbonica, metano ed ossido d'azoto sono cresciute dal 1750 in maniera significativa a causa delle attività umane. La maggior parte dell'aumento osservato nelle temperature medie globali dalla metà del 20mo secolo è molto probabilmente dovuta all'aumento rilevato nelle concentrazioni di gas ad effetto serra di origine antropica. Il contributo italiano è pari a circa l' 11% dell'equivalente di emissioni di gas serra in Europa e a circa il 2% delle emissioni globali. Tra il 1990 ("anno base") e il 2005 le emissioni complessive di gas serra in Italia sono aumentate del 12.1% (in CO2 equivalente, escludendo le emissioni e le rimozioni di CO2 dalle variazioni dell'uso del suolo) da 519,5 a 582,2 milioni di tonnellate in CO2 equivalente. L' UNFCCC e il Protocollo di Kyoto hanno stabilito l'obbligo per l'Italia di ridurre, nel periodo 2008-2012, le emissioni di gas serra a livello nazionale al 6,5% rispetto al livello base del 1990. L'Italia è lontana dal raggiungimento di questo obiettivo, infatti le emissioni sono in costante aumento dal 1997, sebbene tra il 2004 e il 2005 il tasso di aumento si era attestato allo 0,3% (APAT, 2007).

In questo scenario i ghiacciai sperimenteranno un sostanziale ulteriore ritiro durante il 21mo secolo (Haeberli & Burn, 2002). I piccoli ghiacciai scompariranno, mentre i ghiacciai più ampi soffriranno una riduzione del volume tra il 30% ed il 70% entro il 2050 (Paul *et al.*, 2004, Schneeberger *et al.*, 2003). Durante il ritiro dei ghiacciai, diminuirà il deflusso primaverile ed estivo (Hagg & Braun, 2004). Le temperature in aumento e il permafrost in scioglimento destabilizzeranno le pareti montane e aumenteranno la frequenza di caduta delle rocce, minacciando le valli montane (Gruber, Hoelzle & Haeberli, 2004). Modifiche nello snowpack e nell'estensione dei ghiacciai possono anche alterare la probabilità di valanghe di neve e di ghiaccio, che dipendono dalla complessa interazione di geometria della superficie, precipitazioni e temperatura (Haeberli & Burn, 2002, Martin, E *et al.*, 2001).

### **2.c.2. Fenologia delle specie alpine**

La flora montana europea subirà i maggiori mutamenti a causa del cambiamento climatico (Theurillat & Guisan, 2001, Walter *et al.*, 2004). Modificazioni nella distribuzione della copertura nevosa e nella durata della stagione della crescita dovrebbero avere effetti molto più pronunciati rispetto agli effetti sul metabolismo (Grace, Berninger & Nagy, 2002, Körner, 2003). Vi è una tendenza generale, verso l'aumento della stagione di crescita, la fenologia

anticipata e gli spostamenti delle distribuzioni di specie verso altitudini più alte (Egli *et al.*, 2004, Körner, 2003, Kullman, 2002, Sandvik *et al.*, 2004, Walther, 2004). Si prevede che il limite della vegetazione arborea si sposti verso l'alto di diverse centinaia di metri (Badeck *et al.*, 2001). Ci sono evidenze che mostrano che questo processo sia già iniziato nel Mediterraneo (Camarero & Gutiérrez, 2004; Peñuelas, J. & Boada, 2003). Tali cambiamenti, unitamente all'effetto dell'abbandono dei pascoli alpini tradizionali, limiteranno la zona alpina alle altitudini più elevate (Dirnböck, Dullinger & Grabherr, 2003; Grace, Berninger & Nagy, 2002; Guisan & Theurillat, 2001), minacciando fortemente la flora nivale (Gottfried *et al.*, 2002). La composizione e la struttura delle comunità alpine e nivali cambierà notevolmente (Guisan & Theurillat, 2000; Walther, 2004). Sono previste perdite delle specie di piante locali fino al 62% per le montagne del Mediterraneo e del Portogallo entro il 2080 (Thuiller *et al.*, 2005). La vegetazione alpina è considerata un valido indicatore del cambiamento climatico (Cannone, Sgorbati e Guglielmin, 2007), al contrario di quanto sostenevano le ipotesi precedenti, ossia che le specie alpine e nivali possedessero una naturale inerzia ed una abilità nel tollerare incrementi di 1-2°C della temperatura media dell'aria. Inoltre, molte specie montane sono longeve e reagiscono alle variazioni termiche sul lungo periodo.

In quest'ottica era stato inserito il progetto ITEX (*International Tundra Experiment*), ideato specificatamente per esaminare quali erano le risposte delle specie Artiche e Alpine all'aumento della temperatura. L'International Tundra Experiment è una rete scientifica di esperimenti messi a fuoco sugli effetti del cambiamento climatico sulle specie vegetali selezionati in ambienti di tundra e alpini. Gli esperimenti di manipolazione delle piante, messi a punto con delle OTC (*Open Top Chambers*), permettono di confrontare le variazioni annuali delle prestazioni delle specie rispetto alla risposta fenologica alle condizioni climatiche. ITEX fa parte del programma UNESCO Man And Biosphere. Un passo ulteriore rispetto al programma ITEX è stato quello di NATEX (*North American Tundra Experiment*), programma che prevede lo studio dei flussi di CO<sub>2</sub> in tre ecosistemi dove sono posti le OTC (Open Top Chambers) di ITEX.

La fenologia è una parte della biologia che studia i rapporti tra i fattori climatici e manifestazioni stagionali (*fenofasi*) di alcuni fenomeni della vita vegetale e animale, di notevole importanza per l'agricoltura, per gli allevamenti e per la medicina. Rappresenta il processo più semplice nel quale tracciare i cambiamenti dell'ecologia delle specie in risposta al cambiamento climatico (IPCC, 2007). Questo approccio è per cui molto moderno, tuttavia già molto diffuso.

A livello Europeo, lo studio Cost725 invece è riconosciuto da IPCC come uno dei maggiori contributi per la valutazione dei cambiamenti osservati e le risposte nei sistemi naturali utilizzando 125 000 serie di osservazioni di 542 piante e 19 specie animali in 21 paesi europei per il periodo 1971-2000. L'aggregazione delle serie storiche avrebbe rivelato un forte segnale di cambiamento in tutta Europa, con un anticipo della primavera e dell'estate di 2,5 giorni per decennio.

In America, l'USA NPN (*USA National Phenological Network*), contribuisce a raccogliere dati fenologici, con lo scopo di monitorare l'influenza del clima sulla fenologia delle piante.

Sempre in America la US EPA (*US Environmental Protection Agency*) ha identificato un insieme di 24 indicatori importanti che descrivono le tendenze relative alle cause e agli effetti del cambiamento climatico; tra questi vi si trova la fenologia della formazione dei germogli, delle foglie nuove e della stagione di crescita.

### **2.c.3. Sintesi dello stato dell'arte**

-Walker; 1993: studio delle relazioni tra vegetazione, vento e neve, le quali insieme ai regimi di temperatura possono aiutare nella predizione dei cambiamenti climatici. Viene investigata la distribuzione di alcune specie di piante in base alla distribuzione della neve. La relazione tra la morfologia del terreno, la ridistribuzione della neve ad opera del vento, la distribuzione della vegetazione e l'attività degli animali sono i principali soggetti di studio. Vengono esaminate 50 specie lungo il gradiente di copertura nevosa.

-Galen & Stanton; 1995: l'oggetto dello studio è la lunghezza della stagione vegetativa; viene osservato lo sviluppo fenologico e la distribuzione di 6 specie target in relazione alla naturale variazione dello spessore del manto nevoso. La lunghezza della stagione vegetativa varia da 50 a 35 giorni. Gli studi sono stati condotti per una durata di 3 anni. Viene mostrata la risposta della crescita individuale legata alla copertura nevosa sulla composizione delle generazioni presenti all'interno delle comunità vegetali. Il tipo di approccio prevede l'uso dei modelli climatici secondo i quali l'effetto serra sarà causa di un incremento delle temperatura da 1,5 a 4,5°C.

-Huelber et al; 2006: per capire i potenziali effetti del cambiamento climatico sulle piante, studiano la fenologia di 10 specie vascolari sulle Alpi Austriache. L'inizio dello sviluppo riproduttivo non sembra essere legato con lo snowmelt, ma piuttosto con la temperatura.

-Chapin, Gaius e Shaker; 1996: studio nel quale vengono mostrate le conseguenze al variare delle condizioni della luce, della temperatura, dei nutrienti e infine della stagione di crescita di 4 piante vascolari abbondanti nella Tundra dell'Alaska del Nord. A breve termine, le misure di espansione fogliare, la fotosintesi, e l'assimilazione dei fosfati non hanno mostrato una netta correlazione con la produzione di biomassa.

-Beniston; 1997: analizza il cambiamento climatico nelle zone di alta montagna, in particolare l'ambiente alpino. Propone una descrizione dettagliata del clima alpino e di come si è evoluto, utilizzando dati climatici e paleoclimatici.

-Suzuki e Kudo; 1997: Vengono fatte crescere in ambiente controllato e manipolato specie alpine e boreali, per comprendere come la fenologia delle stesse può rispondere ai cambiamenti indotti dall'ambiente.

-Thórhallsdóttir; 1998: Viene analizzato quanto il riscaldamento globale può influire sugli ecosistemi Artici. In particolare un accelerazione della fenologia potrebbe alterare la ridistribuzione delle risorse nutritive ed energetiche manifestandosi in una anticipazione della produzione dei semi e dei frutti. Infine un incremento della produzione dei semi potrebbe facilitare la potenziale migrazione delle specie.

-Price e Waser; 1998: oggetto dello studio è lo sviluppo di fiori e frutti di 10 specie di Angiosperme della prateria subalpina. Vengono presi in considerazione i seguenti aspetti fenologici: gemme chiuse; fiori aperti; fiori appassiti; comparsa del frutto; crescita del frutto; frutto maturo. Lo studio suggerisce che in un futuro sarà possibile riscontrare delle mutazioni all'interno della fenologia della prateria subalpina, nella distribuzione delle popolazioni e nella struttura delle comunità vegetali, legate al cambiamento climatico in atto.

-Arft; 1999: presenta i risultati delle meta-analisi di ITEX ( International Tundra Experiment). In particolare in questo esperimento viene utilizzata una temperatura comune di manipolazione per vedere quale risposta forniscono le variabili specifiche lungo gradienti climatici e geografici degli ecosistemi di Tundra. Sono stati condotti esperimenti per una durata di 4 anni in 13 siti localizzati lungo il Circolo Polare Artico. In particolare i risultati mostrano che i germogli fogliari compaiono prima nei plot riscaldati, così come l'antesi. La

senescenza invece inizia dopo nei plot riscaldati. In sintesi lo sviluppo anticipato della stagione viene marcato come causa che contribuisce all'incremento della crescita vegetativa.

-Gottfried, Pauli, Reiter e Grabherr; 1999: analizzano il movimento di migrazione verso quote più alte delle specie vegetali alpine in seguito al riscaldamento globale. In particolare evidenziano che ciascuna specie presenta capacità ed adattamenti diversi al movimento, e le specie delle aree sub nivali e nivali probabilmente si estingueranno.

-Guisan e Theurillat; 2000: tramite l'utilizzo di un modello lineare generalizzato (GLM), hanno studiato la risposta della vegetazione alpina di Belap, in Svizzera, in tre diversi scenari che prevedono un aumento di 1.5, 3 o 4.5°C. E' stata calcolata la percentuale di specie che non subirebbe conseguenze, che ne trarrebbe vantaggio rispetto alle altre, che ne risulterebbe svantaggiata e che andrebbe incontro all'estinzione.

-Luckman e Kavanagh; 2000: hanno studiato l'impatto delle fluttuazioni climatiche nelle aree protette delle Canadian Rockies, legate ad un incremento di 1,5°C negli ultimi 100 anni. Sono stati registrati: aumento delle temperature medie invernali, diminuzioni delle precipitazioni nevose, ritiro dei ghiacciai. Gli autori descrivono anche l'impatto sulla vegetazione, che ha causato lo spostamento delle comunità e l'elevata mortalità di alcune specie.

-Price e Waser; 2000: evidenziano il legame tra la sensibilità delle specie di quote più elevate al riscaldamento globale e le fasi di produzione della biomassa durante la stagione vegetativa, indicando lo scioglimento nivale anticipato come fattore principale che avrà a lungo termine conseguenze sulla fenologia delle specie vegetali.

-Phoenix; 2001: vengono analizzate le conseguenze sulla vegetazione dell'aumento della radiazione UV-B in concomitanza ad un aumento delle precipitazioni estive, nel Nord della Svezia. La risposta a breve termine della comunità monitorata indica una buona tolleranza in risposta al mutamento dei fattori analizzati.

-Theurillat e Guisan; 2001: analizza i possibili impatti dei cambiamenti climatici sulla vegetazione delle Alpi Europee, individuando 3 possibili risposte delle comunità vegetali: acclimatazione, migrazione o estinzione.

-Kullman; 2002: vengono comparati i limiti passati e i limiti attuali degli areali di alcune specie di alberi e arbusti, in Svezia. I cambiamenti distributivi sono conformi alle predizioni fatte in presenza del riscaldamento globale. In particolare viene evidenziato come non tutte le specie rispondono egualmente al riscaldamento in atto.

-Wada, Shimono, Myamoto e Kojima; 2002: studio che si inserisce nel programma ITEX. Viene studiata la reazione di *Empetrum nigrum* e *Loiseleuria procumbens* ad un incremento della temperatura da 0,1 a 1,8°C. Lo studio mostra come le specie boreali hanno una sensibilità maggiore rispetto alle specie subartiche ed artiche in risposta ai cambiamenti ambientali.

-Walther; 2003: individua su scala globale dei parametri fenologici cruciali nel testimoniare l'effetto del riscaldamento globale sulla vegetazione. Un'altra evidenza del riscaldamento globale è rappresentata dalle migrazioni e dall'invasione delle specie esotiche.

-Dunne, Harte & Taylor; 2003: scopo dello studio è investigare l'effetto del cambiamento climatico sulla fenologia, nella fase di fioritura, per 11 specie di arbusti di prateria subalpina e alcune specie di graminoidi.

-Beninston; 2003: ha studiato i possibili impatti del *Global Change* sulle regioni montane valutandone non solo le conseguenze sull'ecosistema, ma anche gli effetti socio-economici che ne derivano.

-Beninston, Keller e Goyette; 2003: studiano la copertura nivale e la sua durata, in quanto la neve rappresenta per molte piante l'inizio della stagione di crescita. In particolare in un'analisi a lungo termine la stagione interessata dalle nevi è aumentata per altitudini superiori ai 2000 m, mentre al di sotto dei 1000 m la copertura nivale è diminuita drasticamente.

-Aerts; 2004: Viene manipolata sperimentalmente la temperatura estiva, quella invernale e l'accumulo di neve primaverile. In particolare viene sottolineata la diversa risposta a livello della riproduzione vegetativa o sessuata. Questo bilancio è molto importante per il mantenimento delle interazioni presenti all'interno degli ecosistemi.

-Beck, Kalmbach, Joly, Stien e Nilsen; 2005: sviluppano dei modelli di previsione della distribuzione di arbusti in ambiente Artico, basati sulla distribuzione e sulla durata del manto nevoso.

-Studer, Appenzeller e Defila; 2005: sviluppano un modello stimatore multi specie per la fenologia primaverile nelle Alpi Svizzere. Il modello prende in considerazione anche temperatura e precipitazioni. Tutte le specie hanno mostrato un cambiamento nella comparsa delle fasi che va da -1 a -2.8 giorni negli ultimi dieci anni. E' stata ottenuta una mappa statistica che rende possibile la determinazione dello spostamento temporale della primavera in base allo studio di 15 diverse fasi fenologiche.

-Sturm; 2005: osservazioni sulle popolazioni di arbusti dell'Artico arrivano alla conclusione che si può pensare che esista un meccanismo di feedback positivo per la superficie di scambio energetico.

-Pomeroy; 2006: studia gli arbusti di tundra, e in particolare arriva alla conclusione che questi favoriscono un accumulo della neve del 147%, mentre lo scioglimento nivale è del 47% maggiore rispetto alla vegetazione rada di Tundra, perché il flusso di calore trasmesso attraverso radiazioni ad onda lunga dalla vegetazione arbustiva favorisce lo scioglimento.

-Wipf, Rixen e Mulder; 2006: Conducono uno studio in USA, Murphy Dome, in Colorado, indagando le interazioni tra le varie specie all'interno della comunità di Tundra, che risultano essere molto sensibili anche ad un piccolo cambiamento di un parametro ambientale.

-Cleland; 2007: Lo studio dimostra che si può rilevare un avanzamento della fenologia nelle varie fasi in risposta al riscaldamento, ma la variabilità delle risposte non permette di correlare un mutamento della fenologia con una alterazione nella concentrazione della CO<sub>2</sub> e nel regime delle precipitazioni.

-Delbart e Picard; 2007: Studiando la fenologia delle piante della comunità di Tundra, dimostrano che esiste una forte correlazione tra la fenologia fogliare primaverile e la temperatura dell'aria.

-Cannone, Sgorbati e Guglielmin; 2007: Analizzano la vegetazione degli alti siti Alpini delle Alpi Europee, che hanno fatto registrare dei forti cambiamenti dal 1953 al 2003. Gli arbusti in particolare sembrano subire un'espansione tra i 2400 e i 2500 m. Al di sopra dei 2500m, la copertura vegetale mostra un pattern di regressione inatteso, associato con incremento delle precipitazioni, degradazione del permafrost e all' incremento delle temperature estive e annuali.

-Sherry; 2007: mostra come il riscaldamento provoca una sostanziale divergenza della fenologia riproduttiva nelle diverse specie. E' stato applicato un modello per lo studio della varianza dei dati (ANOVA); mentre per l'analisi multi criteriale è stato applicato un modello matematico lineare.

-Cannone, Diolaiuti, Guglielmin, Smiraglia; 2008: studiano l'evoluzione dei ghiacciai, il clima locale e le successioni vegetali nei pressi della Vedretta dello Sforzellina nell'arco degli ultimi 30 anni. In particolare il ghiacciaio della Sforzellina ha fatto registrare una diminuzione della superficie. Il suo volume è stato determinato confrontando i DEMs ottenuti processando i dati geofisici e topografici. La vegetazione che si riscontra in tutta l'area proglaciale mostra delle distribuzioni differenti in relazione all'età della superficie su cui si sviluppa. In particolare la riduzione della massa di ghiaccio potrebbe essere legata al riscaldamento estivo combinato con la riduzione delle precipitazioni e l'accorciamento della stagione interessata dalle nevi. Anche la vegetazione sarebbe correlata a questa dinamica, infatti un aumento dei ratei di colonizzazione si è verificato in concomitanza di un documentato riscaldamento estivo e di una possibile riduzione della copertura nevosa.

-Borner, Kielland e Walker; 2008: studio che rientra nel progetto ITEX, con lo scopo di esaminare l'incremento dello spessore della neve invernale e il decremento della lunghezza della stagione vegetativa, per 4 specie Artiche. In particolare sembra che un incremento dello spessore della neve ha un effetto quali quantitativo sulla mineralizzazione dell'Azoto: viene registrata una riduzione del tempo utile per la produzione primaria netta, con la relativa scomparsa delle specie chiave. Tale processo potrebbe alterare la composizione delle comunità e la loro distribuzione.

-Jonas, Rixen, Sturm e Stoeckli; 2008: Usando la regressione multipla evidenziano come la crescita delle piante sia legata ai fattori climatici e in particolare al periodo della stagione nevosa.

Hovenden, Wills, Schoor, Williams e Newton; 2008: mostrano come l'aumento della concentrazione di CO<sub>2</sub> sembra non alterare la fenologia e la media del periodo di fioritura di specie di praterie in Tasmania, Australia.

-Martin et al; 2009: studiano la resistenza al gelo, in particolare all'inizio della stagione di crescita, delle piante al limite del bosco, sulle Alpi Svizzere (Davos). Mostrano che un aumento in CO<sub>2</sub> influisce sulla resistenza al gelo significativamente in piante quali *Vaccinium myrtillus*, *Larix decidua*, *Gentiana punctata* mentre altre piante quali *Pinus uncinata*, *Leontodon helveticus*, *Melampyrum pratense* e *Vaccinium gaultherioides* sembrano non subire alcuna influenza sulla resistenza al gelo rispetto ad un aumento in CO<sub>2</sub>.

-Hulber, Winkler e Grabherr; 2010: studiando la fenologia di 10 specie vascolari del piano alpino arrivano alla conclusione che la fioritura è influenzata principalmente dalla temperatura.

### **3.DESCRIZIONE DELL'AREA IN STUDIO**

#### **3.a. INQUADRAMENTO GEOGRAFICO E CLIMATICO**

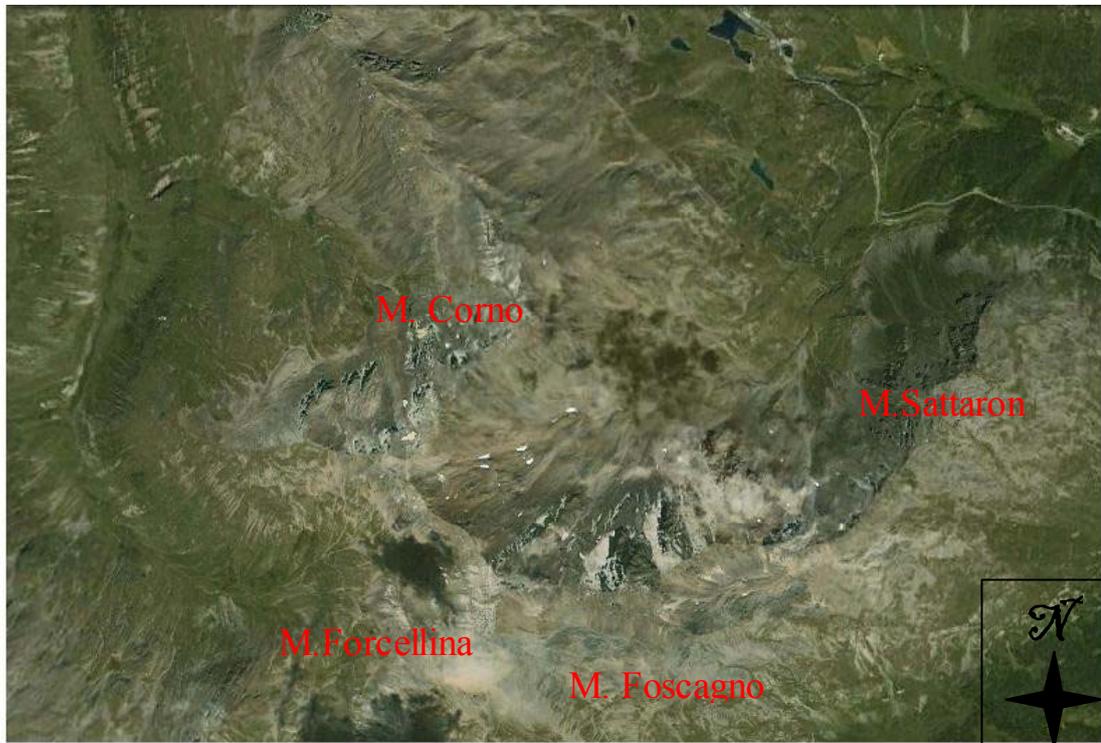
L'area in esame è situata nella Vallaccia Corta o Vallaccia Bormina (figura 3.1), valle tributaria della Valle del Foscagno che si trova nel settore N-orientale delle Alpi centrali lombarde (Alpi Retiche), in Alta Valtellina (SO) a Sud-Est di Livigno; dal punto di vista amministrativo ricade nella provincia di Sondrio, nel comune di Valdidentro e Livigno ed è compresa nel foglio D1-Bormio (scala 1:50000) della carta tecnica regionale della Lombardia e nella tavola D1b5 delle CTR 1:10000.

La Vallaccia Corta è una valle glaciale asimmetrica (Guglielmin, 1997) che si sviluppa in direzione NE-SO, e al cui interno ospita il bacino idrografico del torrente Foscagno, unico immissario da Est del torrente Viola, affluente del fiume Adda.

L'area è delimitata dalle creste della Motta Grande (2714m), i circhi Sattaron (2735m) e Forcellina (3087m) e il M.te Corno (2986m) e verso valle, dalla strada S.S 301 del Foscagno. Include una superficie di circa 2,5 km<sup>2</sup> ed è compresa tra 2140 e 3087 m (vetta del M.te Forcellina) con un dislivello di quasi 1000m.

La località investigata presenta un substrato interamente siliceo e presenta una litologia composta prevalentemente da paragneiss ad andalusite ed anfibolite, che costituiscono le rocce della porzione più elevata (M.te Corno, circo glaciale M.te Corno-M.te Forcellina), mentre nella parte basale prevalgono paragneiss di basso grado e micascisti (Guglielmin, 1989). Il territorio della Vallaccia Corta inoltre è localizzato in posizione geografica ampiamente interessata da fenomeni periglaciali (Giorcelli e Pietracaprina, 1954; Guglielmin, 1997): la forma più caratteristica è rappresentata dal grande Rock Glacier del Foscagno, il quale occupa la porzione centrale del circolo glaciale estendendosi da 2450 m fino a quota 2730 m. Vi sono poi altre forme periglaciali che si possono incontrare all'interno dell'area, quali: coni, falde di detrito (sul versante meridionale del M.te Corno), suoli strutturati (sulla superficie del rock glacier), lobi di geli flusso, block streams. A queste forme poi se ne associano altre tipiche di ambiente proglaciale quali forme di erosione e di accumulo glaciale (Guglielmin, 1989): orli di circolo glaciale, cordoni morenici, quale ad esempio il cordone morenico laterale sinistro in direzione SO-NE, il quale occupa buona parte del versante occidentale della Vallaccia Corta; ma anche le "fluted moreine" che delimitano il versante occidentale della valle. L'esistenza di queste forme testimonierebbe l'esistenza passata di ghiacciai di versante (Guglielmin, 1997). Vi sono poi altre morfologie dovute a fenomeni di

movimento di versante classificate come *debris flow* (colate detritiche), anch'esse localizzabili sul versante meridionale del M.te Corno e depositi di frana situati sia sulla sinistra che sulla destra idrografica del cordone morenico laterale sinistro, comprese fra le quote di 2350 e 2200 m (Guglielmin, 1989).



*Figura 3.1: Vista da satellite dell'area in studio della Vallaccia Corta. (foto google earth)*

Il clima della Valtellina rispecchia quello delle grandi valli longitudinali alpine, con il fondovalle sensibilmente meno piovoso dei sovrastanti rilievi; per quanto concerne l'area di studio si nota uno scostamento dell'andamento globale del clima, in quanto rappresenta una zona già parzialmente transalpina, caratterizzata da condizioni climatiche ulteriormente rigide. L'area è interessata da un clima di tipo alpino contraddistinto da inverni rigidi e molto lunghi, temperature medie annuali basse e scarse precipitazioni.

Un fattore che rende il clima ulteriormente rigido è l'esposizione a Nord-Est del versante che ne limita fortemente l'insolazione, soprattutto nei periodi più rigidi invernali.

Per caratterizzare al meglio il clima presente in Vallaccia Bormina di seguito sono proposti alcuni tra i principali indici climatici, calcolati sui dati raccolti dalla stazione meteo della Vallaccia di Livigno (ARPA Lombardia, Dipartimento di Sondrio), e viene proposto il diagramma ombro termico, riferito all'anno 2009 (figura 3.2). Da questo climogramma si può vedere la forte continentalità del clima della valle, caratterizzato da un picco di temperatura e

una concentrazione maggiore di precipitazioni nel periodo estivo. Tale clima viene considerato come “clima delle valli continentali”, tipico delle regioni alpine d’alta quota:

*Quota: 2500 m*  
*Precipitazione medie annue: 620,80 mm*  
*Temperatura media annua dell’aria (MAAT): -0,2 °C*  
*Escursione termica annua: 42,2 °C*

Indice igrotermico di Amann	
$H=(P*T)/E$	<b>H=2,9</b>
P	prec medie annue (mm)
T	temp media annua (°C)
E	escursione termica annua (°C)
H<300	clima continentale

Indice di continentalità di Gams	
$IG=\arctg P/Q$	<b>I=82,61</b>
P	prec medie annue (mm)
Q	quota
70<I<80	<b>Piano Cacuminale:</b> arbusteti nani, praterie alpine, vegetazione nivale

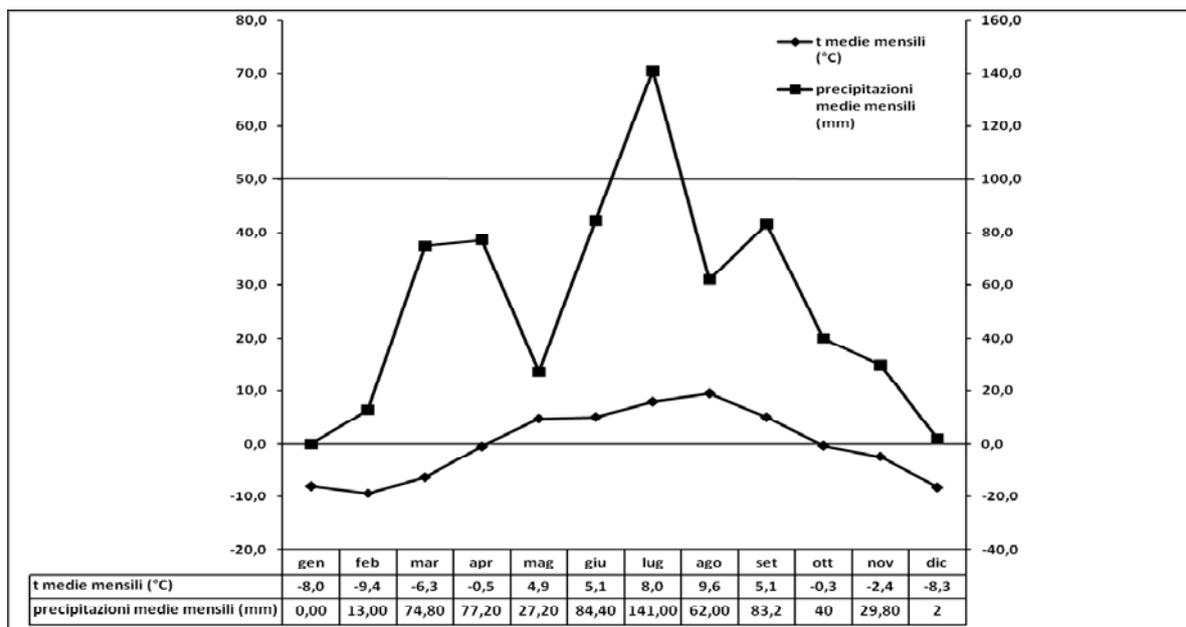


figura 3.2: diagramma ombro termico della Vallaccia, riferito all’anno 2009

In linea generale possiamo porre l’accento su quanto il clima alpino sia risultante da caratteristiche generali delle montagne, quale altitudine ed effetti della topografia e caratteristiche proprie delle Alpi, che influiscono molto sulla temperatura e sulle precipitazioni.

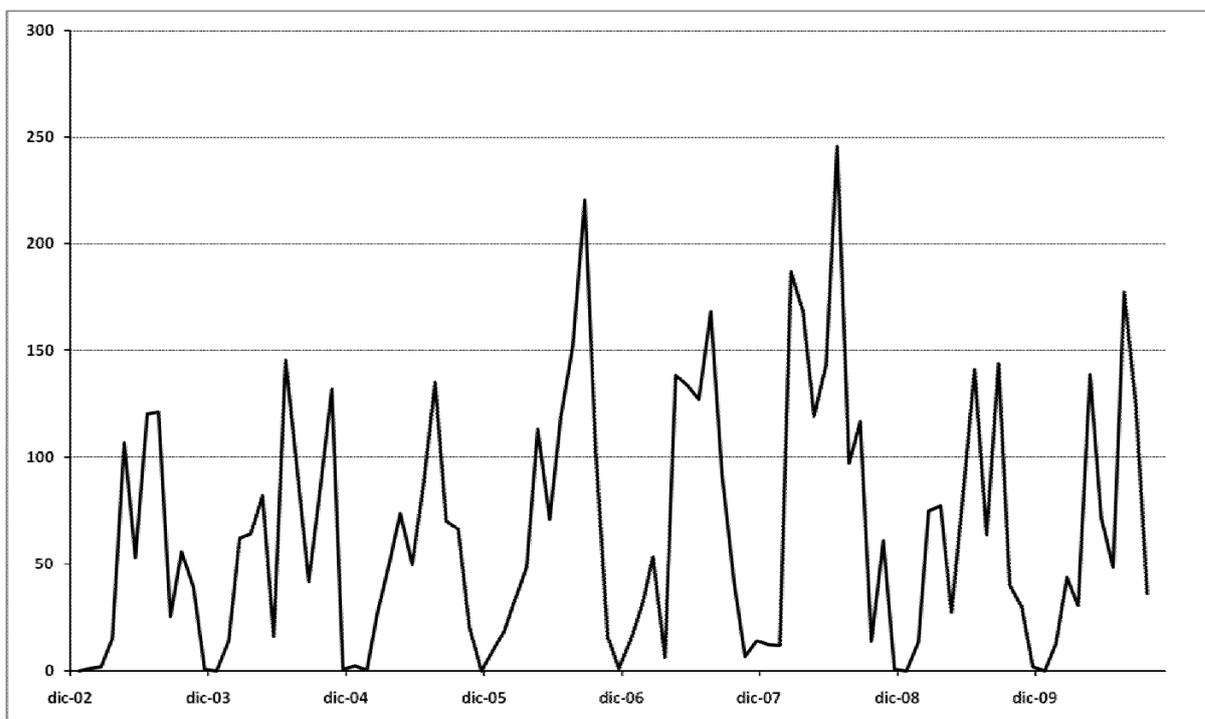
L’innalzarsi della quota coincide con un abbassamento della pressione atmosferica, un aumento della radiazione solare, delle precipitazioni, sia allo stato liquido sia solido e quindi anche della copertura nivale ed alla diminuzione della

temperatura. Per quanto riguarda la radiazione solare è bene tenere conto che l'energia luminosa e termica captate dalla vegetazione non sono dovute solo alla radiazione solare diretta bensì sono la risultante anche di altri fattori quali: radiazione diffusa, albedo, cicli di riscaldamento e raffreddamento del suolo, ed in ultimo anche composizione spettrale della luce, infatti un aumento della quota coincide con radiazioni di minori lunghezze d'onda e una componente ben maggiore di raggi ultravioletti.

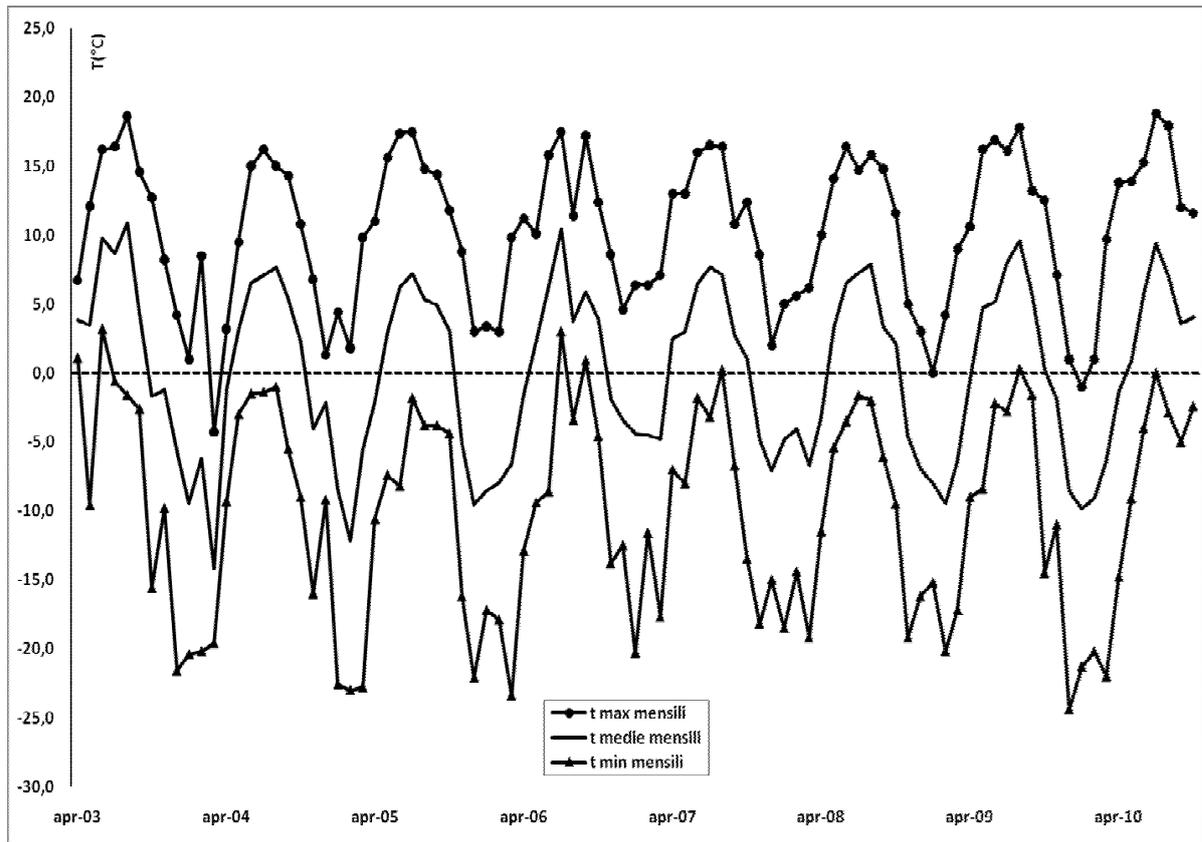
La diminuzione di temperatura è invece il fattore più netto e forse più importante per quanto riguarda l'ecologia delle piante, si calcola che in media un aumento di 100 m di quota coincide con una diminuzione di temperatura di 0,5 °C (Ozenda, 1985). Inoltre in montagna vi è molta più variabilità dal punto di vista topografico, quindi esposizione e pendenza sono molto diverse favorendo la formazione di microclimi del tutto particolari e specifici da una zona a un'altra.

In ultima analisi le Alpi sono un sistema di montagne molto imponente e strutturato con quote elevate ed uno sviluppo notevole, e questo ha forti ripercussioni sulla temperatura e sulle precipitazioni. Si parla infatti di *effetto massa*, per cui all'interno delle regioni alpine il clima sarà ben diverso dalle regione esterne di ben 2°C a favore delle regioni interne, con forti conseguenze sulla biogeografia delle regioni alpine e anche sulla fenologia delle piante.

Per avere un'ulteriore idea della condizione climatica della Vallaccia, possiamo analizzare l'andamento delle precipitazioni e delle temperature negli ultimi sette anni (figura 3.3 e 3.4).



*figura 3.3: precipitazioni medie mensili da gennaio 2003 ad ottobre 2009*



*figura 3.4: temperature mensili da gennaio 2003 fino ad ottobre 2009*

Grazie al calcolo della MAAT (Temperatura media annua dell'aria) e delle precipitazioni medie mensili (figura 3.2), si può anche caratterizzare il regime termico del suolo su base climatica (Haeberli, 1985): infatti con  $MAAT = -0,2^{\circ}\text{C}$  e  $ppt\ medie = 620,8\text{ mm/anno}$  dovremmo trovarci in una zona con permafrost sporadico ( $MAAT > -1^{\circ}\text{C}$ ,  $ppt < 2500\text{ mm/anno}$ ).

### **3.b. INQUADRAMENTO GEOLOGICO E GEOMORFOLOGICO**

Da un punto di vista geologico il territorio risulta all'interno della Falda Campo-Languard del Dominio dell'Austroalpino superiore. Si colloca su un substrato di tipo siliceo, composto prevalentemente da un complesso litologico paragneissico e ortogneissico (Tellini & Guglielmin, 1997), mentre la cresta del M.te Forcellina presenta una piccola intrusione granitico-granodioritica tardo ercinica (Guglielmin & Notarpietro, 1992). Le rocce di entrambe le unità litologiche sono fortemente deformate sia duttilmente che rigidamente, e gli ammassi rocciosi risultano pertanto fortemente degradati.

Per quanto riguarda la geomorfologia del sito in questione le forme più diffuse e di maggiore significatività ambientale sono legate all'azione dei processi glaciali, periglaciali e di fenomeni gravitativi, tipici degli ambienti di alta montagna.

La Vallaccia Corta è una valle glaciale, sono infatti riconoscibili molti depositi morenici informi e cordoni morenici sia tardi glaciali, sia postglaciali; quest'ultimi sono prevalentemente posti sul versante nord-occidentale del M.te Sattaron, anche se è presente un piccolo cordone morenico tardi glaciale a fondovalle, in prossimità della S.S 301 del Foscagno, e una fluted moraine di modeste dimensioni nelle vicinanze del torrente Foscagno, ad una quota di circa 2300m. Lo stato di conservazione di queste forme non è ottimale, in quanto l'intensa attività crioclastica e gravitativa della zona ne ha parzialmente cancellato le tracce.

All'interno dell'area studiata si possono rilevare forme geologiche collegabili alla presenza del permafrost, quali il grande Rock Glacier Foscagno (figura 1.1), che occupa il circo della valle da quota 2440 sino a 2730 m, per un area complessiva di circa 0,3 km<sup>2</sup>. La morfologia di questo rock Glacier è molto complessa, esso infatti è costituito da molti lobi e rughe arcuati, principalmente concentrati nella parte sinistra del corpo, da solchi longitudinali e da qualche piccola cavità imbutiforme. La superficie è contraddistinta dalla presenza di blocchi da decimetrici a metrici ed una matrice ghiaioso-sabbiosa localizzata in pochissimi punti. I blocchi sono del tutto privi di licheni, mentre le zone dove la matrice sabbiosa è più abbondante vi sono insediamenti di piante pioniere. L'imponente fronte con una larghezza di oltre 300 m, e con una pendenza ben oltre quella dell'angolo di riposo del materiale, si congiunge con il rock glacier inattivo che occupa il territorio sino a quota 2390 m, il quale si presenta quasi del tutto ricolonizzato e in uno stadio avanzato di pedogenesi.

Sulla sinistra idrografica della valle si sviluppa un imponente morena completamente pedogenizzata databile all'Olocene.

Altre forme periglaciali di notevoli dimensioni sono i due debris flow del versante Nord-Occidentale del Motta Grande, ramificati in più punti e terminanti con due lobi.

Sul versante settentrionale sono invece presenti numerosi lobi di geliflusso inattivi mentre sul versante nord-orientale del M.te Forcellina e nord-occidentale della Motta grande si possono vedere falde di detrito molto spesse. Inoltre è possibile osservare diversi suoli strutturati, selezionati come i suoli striati nelle parti più alte dei versanti del M.te Sattaron o non selezionati come i cuscinetti erbosi presenti a quota 2400 m circa, nei pressi di una torbiera che si trova all'inizio della piana che porta alla base del rock Glacier.

### **3.c. INQUADRAMENTO FLORISTICO**

Il clima severo e selettivo, si associa ad una moltitudine di fattori limitanti, sia ecologici che geologici, nel condizionare e permettere la presenza di vita vegetale. Per questo motivo solo specie che hanno sviluppato speciali caratteri genetici, morfologici e fisiologici hanno saputo adattarsi ad un ambiente tanto disagiata.

La vegetazione presente nell'area in studio, in particolare, è caratterizzata da tutti gli orizzonti incontrabili in alta quota: subalpino (2200-2400m), alpino (2400-2800m) e nivale (>2800m).

#### ***Orizzonte subalpino***

Qui la vegetazione è prevalentemente costituita da Ericacee, che formano diverse associazioni in base ai diversi microclimi. Una buona componente è data dalla brughiera alpina (*Vaccinium-Rhododendretum ferruginei*), le cui specie caratteristiche sono *Rhododendron ferrugineum*, *Empetrum hermaphroditum*, *Vaccinium myrtillus* e *Vaccinium uliginosum*. Questa associazione è presente ad una quota che varia da 2140 a 2510 m. Questo tipo di associazione si sviluppa su di una porzione di roccia affiorante del Motta Grande assumendo una copertura discontinua alternata a coperture continue per lo più localizzate nella parte bassa della valle. E' l'associazione dell'area oggetto di ricerca che presenta lo strato arbustivo prevalente rispetto alle stesse associazioni della zona.

Sulle creste con spessori esigui e con durata limitata della copertura nivale, spicca la brughiera alpina ad arbusti nani (*Loiseleurieto-Cetrarietum*), con *Loiseleuria procumbens* e grandi coperture di macrolicheni tra i quali i generi *Cetraria* e *Cladonia*. L'estensione di questa associazione vegetale è concentrata per la maggior parte sul versante Nord occidentale del Motta Grande e alla foce del Torrente Foscagno; una piccola parte si può incontrare anche sul rock glacier attivo.

Nelle zone con minore copertura nevosa, con superfici più inclinate e generalmente esposte a Sud, il *Vaccinieto* è sostituito dal suo vicariante ecologico, il *Juniperus-Arctostaphyletum*, associazione caratterizzata da *Juniperus communis* ssp. *nana* e *Rhododendron ferrugineum*.

Nelle aree esposte all'azione del vento troviamo la vicariante *Loiseleurieto-Cetrarietum curvuletosum*, caratterizzata da una maggiore copertura lichenica e da durata ancor più limitata della copertura nivale. Si tratta del *Caricetum curvulae* in transizione a *Loiseleurieto Cetrarietum*, e copre una vasta area ad alte quote del versante Nord-occidentale della Motta Grande e nei pressi del torrente Foscagno per un'altitudine che va dai 2285 ai 2680 m. Vi

possiamo scorgere tra le specie caratteristiche *Carex curvula*, *Gentiana punctata* e *Sesleria disticha*.

Al contrario dove l'accumulo nevoso tende a farsi maggiore si possono osservare mosaici di transizione. Ad esempio il *Loiseleurieto Cetrarietum* in transizione a *Vaccinium-Rhododendretum ferruginei*, rilevato da quota 2195 fino a 2355 m.

### ***Orizzonte alpino e nivale***

In base al tipo di habitat abbiamo diversi tipi di vegetazione:

▪ **Vegetazione delle pietraie e delle morene**

*Androsacetum alpinae*, è l'associazione che rappresenta la fase iniziale di sviluppo della vegetazione e la variante tipica delle quote più alte, in Vallaccia Corta la si trova oltre i 2600 m.

*Oxirietum digynae*, rappresenta uno stadio più evoluto, con specie quali *Oxyria digyna*, *Geum reptans*, *Cerastium uniflorum* e *C.pedunculatum*, *Ranunculus glacialis*, *Poa laxa*, *Saxifraga bryoides*, *Cardamine resedifolia* e specie compagne quali *Leucanthemopsis alpina*, *Sedum alpestre*, *Veronica alpina* e *Senecio incanus ssp. carniolicus*.

Comprende una fascia altimetrica tra 2470 e 2475 m nell'area in esame; la sua esistenza è segnalata solo sul rock glacier attivo, ad esclusione di qualche piccola area del versante Nord-orientale del Monte Sattaron. Occupa in prevalenza la porzione centro apicale e quella centrale del rock glacier.

In un'area localizzata sul rock glacier attivo, da quota 2600 a 2655 m, nei pressi del lobo occidentale, si trova l'*Androsacetum Alpinae* in transizione a *Caricetum curvulae*, dove possiamo riscontrare molte specie compagne della prima associazione con fanerogame più progredite, un chiaro esempio di passaggio da vegetazione pioniera a vegetazione stabile seppur povera di specie.

Infine il *Luzuletum spadiceae*, considerato una forma di transizione tra la vegetazione delle pietraie e quella delle vallette nivali, con la *Luzula alpino-pilosa* e il *Doronicum clusii*. E' presente a quote che vanno da 2165 a 2600 m, ma per la maggior parte la possiamo trovare sul versante Nord occidentale della Motta Grande. La copertura si presenta comunque discontinua e molto frammentata.

Infine troviamo l'associazione di transizione tra l'*Oxirietum digynae* e il *Luzuletum spadiceae* che si insedia da quota 2245 fino a 2690 m; è presente quasi esclusivamente

sul rock glacier attivo, oltre che sulle pendici del Monte Sattaron. Tra le specie troviamo sia quelle dell'*Oxyrieto* che quelle del *Luzuleto*.

▪ ***Vegetazione delle vallette nivali***

Laddove la neve si accumula con elevati spessori e permane per almeno 8 mesi all'anno, tra i 2340 e i 2650 m, troviamo il *Salicetum herbaceae*. Specie caratteristiche sono *Salix herbacea*, *Soldanella pusilla*, *Veronica alpina*, *Ligusticum mutellina*, *Gnaphalium supinum*. Presente sui versanti Nord del monte Sattaron, alla base del rock glacier attivo e nella zona di quello inattivo.

Tra i 2345 e i 2580 m si può individuare un'associazione detta *Salicetum herbaceae curvulosum*, in questo raggruppamento acquista carattere identificativo *Carex curvula*, insieme ad altre specie del *Curvuleto* e diverse specie di Ericacee dello strato arbustivo.

▪ ***Vegetazione delle praterie acidofile***

L'associazione climax delle praterie acidofile è il *Curvuleto*, meglio *Caricetum curvulae*, caratterizzato dalla dominanza di Graminacee e Cyperacee e derivante dall'evoluzione delle associazioni pioniere. La specie tipica è il *Carex curvula*, ma vi possiamo trovare anche *Agrostis alpina* e *Senecio incanus*. Lo si incontra salendo lungo il torrente Foscagno, e sul versante Nord orientale del Motta Grande.

Dove la neve permane più a lungo si incontra la sua variante igrofila, l' *Hygro-Curvuleto* con forte prevalenza di *Ligusticum mutellina*.

Interessante è la presenza di *Nardetum alpigenum*, nelle aree in passato soggette a pascolamento e le sue forme di transizione verso il *Curvuleto*. Collocato lungo tutta la dorsale della morena antica. La specie caratteristica che presenta una copertura preponderante rispetto alle altre è sicuramente *Avenella flexuosa*.

▪ ***Vegetazione palustre o di torbiera***

In aree piane con scarso drenaggio e ristagno delle acque abbiamo l'*Eriophoretum scheuchzeri*, dove diminuiscono le acque appare il *Caricetum fuscae*. Compare in una zona torbosa alla base della Valle del Foscagno, ma non compare tra le piante considerate nello studio fenologico.

In particolare nell'area in studio, la vegetazione è stata usata come supporto allo studio del permafrost e del movimento del rock glacier (Cannone, 1999). In particolare il rock glacier inattivo è caratterizzato dalla presenza di vegetazione tipica di substrati stabili con suoli evoluti, come il *Caricetum curvulae* o la brughiera alpina. La parte attiva è colonizzata da

vegetazioni di tipo pioniero, con netta prevalenza dell'*Oxirietum digynae* (Cannone, 2007). Recentemente è stato indagato anche lo studio sulle relazioni tra vegetazioni e instabilità del substrato (Cannone & Gerdol, 2003): le piante vascolari sarebbero in grado di tollerare un movimento del substrato fino a 35-40 cm/anno, con differenze specie-specifiche; in particolare *Geum reptans* e *Saxifraga bryoides* sembrano tollerare movimenti fino a 35 cm/anno su substrati grossolani, *Cerastium uniflorum* tollera movimenti intensi ma su substrati fini e altre come *Veronica alpina* e *Sedum alpestre* tollerano movimenti di minori entità su substrati medio-fini.

### ELENCO FLORISTICO

Si elencano le specie monitorate ed analizzate nell'area in studio, per quanto riguarda gli stadi fenologici.

#### **Famiglia CYPERACEA**

*Carex curvula* All.: *Carice ricurva*; pianta perenne erbacea tipica di pascoli alpini su substrati silicei; 1900-2800 m, max 2500 m; H caesp; Orof. S.Europea; specie comune ma localizzata, formante zolle dense e tenaci, con fusti incurvati, alla fioritura tipicamente disseccate e arricciate in punta.

#### **Famiglia GRAMINAE**

*Agrostis alpina* Scop.: *Cappellini delle Alpi*; pianta perenne erbacea tipica di pascoli alpini, curvuleti e formazioni a *Loiseleuria*; 1700-2800 m; specie comune Orof. S.Europ, H caesp.

*Anthoxanthum alpinum* Love & Love: *Paleo alpino*; pianta perenne erbacea tipica di pascoli alpini e nardeti; 1200-2800 m; specie comune; Artico-Alp (Euroasiatica); H caesp.

*Avenella flexuosa* (L.) Drejer.: *Migliarino capellino*; pianta perenne erbacea, tipica di terreni acidi, soprattutto di boschi di conifere; 400-2200 m, max 2700m; specie comune; Subcosmop.; H caesp.

*Helictotrichon versicolor* (Vill.) Pilg. (*Avenula versicolor* Lainz): *Avena screziata*; pianta perenne erbacea, tipica di pascoli alpini silicei; 1800-2950 m; specie comune; Orof. S.Europ; H caesp.

*Deschampsia caespitosa* (L.) Beauv.: *Migliarino maggiore*; prati umidi e paludi; 0-2600 m; pianta comune, annuale ; Subcosmop. Temp; H caesp.

*Festuca halleri* Puccin: *Festuca di Haller*; pianta perenne erbacea, tipica di rupi calcaree e soleggiate; 1500-2600 m, max 3200; specie comune ma localizzata; Orof. S.europ; H caesp.

*Nardus stricta* L.: *Nardo, Cervino*; pianta perenne erbacea, tipica di pascoli montani e alpini su suolo acido; 1200-2600 m, raramente fino a 3000 m; specie comune; Eurosib.; H caesp. Forma cespi densissimi avvolti alla base da guaine giallastre.

*Poa alpina* L.: *Fienarola alpina*; pianta perenne erbacea tipica di pascoli, praterie e macereti; 1500-2700 m, max 3600 m; specie comune; Circumboreale; H caesp.

*Poa laxa* Haenke: *Fienarola ciodola*; pianta perenne erbacea, tipica di macereti, pietraie, morene con substrato siliceo; 2000-3600 m; specie rara; Orof. S-Europ.; H caesp.

### **Famiglia JUNCACEAE**

*Juncus trifidus* L.: *Giunco trifido*; pianta perenne erbacea, tipica di creste ventose e pascoli sassosi su silice; 1500-3000 m; specie comune; (Circumbor.) Artico-alpina; G riz.

*Luzula alpino-pilosa* (Chaix.) Breistr.: *Erba lucciola dei ghiacciai*; pianta perenne erbacea tipica su pendii lungamente innevati, macereti umidi soprattutto esposti a Nord, vallette nivali, con substrato siliceo; 1800-3100 m; specie comune; Orof. S-Europ; H scap.

### **Famiglia SALICACEAE**

*Salix herbacea* L.: *Salice erbaceo*; arbusto nano caducifoglio, con fusti legnosi striscianti e per lo più sotterranei; vallette nivali su terreni umificati acidi; 2000-3000 m; specie comune; (Circumbor) Artico-alp; Ch frut.

*Salix waldsteinana* Willd.: *Salice di Waldstein*; arbusto nano caducifoglio di substrati calcarei; 1400-2200 m; specie comune; endemica Alp-Carpat.; NP.

### **Famiglia POLYGONACEAE**

*Oxyria digyna* (L.) Hill: *Acetosa soldanella*; pianta perenne erbacea su ghiaioni, macereti, morene e rupi con substrato siliceo; 2400-2900 m, max 3200 m; specie comune ma localizzata; (Circum) Artico-Alp; H caesp.

### **Famiglia CARYOPHILLACEAE**

*Cerastium uniflorum* Clairv: *Peverina dei ghiaioni*; pianta perenne erbacea, su macereti, ghiaioni, detriti e morene; 1800-3400 m; specie comune; endemica Alpica; Ch pulv.

**Famiglia RANUNCOLACEAE**

*Ranunculus glacialis* L.: *Ranuncolo dei ghiacciai*, *Erba camozzera*; pianta perenne erbacea, ghiaioni e pietraie, su terreno umido, presso le nevi fondenti; 2000-3500 m; max 4200; specie rara; Artico-Alp (Europ.); H scap.

**Famiglia CRUCIFEREAE**

*Arabis alpina* L.: *Arabetta alpina*; pianta perenne erbacea, pioniera su morene, ghiaie, macereti e gretti; 2000-3000 m; Artico-Alp; H scap.

*Cardamine resedifolia* L.: *Billeri pennato*; pianta perenne erbacea su ghiaie, macereti e praterie sassose con substrato siliceo; 1500-2600 m, max 3500 m; specie comune; Alpino-MedioEurop; H scap.

**Famiglia CRASSULACEAE**

*Sedum alpestre* Vill.: *Borracina alpestre*; pianta perenne erbacea, presente su vallette nivali ed ambienti lungamente innevati con substrati silicei; 1800-2800 m, max 3400 m; specie comune; Orof. S-Europ.; Ch succ.

*Sempervivum montanum* L.: *Semprevivo montano*; pianta perenne erbacea, rupi, macereti, cumuli di pietre con substrato siliceo; 1200-2600 m, max 3400 m; specie comune; Orof-S.Europ.; Ch succ.

**Famiglia SAXIFRAGACEAE**

*Saxifraga bryoides* L.: *Sassifraga brioides*; pianta perenne erbacea, rupi, macereti e creste con substrato siliceo; 2000-3100 m, max 3700 m; specie rara ; parzialmente protetta; Orof. S-Europ; Ch suffr.

*Saxifraga oppositifolia* L.: *Sassifraga a foglie opposte*; pianta perenne erbacea; macereti, morene, ambienti nivali e rupi con substrato siliceo; 1800-2800 m, max 3800 m; specie comune ma localizzata; parzialmente protetta; (Circum) Artico-Alp; Ch pulv.

**Famiglia ROSACEAE**

*Alchemilla pentaphyllea* L.: *Ventagliana a cinque foglie*; pianta perenne erbacea con fusti striscianti tipica di ambiente nivale su substrato siliceo; 200-3200 m; specie comune; Endemica Alpica centro-occ; H scap.

*Geum reptans* L.: *Cariofillata delle pietraie*; pianta perenne erbacea, su pietraie silicee della fascia alpina e subnivale; 2000-3400 m; specie rara; Orof. SE-Europ; H rept.

### **Famiglia ERICACEAE**

*Loiseleuria procumbens* (L.) Desv.: *Azalea alpina*; arbustiva, sempreverde, con fusti legnosi sdraiati e tappezzanti e rami ascendenti; creste ventose, crinali esposti e dossi pronunciati con substrato siliceo; 1600-2400 m, max 3000m; specie rara; Circumbor. Artico Alp.; Ch rept.

*Rhododendron ferrugineum* L.: *Rhododendro rosso*; arbustiva, sempreverde, brughiere sub alpine su suolo acido; 1600-2300 m; raramente 200-3000 m; specie comune; parzialmente protetta; Circumbor; Ch frut.

*Vaccinium uliginosum* L.: *Mirtillillo falso*; arbusto caducifoglio; brughiere subalpine e pascoli, fortemente acidofila; 1300-2500 m, max 3000 m; specie comune; Circumbor.; Ch frutt.

### **Famiglia PRIMULACEAE**

*Soldanella pusilla* Baumg.: *Soldanella piccola*; pianta perenne erbacea, vallette nivali, substrato siliceo; 2300-2900 m; specie rara; Orof. SE.Europ; H ros.

### **Famiglia SCROPHULARIACEAE**

*Euphrasia minima* Jacq. & DC.: *Eufrosia minima*; pianta annuale, prati aridi, nardeti, curvuleti, festuceti, 1500-2800 m; specie comune; Orof. Centro S.Europ.; T scap.

*Veronica alpina* L.: *Veronica alpina*; pianta perenne erbacea, vallette nivali, anfratti umidi, indifferente al chimismo del substrato; 1500-300 m, max 3200 m; specie rara; Artico Alp. Euroasiatica; H scap.

### **Famiglia COMPOSITAE**

*Doronicum clusii* (All.) Tausch: *Doronic di Clusius*; pianta perenne erbacea, insediata su morene e macereti di ambienti periglaciali alpini, cresce su substrati acidi silicei; 1500-2900 m, max 3300 m; specie comune; Orof. S-Europ; G rhiz.

*Homogyne alpina* (L.) Cass.: *Tussilagine delle Alpi*; pianta perenne erbacea, boschi, brughiere e pascoli; indifferente al chimismo del substrato; 800-2200 m, max 2400 m; specie comune; Orof. Centro-Europ; H ros.

*Leucanthemopsis alpina* (L.) Heywood: *Margherita alpina*; pianta erbacea perenne di macereti, morene, greti, pendii franosi preferibilmente con substrato siliceo; 1700-3600 m; Orof. SW-Europ; specie comune; H scap.

*Senecio incanus* L. *ssp. carniolicus* (Willd.) Br-Bl.: *Senecio della carnia*; pianta perenne erbacea, pascoli alpini, pendii ventosi, creste; preferibilmente su substrato siliceo; 1800-2600 m, max 3000 m; specie comune ma localizzata; Endemico Alpico; H scap.

**Famiglia EMPETRACEAE**

*Empetrum nigrum* L. *ssp. hermaphroditum* (Hagerup) Böcher o *Empetrum hermaphroditum* Hagerup.: *Moretta comune*; piccolo arbusto sempreverde con fusti striscianti e rami legnosi eretti e contorti, tipico di brughiere alpine, creste rupi e torbiere con substrato siliceo; 1200-3000 m; specie comune ma localizzata; Circumbor; Ch frut.

**Famiglia CUPRESSACEAE**

*Juniperus communis* L. *ssp. alpina* Cèlak o *Juniperus nana* Willd: *Ginepro nano*; arbusto nano sempreverde, normalmente appressato al suolo; si trova in brughiere alpine ed arbusteti indipendente dal tipo di chimismo del substrato; 1500-2500 m; pianta comune, sostituisce in quota il più popolare e diffuso *Juniperus communis*; Euro-Asiatico sia su Alpi che Appennini; NP.

### 3.d. PROGETTO RETE NATURA 2000



*fig 3.5: Collocazione geografica dei SIC al cui interno si trova la Vallaccia Corta, evidenziati dal cerchio in rosso.*

La zona di studio è presente nel progetto europeo di Rete Natura 2000, che ha come obiettivo la salvaguardia degli ambienti naturali, specie animali o vegetali, rare o in via di estinzione. Rete Natura 2000 identifica due tipologie di siti di rilevanza naturalistica: ZPS (Zone di Protezione Speciale) e SIC (Siti di Importanza Comunitaria). La Vallaccia Corta come possiamo vedere è compresa principalmente all'interno del SIC *Passo e Monte di Foscagno*, mentre la parte alta della valle rientra nel SIC *La Vallaccia-Pizzo Filone*.

Ma cosa sono SIC e ZPS?

**ZPS, Zone di Protezione Speciale:** istituite dalla Direttiva Uccelli (79/409/CEE), al fine di tutelare i siti in cui vivono le specie ornitiche contenute nell'allegato 1 di tale direttiva, e i siti di passaggio per specie migratrici, in particolare le zone umide di importanza internazionale, ai sensi della Convenzione di Ramsar.

**SIC, Siti di Importanza Comunitaria:** istituiti ai sensi della Direttiva Habitat (92/43/CEE), al fine di contribuire in modo significativo a mantenere o ripristinare un habitat naturale (allegato 1) o una specie (allegato 2) in uno stato di conservazione soddisfacente.

Rete Natura 2000 ha come scopo principale quindi quello di salvaguardare la biodiversità, sia negli habitat naturali che quelli semi-naturali, cioè pascoli, aree ad agricoltura, boschi di cedui, ecc.

Esistono in Lombardia ben 22 ZPS e dei 176 SIC proposti dalla Regione Lombardia sono stati tutt'ora approvati quelli della regione biogeografica Alpina e quelli della regione biogeografica Continentale. Entro 6 anni questi siti verranno quindi designati come ZPS.

Per quanto riguarda il SIC del *Passo e Monte Foscagno* si tratta di un tipico ambiente alpino, caratterizzato da elevata qualità ambientale e dalla presenza di numerosi habitat di importanza comunitaria: interessante la concomitanza seriale di vegetazione interrante, dalle acque correnti alla prateria climax. Si segnala anche la presenza di habitat caratteristici degli orizzonti alto-alpini e nivali, quali le vallette nivali su silice (*Salicetalia herbaceae*) e di numerose forme periglaciali, particolarmente sviluppate e di grande significato ambientale (non solo geomorfologico). Si osservano anche specie di interesse comunitario, quali *Lynx lynx* ed *Aquila chrysaetos* e di numerose altre specie tipiche di ambiente alpino.

Allo stesso modo per il SIC della *Vallaccia Pizzo Filone* l'elevata estensione delle praterie, con diversi gradi di antropizzazione, e la presenza di processi di riforestazione qualificano questo sito per lo studio delle possibilità di restaurazione di habitat seguendo processi dinamici naturali. Inoltre, si sottolinea la grande importanza del sito da un punto di vista naturalistico per la presenza di nuovo di habitat di alta quota quali le vallette nivali su silice e la presenza di importanti fenomeni periglaciali (rock glacier, suoli poligonali, suoli striati). Il sito è caratterizzato non solo da una grande varietà di habitat, ma anche dalla presenza di numerose specie di flora e fauna, la maggior parte delle quali caratteristica di ambiente alpino, di cui alcune di interesse comunitario. Interessante la ricostituzione spontanea del bosco di cembro, dovuta in parte alla regressione del pascolamento. Si osserva anche la presenza di *Aquila chrysaetos* segnalata in uno stato di buona conservazione, e la presenza del gipeto, *Gypaetos barbatus*, da poco reintrodotta.

## **4. MATERIALI E METODI**

Nell'ambito del presente lavoro di tesi sono state realizzate misure dello spessore del manto nevoso in 69 punti per un periodo compreso tra il 12 ottobre 2009 fino al 22 luglio 2010 (data ultima di scioglimento nivale). Durante il mese di Marzo 2010 sono state fatte misure di BTS in 40 punti del rock glacier Foscagno, associando a tre di questi punti un'analisi preliminare delle caratteristiche nivologiche, in particolare con riferimento a densità e gradiente termico, del manto nevoso. Sono state inoltre realizzate misure fenologiche di 37 specie target del piano subalpino, alpino e nivale distribuite nei 69 punti in questione (dall' 11 giugno 2010 fino al 7 ottobre 2010). Su 12 di questi punti, in presenza di diversi tipi di associazioni vegetali e di suolo nudo, è stato possibile analizzare il regime termico del suolo, grazie a dei data loggers installati in anni precedenti. Per quantificare ulteriormente l'influenza della vegetazione sul bilancio energetico superficiale del suolo, e per trovare delle relazioni con la fenologia sono stati calcolati: TDD (*Thawing Degree Days*), FDD (*Freezing Degree Days*), GDD (*Growing Degree Days*) e *n-factor* TDD, *n-factor* FDD, *n-factor* GDD, espressi come rapporto rispettivamente di TDD, FDD e GDD del suolo rispetto a quelli dell'aria.

### **4.a. EVOLUZIONE DEL MANTO NEVOSO**

#### **4.a.1. *Caratteristiche nivologiche: Gradiente termico e densità del manto nevoso ( $\rho$ )***

Per indagare le caratteristiche nivologiche in presenza o assenza di permafrost, sono stati eseguiti, nel periodo primaverile (16 marzo 2010), tre profili di temperatura all'interno del manto nevoso, in corrispondenza di valori di BTS diversi. In questo periodo infatti la neve ha ancora uno spessore adeguato a mantenere il bilancio energetico dell'anno precedente (come si può vedere nei grafici di andamento della neve in Appendice A.2). Il profilo numero 1 è stato ricavato dopo aver scavato una trincea a quota 2325 m, in prossimità del rock glacier inattivo (Palina 8), dove il valore di BTS era di  $-2,9$  °C. Il secondo profilo è stato ricavato ad una quota di 2420 m, rispettivamente sul rock glacier attivo, e in corrispondenza di un valore di BTS di  $-2,6$ °C. La terza misura è stata fatta a quota 2368 m, in prossimità della palina P4. In questo punto il valore di BTS era di  $0,1$ °C.

La distribuzione della temperatura all'interno del manto nevoso può avere un andamento diverso a seconda della stagione, dell'esposizione e della quota, e infine dalla presenza di permafrost. Infatti normalmente in assenza di permafrost la terra emana un flusso continuo di calore (flusso geotermico) e in inverno a livello del suolo la temperatura vale circa 0°C. Più si sale verso la superficie essa diminuisce facendo registrare valori negativi. In presenza di permafrost invece la temperatura a livello del suolo, sotto il manto nevoso risulta inferiore ai -3°C, come dimostrano gli studi di BTS (Haeberli, 1973).

Per misurare la temperatura del manto nevoso si usa un termometro a resistenza con il quale, dopo aver scavato una trincea e riconosciuto i singoli strati, è possibile misurare la temperatura del singolo strato.

Negli stessi punti presi in considerazione per il gradiente termico, è stata misurata la densità della neve. Per densità globale si intende la quantità di ghiaccio e acqua presenti in un metro cubo di neve; essa viene misurata in Kg/m<sup>3</sup>, e viene definita come il rapporto fra il volume dell'acqua di fusione che deriva da un campione di neve e il volume originale del campione.

In pratica nella neve sono compresi parti di ghiaccio, acqua, vapore acqueo e aria, e la densità globale esprime il rapporto tra questi elementi e l'aria. Ad esempio il manto nevoso stagionale ogni anno arriva ad una densità di circa 500 Kg/m<sup>3</sup>, mentre un metro cubo di ghiaccio preso da un ghiacciaio può raggiungere il peso di 917 Kg/m<sup>3</sup>.

Indicativamente la tabella 4.1 riporta i valori minimi e massimi riscontrabili nei profili.

TIPO DI NEVE	DENSITA' (Kg/m <sup>3</sup> )
Neve fresca molto leggera	30 circa
Neve fresca	100
Grani fini e arrotondati	200-450
Grani sfaccettati	200-400
Grani di brina di profondità	150-350
Grani di fusione e rigelo	300-500

*Tabella 4.1: densità tipiche relative a differenti tipologie di neve.*

La misura della densità della neve viene effettuata usando un carotatore del volume di 500 cm<sup>3</sup>, detto *snow fork* e un dinamometro a molla. Si tratta di uno strumento portatile, leggero e

facile da usare. Il prelievo della neve col carotatore viene fatto orizzontalmente, all'interno dello strato. Il campione prelevato viene poi messo in un sacchetto e pesato col dinamometro.

#### **4.a.2. Misure dell'altezza della neve**

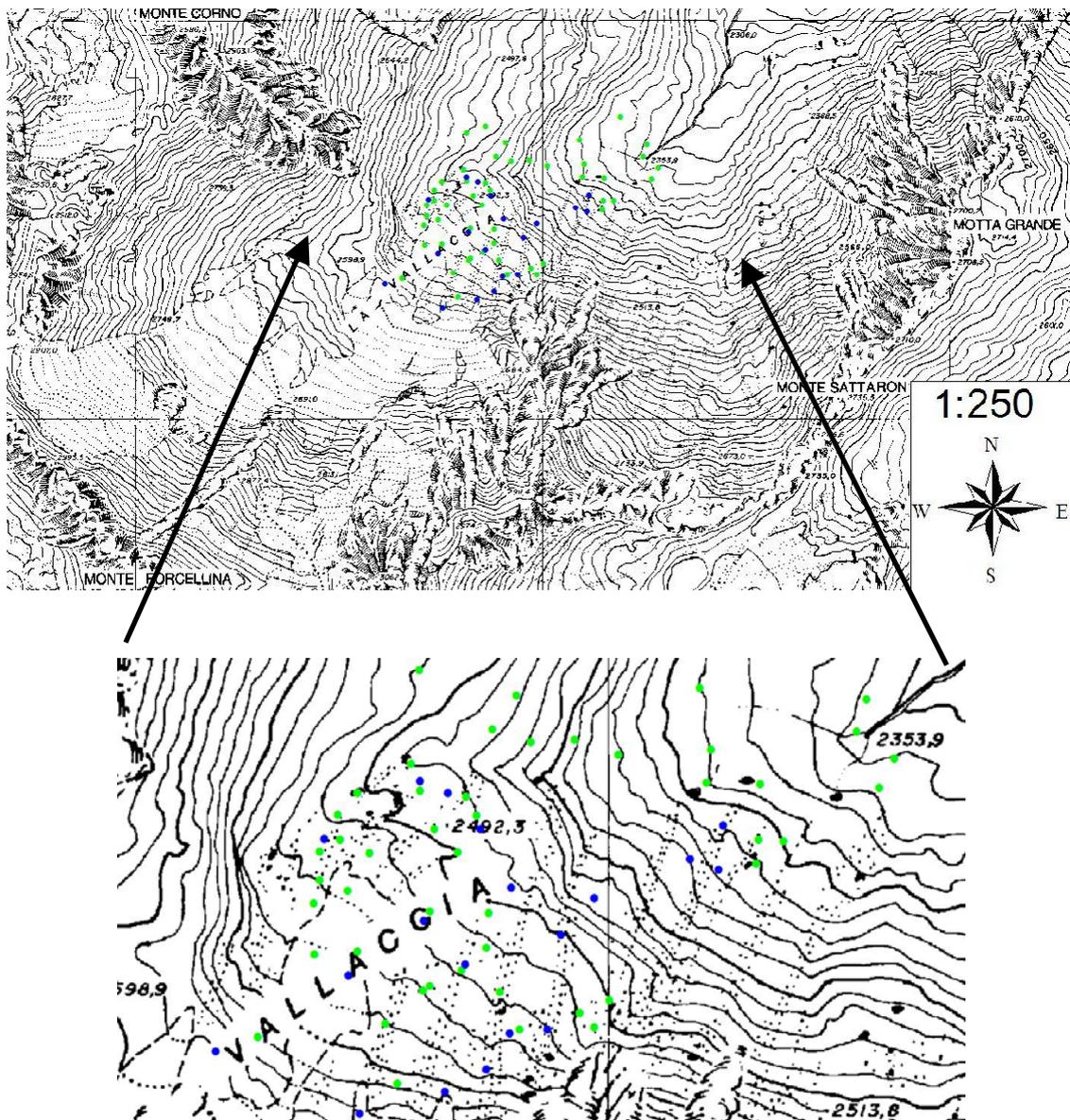
La copertura del manto nevoso è soggetta a continui cambiamenti dalla prima precipitazione solida fino allo scioglimento primaverile. In primo luogo la quantità di precipitazioni assume un ruolo fondamentale, ma non di meno altri fattori quali il vento e la morfologia del territorio, per i quali si creano delle zone con spessore del manto nevoso molto elevato, dette zone di accumulo, come le vallette nivali, depressioni che permettono un accumulo prolungato nel tempo della neve. Le creste ventose al contrario subiscono l'asportazione della neve in quanto soggette a forti venti. I pendii esposti a Sud, subiscono un'irradiazione maggiore e si liberano prima dalla neve. Lo spessore della neve è fondamentale, soprattutto nel periodo invernale, per garantire alla vegetazione l'isolamento dalle basse temperature invernali; nel periodo primaverile è fondamentale nel bilancio energetico netto del suolo laddove c'è permafrost.

La misurazione dell'altezza della neve viene fatta tramite l'utilizzo di una sonda simile a quella usata per ricercare i travolti da valanga, graduata ad ogni 5 cm, per poter vedere variazioni di neve anche giornaliere, come nel periodo primaverile.

L'altezza della neve è stata misurata ad ogni singola palina presente sul rock glacier (tot 69 paline) sia sulla parte attiva che su quella inattiva, e sulla parte terminale della morena olocenica che si origina alla sinistra idrografica del rock glacier Fosagno. Queste sono delle semplici paline "da slalom", e sono state collocate dove sono installati anche dei permanent plot per lo studio a lungo termine della vegetazione, e negli stessi punti dove è stata monitorata la fenologia delle specie target (fig. 4.1). Lo spessore nivale è stato soggetto ad un totale di 24 record di misurazioni, per un periodo compreso tra il 12 ottobre 2009 fino al 12 luglio 2010. Durante il periodo invernale ad intervalli settimanali o mensili, in base alle condizioni di sicurezza del manto nevoso ed anche grazie al contributo della guida alpina Luca Martinelli, esperto conoscitore di ambiente alpino innevato. Nel periodo primaverile invece con intervalli più ristretti, due volte a settimana, in quanto lo scioglimento della coltre nevosa avviene con una dinamica molto veloce (i dati delle misurazioni effettuate dello spessore del manto nevoso si trovano in Appendice A.2 e A.3).

Al fine di un'analisi più approfondita del manto nevoso sono stati calcolati e in seguito confrontati, per ciascuno dei punti in cui si è calcolato lo spessore, i giorni di neve con altezza sotto i 10 cm, tra 10 e 80 cm, e sopra gli 80 cm. Questo per verificare i potenziali effetti di isolamento del manto nevoso.

Sono stati inoltre confrontati i pattern di accumulo e scioglimento del manto nevoso in diversi range altitudinali, per poter vedere quali siano le relazioni col gradiente altitudinale e con il tipo di rilievo, per vedere quale tra questi due fattori può incidere maggiormente sul pattern di evoluzione del manto nevoso. In particolare dapprima saranno comparati i valori di sintesi per ogni range di 25 m di quota, e poi di ogni 50 m.



*Fig. 4.1: collocazione dei punti in cui è stata effettuata la misura dello spessore della neve nel periodo invernale e a seguire il rilievo fenologico.*

#### 4.b. BTS (*Bottom Temperature of winter Snow cover*)

Si tratta di un metodo di indagine geofisica utilizzato dalla fine degli anni '70 (Haeberli, 1973) per il rilevamento del permafrost; è un metodo indiretto, a differenza di altri metodi diretti quali sondaggi geognostici con profili di temperatura. Questo metodo è basato sul rilevamento delle caratteristiche termiche dello strato attivo, a differenza di altri metodi di indagine geofisica come prospezioni elettriche, sismiche, o altri che prendono in esame le caratteristiche fisiche del permafrost e dello strato attivo.

Il BTS (*Bottom Temperature of winter Snow cover*), viene usato per la prima volta sulle Alpi italiane da Guglielmin & Tellini (1993, 1994), consiste nella misurazione della temperatura alla base del manto nevoso, con spessore superiore ad 80 cm in un raggio minimo di 10 m, al termine della stagione invernale. Una tale copertura nevosa costituisce un perfetto isolante nei confronti del regime termico dell'aria e quindi il valore misurato è soltanto funzione del bilancio energetico dello strato attivo dell'anno precedente.

Di seguito le potenziali classi di temperatura rilevabili col metodo del BTS (Haeberli, 1973):

- $T < -3^{\circ}\text{C}$  : probabile presenza di permafrost;
- $-3^{\circ}\text{C} < T < -2^{\circ}\text{C}$  : permafrost possibile;
- $T > -2^{\circ}\text{C}$  : assenza di permafrost;

Il BTS è un metodo di relativo facile utilizzo, in quanto non necessita l'uso di sofisticate o pesanti apparecchiature, e richiede solo un operatore. La misura infatti viene effettuata tramite l'utilizzo di un'asta di acciaio, con una punta in piombo, per poter creare l'apertura nel manto nevoso, nella quale si cala la sonda alla quale è stato legato in precedenza un termometro, che viene così mandato fino all'interfaccia terra-neve. In particolare sono state effettuate 40 misure di BTS durante il mese di marzo 2010, i cui risultati sono riportati in tabella 5.9. Le misure sono state fatte in prossimità dei punti in cui durante il periodo estivo è stata monitorata la fenologia della vegetazione. Tuttavia per costrizioni logistiche non è stato possibile effettuare le misure in tutti i 69 punti.

Alcuni autori (Haeberli & Patzelt, 1983) hanno trovato una forte correlazione tra lo spessore dello strato attivo misurato con la sismica a rifrazione e i valori di BTS oppure tra spessore dello strato attivo e prospezione elettrica, (Lozej & Guglielmin, 1992), consentendo anche di verificare la validità di  $-3^{\circ}\text{C}$  come limite inferiore del permafrost: valori di BTS inferiori di  $-3^{\circ}\text{C}$  indicano uno strato attivo di spessore inferiore a 5 m mentre valori compresi tra  $-3^{\circ}\text{C}$  e  $-1,7^{\circ}\text{C}$  permafrost a profondità elevata e non più in equilibrio col clima.

### 4.c. DATA LOGGERS

Il data logger è un acquisitore automatico di dati costituito da una o più sonde elettroniche, termistori nel nostro caso, collegate ad una centralina che memorizza le misure di uno o più parametri, effettuate ad intervalli di tempo opportunamente stabiliti.

Il data logger rappresenta la versione moderna dei registratori tradizionali su carta (es. termografi), infatti registra i dati e ne permette una rappresentazione grafica. Fra i vantaggi del data loggers rispetto ai registratori tradizionali sono certamente da annoverare: la grande capacità di memoria e quindi la grande autonomia, l'ampiezza dei campi di misura, le dimensioni ridotte, la possibilità di gestire soglie di allarme, la precisione delle misure effettuate, la manutenzione ridottissima, la versatilità di utilizzo, il costo di gestione solitamente contenuto. Il limite del data loggers è dato dall'impossibilità di ottenere un grafico in tempo reale delle grandezze misurate e dalla necessità di interfacciarsi con un computer per analizzare e stampare i dati ottenuti.

Nell'area compresa dal rock Glacier della Vallaccia sono stati posti da molti anni diversi data logger (Hobo Pro by Onset Comp e Tinytag by Gemini) precisamente alle paline 20,23,27,29,31,32,39,41,47,G11,G17,G19. Questi sono stati programmati per misurare la temperatura ogni ora, in modo da avere un range di misure nella memoria fino ad un anno. Il minimo di accuratezza di questo termistori è di 0,2 °C. La scelta del punto in cui installarli è stata fatta in base al tipo di ecologia della vegetazione presa in esame, e di conseguenza in base al tipo di copertura e di densità della vegetazione (tabella 4.2). A titolo di confronto sono stati installati anche su suolo nudo, rispettivamente nei punti P41 e P32. I termistori sono stati installati in ciascun punto a 2 e 10 cm, per poter indagare a fondo lo studio del GST (*Ground*

palina	specie target	associazione vegetale
P41	<i>Suolo nudo</i>	-
P32	<i>Suolo nudo</i>	-
G11	<i>Vaccinium uliginosum</i>	<i>Vaccinium-Rhododendretum ferruginei</i>
P27	<i>Vaccinium uliginosum</i>	"
P20	<i>Rhododendron ferrugineum</i>	"
P23	<i>Rhododendron ferrugineum</i>	"
P29	<i>Carex curvula</i>	<i>Caricetum curvulae</i>
P31	<i>Loiseleuria procumbens</i>	<i>Loiseleurieto-Cetrarietum</i>
P21	<i>Salix herbacea</i>	<i>Salicetum herbacea</i>
P47	<i>Salix herbacea</i>	"
G17	<i>Cerastium uniflorum</i>	<i>Oxyrietum digyanae</i>
P39	<i>Cerastium uniflorum</i>	"

**Tabella 4.2:** elenco delle specie e delle associazioni per le quali sono stati installati dei data loggers.

*Surface Temperature*), cioè del regime termico del suolo, e allo stesso tempo per poter indagare lo studio delle relazioni tra la vegetazione e lo studio dei rapporti con gli altri fattori abiotici. Sono inoltre posizionati paralleli alla superficie, evitando il più possibile

il disturbo dovuto alla scabrosità del terreno. Questa è la procedura standard che è stata usata anche in Artico (Osterkamp, 2003) e in Antartide (Guglielmin, 2006; Cannone *et al.*, 2006; Guglielmin *et al.*, 2008).

#### **4.c.1 TDD (*Thawing Degree Days*), FDD (*Freezing Degree Days*), GDD (*Growing Degree Days*)**

Per cercare di descrivere al meglio il GTR (*Ground Thermal Regime*), ossia il regime termico del suolo, e per cercare di quantificare l'effetto di isolamento della vegetazione sono stati calcolati: il TDD (*Thawing Degree Days*), indice che esprime la somma delle temperature dei giorni sopra gli 0°C) e l'FDD (*Freezing Degree Days*), indice che esprime la somma delle temperature dei giorni sotto gli 0°C). Un altro fattore importante che è stato calcolato è il GDD (*Growing Degree Days*), il quale esprime la somma dei valori di temperatura al di sopra della “*temperatura di base*”, cioè quella temperatura al di sotto della quale lo sviluppo della pianta si blocca. Nel nostro caso la temperatura di base utilizzata sarà quella di 5°C (in accordo con Hulber *et al.*, 2006).

Con questi valori è possibile esprimere l'*n-factor*: rapporto di TDD o FDD del suolo rispetto ai medesimi calcolati per l'aria, tecnica già usata da altri autori (Klene *et al.*, 2001; Cannone & Guglielmin, 2009). Il tutto usando i dati raccolti dai data loggers nel periodo dal 1 dicembre 2009 al 30 novembre 2010 e per la temperatura dell'aria i dati sono stati resi disponibili dalla stazione meteorologica ARPA della Vallaccia di Livigno. Inoltre applicheremo lo stesso fattore anche ai GDD, per comprendere i rapporti con la fenologia delle specie vegetali target.

### **4.d. RILIEVO FENOLOGICO DELLA VEGETAZIONE**

Secondo un gruppo di lavoro dell'*International Biological Program* vale la seguente definizione: “fenologia è lo studio della sincronizzazione degli eventi biologici ricorrenti, delle cause della loro regolazione in riguardo alle forze biotiche e abiotiche, e delle relazioni tra le fasi di specie simili o differenti” (Lieth, 1974).

I rilievi fenologici si sviluppano lungo tutto il ciclo di vita di una pianta o di un singolo individuo. Questo tipo di approccio richiede la differenziazione delle diverse fasi del ciclo, dette *fenofasi*, che, secondo le indicazioni utilizzate dal Progetto Internazionale ITEX (*International Tundra Experiment*; Webber & Walker, 1991), vengono suddivise in: comparsa dei primi germogli, comparsa delle foglie nuove, comparsa dei germogli principali, comparsa

del primo fiore, primo stimma visibile, prime antere visibili, fioritura principale, inizio sviluppo semi, semi maturi, senescenza fogliare (tabella 4.3).

Per ciascuna di queste fenofasi si può utilizzare un approccio qualitativo oppure quantitativo, ossia si può utilizzare come indicatore della fase il giorno in cui la fase avviene, oppure unitamente al giorno si possono considerare anche le dimensioni (fig. 4.1). Inoltre per facilitare le operazioni di calcolo e di analisi, verranno usati i giorni giuliani, per cui oltre ai giorni del calendario tradizionale, partendo a contare dal primo giorno dell'anno, viene calcolato il numero del giorno. Il ritmo di avanzamento del



**Fig. 4.1:** esempio di rilievo fenologico su *Carex Curvula* il 29.06.10\_Palina 4

processo all'interno della fase viene detto *ritmo di sviluppo* e dipende dalle condizioni ambientali. Le osservazioni delle diverse fasi fenologiche sono state svolte da maggio 2009 fino ad ottobre 2010, con scadenza all'inizio di due volte a settimana, in quanto la fenologia cambia molto velocemente nei primi stadi; dunque, passata la fioritura, con scadenza settimanale. Lo studio ha preso in considerazione specie target, delle quali si possiede un *record* di dati ormai da diversi anni, che sono collocate in punti definiti da permanent plot, installati anch'essi da diversi anni.

	giorni giuliani																											
Specie x	161	166	169	172	175	180	183	186	189	193	196	199	203	206	210	213	218	221	225	230	238	244	250	263	280			
altezza neve																												
primi germogli																												
foglie nuove																												
germogli principali																												
primo fiore																												
primo stimma visibile																												
prime antere visibili																												
fioritura principale																												
inizio sviluppo semi																												
semi maturi																												
senescenza foglie																												

**Tabella 4.3:** tabella base utilizzata nelle misurazioni fenologiche, nella prima colonna sono elencate le fasi fenologiche monitorate, e nella seconda riga le date in cui è stato fatto il rilievo (giorni giuliani)

specie	Tipo di forma di crescita	Tipo di associazione vegetale	Palina	quota (m)	quota media (m)
<i>Vaccinium ulig.</i>	arbusto	<i>Vaccinium-Rhododendretum ferruginei</i>	24	2390,31	2465,29
			27	2431,41	
			G11	2519,95	
			G13	2519,48	
<i>Rhododendron ferr.</i>	arbusto	<i>Vaccinium-Rhododendretum ferruginei</i>	2	2359,27	2422,25
			4	2368,82	
			20	2482,13	
			23	2388,48	
			G13	2519,48	
<i>Loiseleuria proc.</i>	arbusto nano	<i>Loiseleurieto-Cetrarietum</i>	4	2368,82	2441,20
			7	2407,63	
			22	2375,22	
			29	2478,04	
			30	2507,51	
			31	2509,98	
<i>Salix herbacea</i>	arbusto nano	<i>Salicetum herbacea</i>	1	2356,74	2477,62
			5	2417,93	
			8	2515,30	
			13	2537,07	
			14	2515,30	
			21	2362,74	
			47	2514,74	
			G11	2519,95	
			G19	2596,52	
<i>Carex curvula</i>	graminoide	<i>Caricetum curvulae</i>	3	2356,74	2442,84
			4	2359,27	
			5	2364,18	
			18	2368,82	
			19	2498,16	
			22	2492,77	
			27	2417,93	
			28	2431,41	
			29	2452,20	
			30	2478,04	
			31	2507,51	
G11	2509,98				
<i>Luzula alpino pilosa</i>	graminoide	<i>Luzuletum spadiceae</i>	1	2356,74	2433,44
			21	2362,74	
			G10	2518,30	
<i>Poa laxa</i>	graminoide	<i>Androsacetum alpinae</i>	15	2527,84	2496,97
			43	2520,40	
			44	2520,40	
			45	2524,45	
			51	2524,45	
			G6	2439,88	
			G8	2423,32	
			G9	2505,79	
			G10	2518,30	
			G15	2527,06	
G17	2539,96				

Questi corrispondono a 69 punti, marcati con picchetti in ferro (quadrati di 1 m x 1 m) e segnalati a distanza da paline in plastica. La scelta delle stazioni è stata fatta in base a diversi criteri tenendo conto dei diversi fenomeni geomorfologici in modo da poter avere un'immagine di tutti i possibili microambienti che caratterizzano l'area in questione, con lo scopo di poter confrontare le differenti risposte di questi alle variazioni del clima, in quanto sottoposte a specifici stress prodotti dall'instabilità morfologica del territorio. In particolare sono state monitorate 37 specie target, per un totale di 25 rilievi di campo (tabella 4.3), tra le piante appartenenti ad ognuna delle associazioni descritte, dalla brughiera, al pascolo, alle vallette nivali, alle creste ventose,

<i>Ranunculus glacialis</i>	erbacea	<i>Androsacetum alpinae</i>	45	2524,45	2539,63
			G5	2464,17	
			G18	2577,32	
<i>Doronicum clusii</i>	erbacea	<i>Luzuletum spadiceae</i>	47	2514,74	2515,86
			G9	2505,79	
			G15	2527,06	
<i>Geum reptans</i>	erbacea	<i>Oxyrietum digynae</i>	12	2527,75	2498,98
			17	2528,46	
			36	2500,07	
			39	2519,44	
			40	2519,44	
			42	2520,40	
			44	2520,40	
			46	2544,49	
			47	2514,74	
			G3	2488,12	
			G5	2464,17	
			G6	2439,88	
<i>Veronica alpina</i>	erbacea	<i>Salicetum herbacea</i>	1	2356,74	2438,13
			21	2362,74	
			47	2514,74	
			G10	2518,30	
			G16	2538,32	
<i>Cerastium uniflorum</i>	erbacea	<i>Oxyrietum digynae</i>	33	2497,24	2516,32
			39	2519,44	
			43	2520,40	
			44	2520,40	
			45	2524,45	
			46	2544,49	
			G9	2496,00	
G17	2505,79				

**Tabella 4.4:** tabella riassuntiva delle specie target per le quali è stata fatta l'analisi fenologica.

vegetale. In questo modo è stato possibile caratterizzare al meglio la dinamica delle diverse associazioni e delle diverse forme di crescita. Questi punti infatti sono anche stati scelti in base alla dinamica della vegetazione per poter dimostrare, con un'analisi a lungo termine, che le diverse associazioni non sono statiche, ma rispondono ai cambiamenti del clima degli ultimi anni.

A completamento dello studio fenologico, per poter quantificare l'effetto della copertura vegetale sul bilancio termico di un suolo saranno confrontati i valori di TDD, e di GDD rispetto alla fenologia di diverse specie target del piano subalpino, alpino e nivale.

alle piante pioniere del detrito, per poter usufruire di un mezzo di confronto tra i diversi tipi di vegetazione (le specie target analizzate in questo studio sono state descritte nell'elenco floristico di pagina 46). Tra queste specie sono state estratte le 12 più rappresentative delle associazioni e delle diverse forme di crescita (tabella 4.4), che corrispondono a quelle più studiate in letteratura e per le quali si dispone di dati annuali di temperatura del suolo. Dove possibile sono state scelte diverse forme di crescita in relazione allo stesso tipo di associazione

## 5. RISULTATI

### 5.a. EVOLUZIONE DEL MANTO NEVOSO

#### 5.a.1. Gradiente termico e densità del manto nevoso

1-Quota 2375 m h neve 160 cm		2-Quota 2490 m h neve 210 cm		3-Quota 2368 m h neve 160 cm	
h(cm)	temperatura (°C)	h (cm)	temperatura (°C)	h(cm)	temperatura (°C)
aria	-4	aria	-7	aria	-5
160	-3,8	210	-2,3	160	-2,8
150	-4,2	180	-3,5	150	-4,3
120	-7,3	150	-5,4	120	-7,2
70	-5,8	120	-4,4	70	-6,1
50	-5	70	-4,3	50	-3,5
30	-4,2	50	-4	30	-1,2
10	-3,5	30	-3,5	10	-0,8
0	-2,3	10	-2,8	0	0,1
		0	-2,6		

*Tabella 5.1: valori misurati del profilo termico del manto nevoso.*

Per quanto riguarda il gradiente termico del manto nevoso sono stati eseguiti, nel periodo primaverile, in data 16 marzo 2010, due profili di temperatura all'interno del manto nevoso. In questo periodo infatti la neve aveva ancora uno spessore adeguato a mantenere il bilancio energetico dell'anno precedente (Appendice A.2 e A.3). Il profilo numero 1 è situato a quota 2325 m, in prossimità del rock glacier inattivo, dove il valore di BTS era di  $-2,9\text{ }^{\circ}\text{C}$ . In questa stazione l'inclinazione della superficie è di  $5^{\circ}$ , e la copertura vegetale del suolo è riferibile all'associazione *Salicetum herbaceae*. Il suolo ha una matrice sabbiosa con blocchi e massi angolari sparsi. Il secondo profilo è stato ricavato ad una quota di 2420 m, rispettivamente sul rock glacier attivo, e in corrispondenza di un valore di BTS di  $-2,6^{\circ}\text{C}$ . L'inclinazione della superficie è di  $10^{\circ}$ , con esposizione verso Nord-Est. In questo punto la granulometria del suolo è molto grossolana, senza copertura vegetale e caratterizzata da massi e blocchi spigolosi senza copertura lichenica. La terza misura è stata fatta a quota 2368 m, in prossimità della palina P4. In questo punto il valore di BTS era di  $0,1^{\circ}\text{C}$ . L'inclinazione del suolo è di circa  $3^{\circ}$ , la granulometria presenta una matrice sabbiosa e dei blocchi angolari sparsi. La vegetazione è continua e riferibile alla prateria montana. Il profilo 3 presenta un gradiente termico di  $0,063^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ , nei 30 cm basali, mentre il profilo 1 e 2, rispettivamente di  $0,03^{\circ}\text{C}/\text{cm}$  e  $0,04^{\circ}\text{C}/\text{cm}$ . I gradienti del profilo 1 e 2 sono attribuibili a un metamorfismo di tipo

distruttivo. Nei 40 cm più superiori invece per il profilo 1 il gradiente è di  $0,06^{\circ}\text{C}/\text{cm}$  e di  $0,05^{\circ}\text{C}/\text{cm}$  (nei primi 60 cm) e  $0,11^{\circ}\text{C}/\text{cm}$  rispettivamente per il profilo 2 e 3. I primi due sono di nuovo due deboli gradienti, tipici del metamorfismo distruttivo mentre il profilo 3 sembra presentare dal gradiente termico un metamorfismo di tipo costruttivo, in quanto presenta valori di medio gradiente.

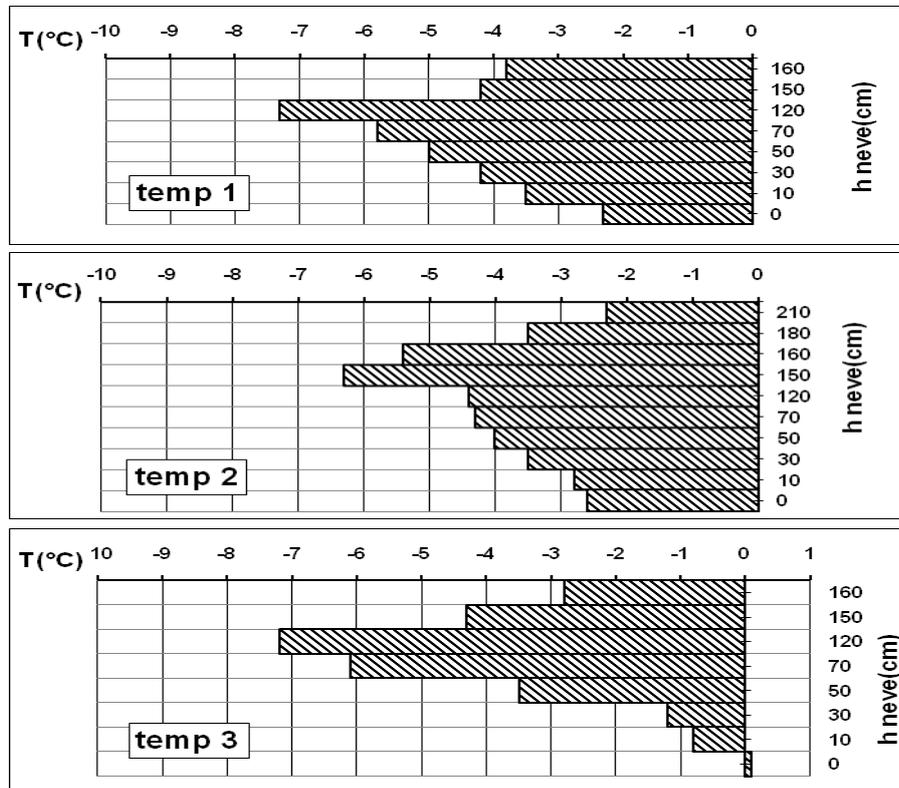


Figura 5.1: rappresentazione dei gradienti termici del manto nevoso misurati nei tre punti descritti in tabella 5.1.

Negli stessi punti in cui è stata fatta la misura del gradiente termico del manto nevoso, sono stati fatte delle misure della densità della neve, rispettivamente alla base, nello strato intermedio e nello strato superiore del manto nevoso (tabella 5.2)

1-quota 2375 m		2-quota 2490 m		3-quota 2368 m	
h neve (cm)	densità ( $\text{g}/\text{dm}^3$ )	h neve (cm)	densità ( $\text{g}/\text{dm}^3$ )	h neve (cm)	densità ( $\text{g}/\text{dm}^3$ )
160	120	210	230	160	130
80	390	120	520	80	240
10	480	10	320	10	480

Tabella 5.2: densità neve misurata nei 3 punti dove è stato effettuato il gradiente termico, scelti in base alle misurazioni di BTS.

Per quanto riguarda la densità della neve notiamo che è molto elevata nei punti 1 e 3, negli strati basali, e nello strato intermedio del punto 2. Negli strati superiori del manto nevoso la densità della neve era particolarmente bassa, indicando la probabile presenza di neve recente, mentre una densità alta come in profilo 1 e 3 potrebbe indicare la presenza di brina di profondità.

### 5.a.2. Pattern di accumulo, persistenza e scioglimento del manto nevoso.

Il monitoraggio dello spessore del manto nevoso è stato eseguito durante tutta la sua evoluzione, dalle prime nevicate autunnali fino allo scioglimento primaverile.

In primo luogo è stata calcolata una sintesi delle caratteristiche medie del manto nivale all'interno di tutto il sito d'indagine (Tabella 5.3).

Per quanto riguarda il periodo studiato (2009-2010), si è registrato un consistente accumulo nevoso nel periodo autunnale e invernale. L'inizio dell'innnevamento è stato il giorno 315, 1 novembre 2009, con spessore della neve già dalla prima nevicata di quasi 2 m in alcuni punti. In appendice (A.4) vengono messi i dati base rispetto all'innnevamento di tutte le paline.

Area di Studio	MIN	MAX	MED	ST DEV	MODA
INIZIO INNEVAMENTO (numero giorno)	315	315	315	0	315
FINE INNEVAMENTO (numero giorno)	166	210	183	11	189
DURATA INNEVAMENTO (numero di giorno)	216	260	233	11	239
Altezza MAX (cm)	110	280	228	37	250
Altezza MIN (cm)	50	190	99	34	70
Altezza MED (cm)	69	210	119	26	150
STAND DEV	23	104	75	17	-
QUOTA (m)	2357	2597	2486	58	2544

Tabella 5.3: sintesi delle caratteristiche medie della copertura nevosa all'interno dell'area di studio.

Come si può vedere (tabella 5.3) la durata dell'innnevamento nell'area in esame è in media di circa 230 giorni, che significa tradotto, più di 7 mesi di copertura nivale. Lo scioglimento è avvenuto molto tardi questa primavera, ad esempio il giorno giuliano 166 (15 giugno 2010), per le prime paline dove si è completamente sciolta la neve: P3, P7, P23, P27, G11 e G13. Mentre l'ultima palina dove è avvenuto lo *snow melt* è la palina P50, il giorno giuliano 210 (29 luglio 2010).

Il valore medio dell'altezza della coltre nevosa in tutta l'area è attorno ai 120 cm (tabella 5.3). L'altezza della neve è fondamentale nel mantenere l'isolamento termico del suolo durante il

periodo invernale. A questo scopo un'analisi ulteriore è stata quella di verificare quanti giorni del manto nevoso rispetto al totale del periodo d'innnevamento sono stati minori di 10 cm, compresi tra 10 e 80 cm, e maggiori di 80 cm. In appendice A.1 viene messa per ciascuna palina il gradiente della neve rispetto a questi parametri.

	< 10 cm			tra 10 e 80 cm			>80 cm		
	inizio	fine	n°giorni	inizio	fine	n°giorni	inizio	fine	n°giorni
<b>medie</b>	183	185	3	164	183	19	321	164	202
<b>max</b>	210	213	8	181	210	58	355	181	234
<b>min</b>	163	166	1	105	163	4	50	105	55
<b>dev st</b>	11,89	11,70	1,36	10,04	11,89	10,25	37,10	10,04	25,89
<b>moda</b>	187	193	2	167	187	9	320	167	221

**Tabella 5.4:** sintesi dei parametri di spessore della neve (espressi in giorni giuliani).

Possiamo vedere (tabella 5.4) che il valore massimo del numero di giorni sopra gli 80 cm è 234, in corrispondenza del punto G19, che è il punto più alto del sito in analisi, con una quota di 2596,52 m. Il valore minimo invece è di 55 giorni (in corrispondenza della palina P24), quindi con una forte divergenza tra il valore massimo e il valore minimo, descritta anche dall'alto valore della deviazione standard.

Al contrario i giorni con spessore della neve minore di 10 cm sono pochi, al massimo 8, in P4 e in P29, e comunque in media 3, ma la deviazione standard è molto bassa indicando una forte correlazione del numero di giorni sotto i 10 cm di tutti i punti in studio.

Per quanto riguarda i giorni con spessore del manto nevoso compreso tra i 10 e gli 80 cm, in media sono 19, e possono arrivare al massimo a 58, come nel caso della palina P24. Il valore minimo è di 4 giorni, per la palina P22, che si trova a quota 2375,22 m, con pendenza quasi nulla e in zona di pascolo alpino. Già da una prima analisi si può vedere come c'è una certa corrispondenza tra questi valori e la localizzazione geografica dei punti (Tabella 5.5 e Appendice A.5).

Possiamo notare inoltre come durante il periodo invernale (dicembre-gennaio-febbraio) il manto nevoso non è mai al di sotto degli 80 cm di spessore (Appendice A.1).

In aggiunta a questo è stata studiata la relazione tra l'evoluzione del manto nevoso ed alcune specie vegetali target, usando come riferimento due situazioni di suolo nudo (i valori di seguito discussi sono riportati in appendice A.1). Per P23 (*Rhododendron ferrugineum*), P47(*Salix herbacea*), P32 (suolo nudo) e P39 (*Cerastium uniflorum*) la durata del manto nevoso con spessore minore di 10 cm è di 3 giorni, mentre per P20 (*Rhododendron ferrugineum*) e P21(*Salix herbacea*) è di 2 giorni. Invece per P41(suolo nudo), G11

(*Vaccinium uliginosum*) e P31(*Loiseleuria procumbens*) è di un solo giorno. Per quanto riguarda i giorni con spessore compreso tra 10 cm e 80 cm, il valore più alto è per P47 (35 giorni), a differenza di P21 (15 giorni). Per P23 solo 9 giorni, a differenza di P20 (17 giorni). G11 ha una persistenza di tale manto nevoso di 16 giorni, P41 e P32 rispettivamente di 19 e 14, P39 di 23 giorni, P29 e P31 rispettivamente di 12 e 20 giorni. Lo spessore maggiore di 80 cm si manifesta in P47 e P21 con molta somiglianza (221 e 227 giorni rispettivamente), poi a calare tutti gli altri plot: P23 (218 giorni) e P20 (166 giorni); G11 (172 giorni); P32 (166 giorni) e P41 (214 giorni); P39 (212 giorni); P29 (175 giorni) e P31 (161 giorni).

LEGENDA	
Fon-Val	Fondovalle
Mor-Ant	Morena antica
R-G_A	Rock glacier attivo
R_G_I	Rock glacier inattivo
P_R_G_I	Piedi del rock glacier inattivo

PALINE	4	22	24	29	G19
QUOTA	2368,82	2375,22	2390,31	2495,00	2596,52
PENDENZA	11	2	6	10	14
Localizzazione	FON_VALL	FON-VAL	P_R_G_I	MOR_ANT	R_G_A
esposizione	Nord	Est	West	Est	Nord-E
esposizione (°)	360	90	270	90	45

Tabella 5.5: localizzazione geografica delle paline più significative per lo studio dello spessore della neve.

La differenza riscontrata nei giorni con spessore maggiore di 80 cm sembra attribuibile, ad una prima analisi, alla variazione della quota. Infatti la palina G19, si trova nel punto più alto del rock glacier. Ma non solo; questa si trova in una zona potenzialmente con permafrost, sulla parte attiva del rock glacier Foscagno, mentre la P24 si trova sulla morena antica. Da notare che in entrambi questi siti troviamo una vegetazione riferibile all'associazione *Salicetum herbaceae*.

Tabella 5.6: percentuali dei singoli parametri rispetto alla durata dell'innnevamento per le paline esemplificative della variazione dello spessore nevoso.

	%			durata innevamento
	<10cm	10cm<h<80cm	>80cm	
	n°giorni	n°giorni	n°giorni	n° giorni
P4	3,5	2,6	93,9	225
P22	0,9	1,7	97,4	225
P24	1,3	24,3	74,5	239
P29	4,1	6,2	89,7	195
G19	0,8	2,5	96,7	236

I risultati dei valori medi, massimi e minimi (tabella 5.4) sono stati verificati con le percentuali della durata dell'innnevamento per ogni singola palina. La P4 e la P29 hanno percentuale molto alta per spessori <10 cm, la palina P22 e la palina G19 invece, hanno una percentuale molto alta dei giorni con spessore della neve sopra gli 80 cm. Inoltre la P24, ha una percentuale molto alta dei giorni con spessore tra 10 e 80 cm. In questo punto la durata

totale del manto nevoso è comunque di 239 giorni, al contrario di quanto succede in P4 o in P22 e P29, dove la durata dell' innevamento è al di sotto dei 230 giorni.

Un altro approccio utilizzato in questo lavoro prevede il raggruppamento dei gradienti della neve in base al range altitudinale. Per questo scopo sono stati divise le misurazioni del manto nevoso dell'area: dapprima con un intervallo di quota di 25 m, e poi di 50 m (Appendice A.6). Suddividendo secondo un gradiente altitudinale è possibile apprezzare il coinvolgimento primario della morfologia del terreno nei pattern di accumulo e quindi di scioglimento del manto nevoso. Infatti come si può vedere a titolo di esempio in tabella 5.7, raggruppando i valori minimi, massimi, medi e le deviazioni standard dei campi di altitudine di 25 m, si nota una forte divergenza della deviazione standard relativa alla fine dell' innevamento, alta per range di 25 m e molto bassa per range di 50 m di quota, questa si spiega andando a vedere ciascuna palina e il tipo di morfologia sulla quale è collocata. Infatti le paline sono collocate su diverse tipologie di micro rilievi. Ad esempio per la quota compresa tra 2350 e 2375 m abbiamo le paline P1, P2, P3, P4 e P21. Tra queste la prima palina ad uscire dal manto nevoso è la P3, il giorno 166 (10 giugno 2010), che si trova alla base del rock glacier inattivo, su di un piccolo versante esposto a Sud. In questo modo è più esposta alle radiazioni solari e quindi subisce uno scioglimento più veloce rispetto ad altre paline, come ad esempio la P1, che va incontro a totale snow melt il 243 (12 luglio 2010). Questa palina è collocata alla sorgente del torrente Foscagno, e si trova in una piccola conca, che favorisce la persistenza nevosa.

<b>VALORI MEDI</b>	<b>2350- 2375</b>	<b>2375- 2400</b>	<b>2350- 2400</b>
<i>INIZIO INNEVAMENTO (numero giorno)</i>	315	315	315
<i>FINE INNEVAMENTO (numero giorno)</i>	174	175	175
<i>DURATA INNEVAMENTO (n° di gg)</i>	224	225	225
<i>Altezza MAX</i>	248	221	235
<i>Altezza MIN</i>	140	115	128
<i>Altezza MED</i>	158	130	144
<i>STAND DEV</i>	66	66	66
<i>QUOTA</i>	2362	2386	2374

<b>DEVIATIONE STANDARD</b>	<b>2350- 2375</b>	<b>2375- 2400</b>	<b>2350- 2400</b>
<i>INIZIO INNEVAMENTO (numero giorno)</i>	0	0	0,00
<i>FINE INNEVAMENTO (numero giorno)</i>	11	10	0,49
<i>DURATA INNEVAMENTO (n° di gg)</i>	11	10	0,49
<i>Altezza MAX</i>	16	41	17,59
<i>Altezza MIN</i>	60	58	1,10
<i>Altezza MED</i>	39	38	0,65
<i>STAND DEV</i>	26	21	3,80
<i>QUOTA</i>	5	7	1,72

**Tabella 5.7:** esempio di confronto del raggruppamento del range altitudinale del manto nevoso

Ancora a titolo di esempio possiamo considerare le paline P21 e P22, che subiscono scioglimento della neve lo stesso giorno, il 169 (15 giugno 2010). Queste sono collocate sul fondovalle, con inclinazione del substrato quasi nulla, e quindi soggette ai medesimi effetti delle radiazioni e della distribuzione da parte del vento. L'ultima ad uscire dalla neve al contrario è la P4, che si trova sempre nel fondovalle, ma più vicino alla pareti del M.te Sattaron rispetto ai precedenti, quindi con una minor esposizione alle radiazioni solari. Per quanto riguarda il tipo di copertura vegetale di queste paline, esse sono tutte collocate in zone di pascolo alpino, o di valletta nivale come la P21.

Un ultimo tipo di approccio può essere fatto lungo un transetto altitudinale (tab.5.8), per poter apprezzare l'effetto del micro rilievo del substrato.

PALINE	1	G15	32	G19
INIZIO INNEVAMENTO (numero giorno)	315	315	315	315
FINE INNEVAMENTO (numero giorno)	193	169	186	186
DURATA INNEVAMENTO (N° di gg)	243	219	236	236
INIZIO INNEVAMENTO (data)	1-nov-09	1-nov-09	1-nov-09	1-nov-09
FINE INNEVAMENTO (data)	12-lug-10	24-giu-10	29-giu-10	05-lug-10
Altezza MAX(cm)	250	120	190	250
Altezza MIN(cm)	10	10	10	25
Altezza MED(cm)	126	70	95	145
STAND DEV	83,04	35,44	66,50	78,27
QUOTA(m)	2356,74	2527,06	2492,00	2596,52
PENDENZA(°)	7	7	2	14

**Tabella 5.8:**  
Base dati neve per 4 paline scelte lungo un transetto altitudinale: dalla base del rock glacier inattivo fino al punto più alto del rock glacier attivo.

Infatti la P1 è quella maggiormente soggetta a innevamento, nonostante si trovi a quota inferiore. La vegetazione in questo punto corrisponde ai primi stadi dell'associazione di valletta nivale, il *Salicetum herbaceae*. Un'altra prova è fornita dalla palina G15, in questo punto, la neve scioglie molto precocemente. Qui troviamo un tipo di copertura vegetale attribuibile all'*Oxirietum dyginae* in transizione a *Luzuletum spadiceae*. La palina G15 si trova sulla parte frontale del rock glacier attivo, in cima al fronte principale. E' soggetta a una insolazione notevole e allo stesso tempo molto esposta ai venti. G19, come già detto è collocata sul punto più alto del rock glacier, la vegetazione in questo punto è di nuovo attribuibile al *Salicetum herbaceae*; il suolo nudo di P32 è situato su un lobo laterale, sulla sinistra idrografica del rock glacier, in cima al fronte principale. La granulometria superficiale presenta blocchi angolari di piccole e medie dimensioni con assenza di copertura lichenica.

### 5.b. B.T.S, DISTRIBUZIONE DEL PERMAFROST

Sono state fatte 40 misure in prossimità di alcune paline (tabella 5.9). Sfortunatamente per disguidi tecnici e costrizioni logistiche non è stato possibile farlo su tutti i 69 punti in questione. I risultati del BTS fatto durante questa primavera sul rock glacier Foscagno, sono indicati sulla cartina di figura 5.2 e riassunti in tabella 5.9.

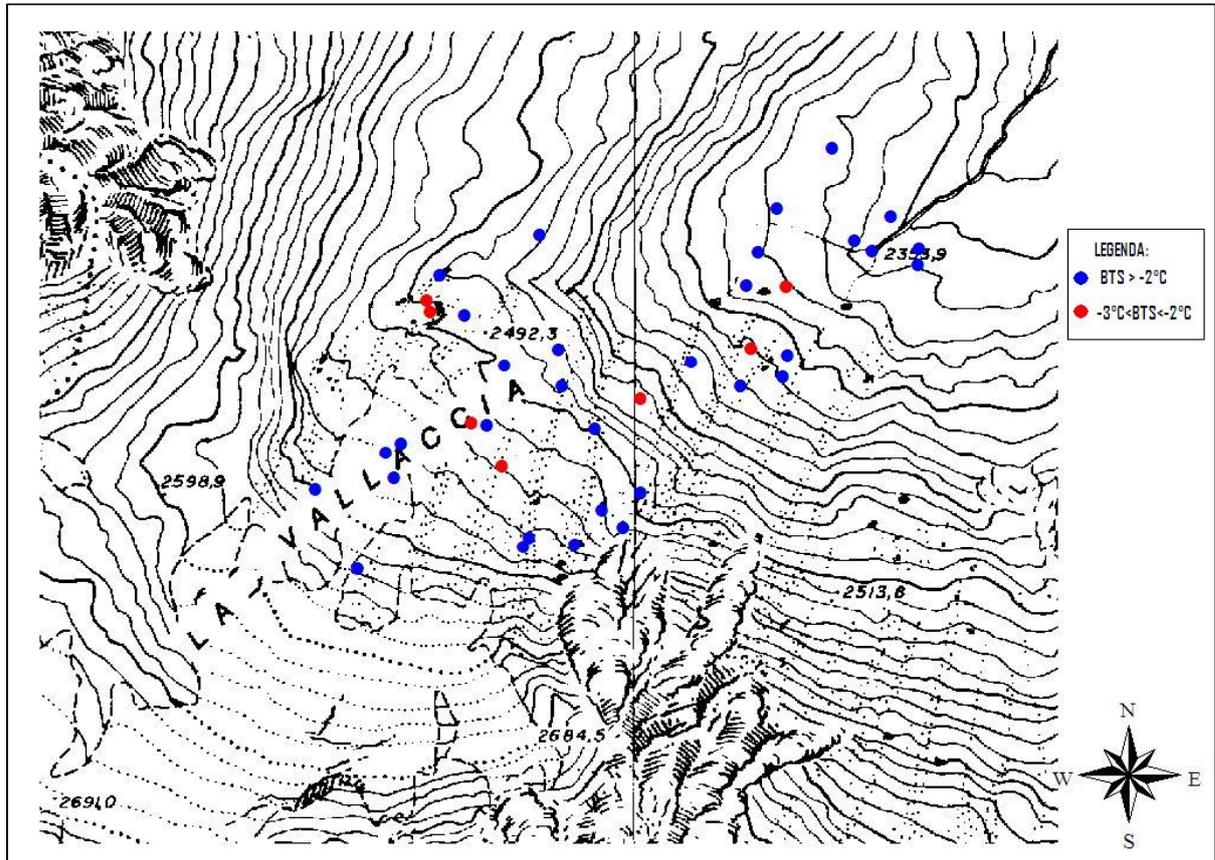


Figura 5.2: distribuzione del permafrost sul rock glacier Foscagno secondo i valori di BTS.

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
<b>h neve (cm)</b>	200	215	200	230	200	210	200	160	120	150
<b>t suolo (°C)</b>	0	0	0	0,1	-1,3	-1,4	-1,3	-2,9	-1,5	-0,3

P11	P12	P13	P14	P15	P16	P18	P19	P21	P22	P23
90	220	200	230	210	200	130	190	190	190	190
0,3	-1	-0,5	-0,2	-1,8	-1	0	0	-0,1	0	-1,6

P24	P25	P32	P36	P38	P39	G1	G2	G3	G4	G6
100	230	150	155	190	210	150	100	160	200	90
-1,8	0	-0,6	-1,7	-2,6	-1,7	-0,6	-0,7	-1,9	0	-0,4

G7	G8	G11	G12	G13	G14	G15	G20
200	220	150	200	80	80	60	190
-1,4	-0,3	-2,2	-1,9	-1,3	-2,4	0	-2,1

Tabella 5.9: valori di BTS misurati durante quest'inverno sul rock glacier Foscagno (marzo 2010)

Queste misure possono essere confrontate con altre misure svolte in anni precedenti, dove i valori di BTS indicavano una distribuzione del permafrost nella porzione frontale della sua parte attiva, ai piedi delle falde detritiche che circondano lo stesso rock glacier (Guglielmin & Tellini, 1992-1993).

In aggiunta a questo dai dati raccolti, sembrerebbe confermarsi un'altra ipotesi (Guglielmin & Tellini, 1995), secondo la quale il permafrost è localizzato nella valle anche nella parte inattiva del rock glacier posta tra i 2370 e i 2480 m di quota.

## 5.c. DATA LOGGERS

Per questo lavoro sono stati analizzati i dati riferiti a 12 data loggers, installati rispettivamente a 2 e 10 cm nei seguenti punti: P20, P21, P23, P27, P29, P31, P32, P39, P41, P47, G11, G17 (tabella 4.2).

### 5.c.1. Regime termico del suolo a 2 cm e a 10 cm.

	2 cm	10 cm
<i>Aria</i>	-0,9	-0,9
<i>Suolo nudo P41</i>	0,1	-0,2
<i>Suolo nudo P32</i>	2,4	2,1
<i>Vaccinium ulig. G11</i>	2,4	2,5
<i>Vaccinium ulig. P27</i>	3,1	3,1
<i>Cerastium unif. G17</i>	1,1	0,9
<i>Cerastium unif. P39</i>	1,4	1,1
<i>Rhododendron ferr. P20</i>	3,2	3,0
<i>Rhododendron ferr. P23</i>	2,8	2,8
<i>Carex curvula P29</i>	2,7	2,7
<i>Loiseleuria proc. P31</i>	2,8	2,4
<i>Salix herbacea P21</i>	2,4	2,4
<i>Salix herbacea P47</i>	1,4	1,4

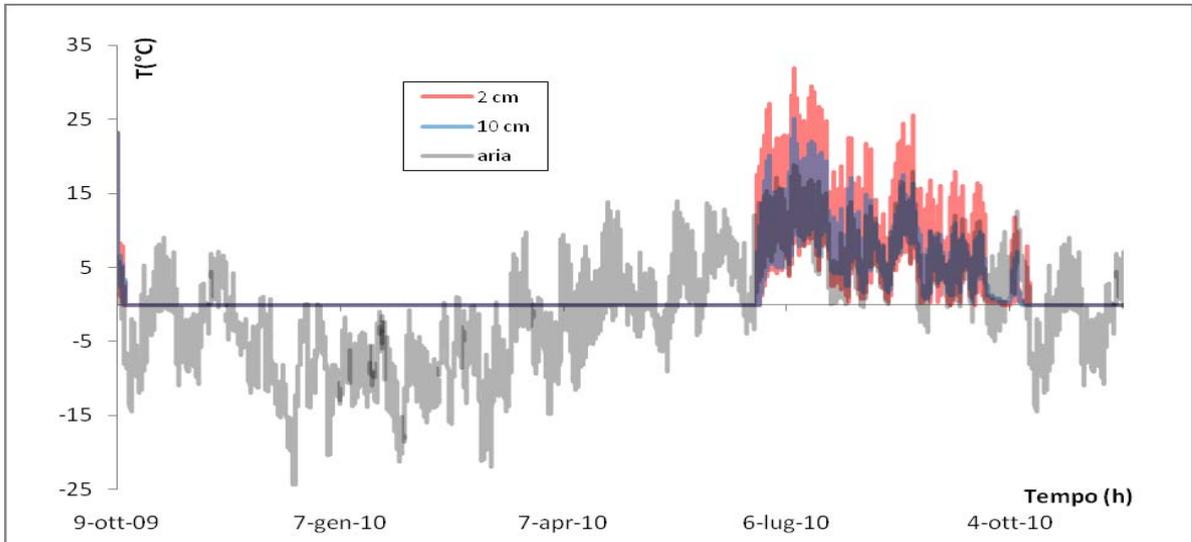
**Tabella 5.10:** confronto delle temperature medie (°C) dell'aria e del suolo a livello di 2 e 10 cm.

Un tipo di approccio è stato quello di ordinare i valori raccolti dai data loggers, all'interno dell'anno idrologico 2009-2010, facendo un confronto tra le temperature dell'aria e le temperature orarie raccolte a 2 e 10 cm. Il regime termico superficiale (GST; *Ground Surface Temperature*) permette di caratterizzare la vegetazione e il tipo di suolo (figura 5.3, figura 5.4).

Confrontando i valori di temperatura media dell'aria, con quelli della temperatura media del suolo, notiamo una forte differenza. La temperatura dell'aria è sempre minore rispetto a tutti i suoli considerati (tabella 5.10). In particolare confrontando la temperatura media dell'aria con

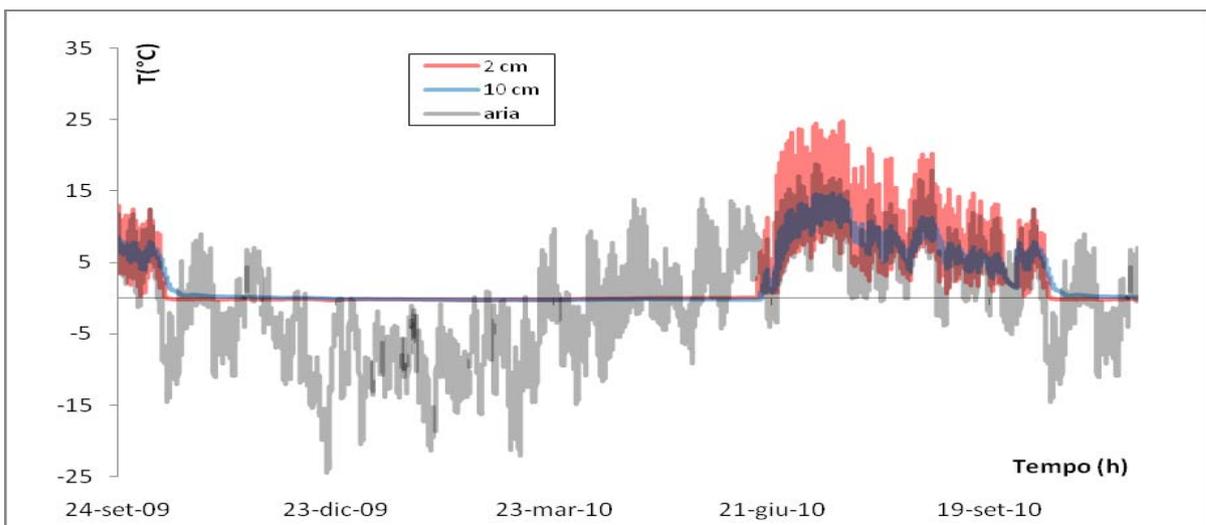
quella del suolo nudo, essa è meno positiva, in particolare in P41, dove la temperatura media del suolo risulta essere 0,1°C a 2 cm, e -0,2°C a 10 cm. Questo tipo di suolo si differenzia da quello di P32, ad esempio, dove infatti il regime termico, oltre ad essere attorno ai 2°C, a 10 cm è quasi uguale a 2 e 10 cm (differenza di 0,3°C). Confrontando invece il suolo nudo rispetto ai diversi tipi di vegetazione, vediamo che in P32 il regime termico è superiore di alcuni tipi di vegetazione, sia a 2 che 10 cm. Anche tra i valori medi dei diversi tipi di

vegetazione possiamo vedere che non vi è forte differenza tra i 2 e 10 cm, tuttavia questa si vede tra i diversi tipi di vegetazione. Ad una prima analisi il regime termico sia a 2 che 10 cm, è maggiore per le vegetazioni arbustive, anche ad arbusti nani come la *Loiseleuria procumbens*, o il *Salix herbacea* di P21. Il *Salice nano* tuttavia in P47, presenta valori molto bassi simili a quelli di *Cerastium uniflorum*.



**Figura 5.3:** confronto del GST a 2cm e a 10 cm di profondità (P32\_suolo nudo)

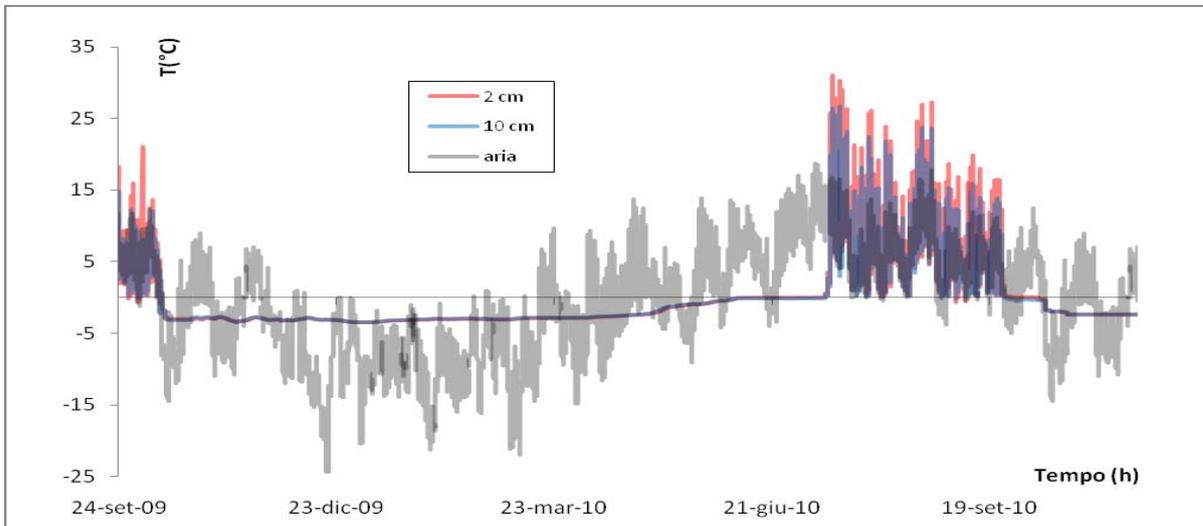
La temperatura nel periodo invernale resta prossima agli 0°C in assenza di permafrost, mentre scende fino a circa -5°C in presenza di suolo molto probabilmente gelato (figura 5.5).



**Figura 5.4:** confronto del GST a 2 cm e a 10 cm di profondità (P31 *Loiseleuria*)

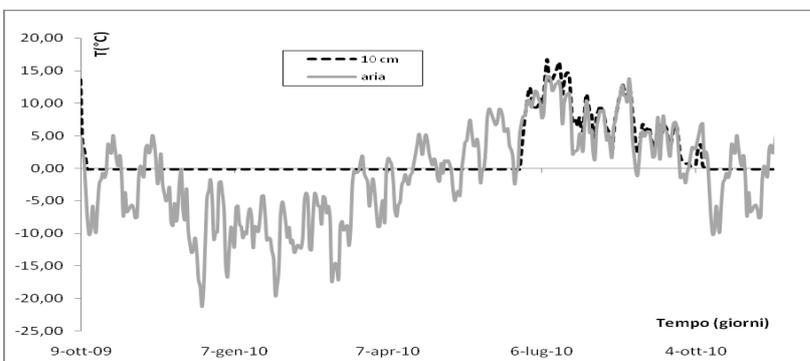
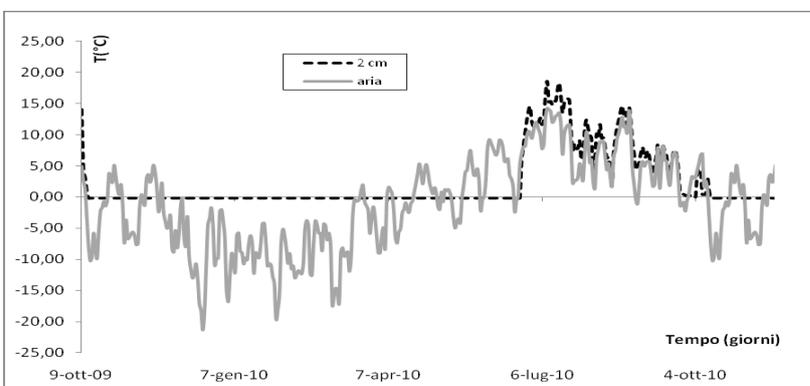
L'ampiezza delle variazioni di GST in presenza di suolo nudo sono maggiori rispetto a quelle in presenza di copertura vegetale, sia a 2 cm che 10 cm (figura 5.4 e 5.5). Nel secondo caso

ciò che conta è soprattutto la morfologia della specie presa in considerazione (figura 5.7). In particolare in P41 e P32, durante il periodo estivo, la temperatura del suolo a 2 cm raggiunge valori massimi di 30°C, mentre in P31 raggiunge un massimo di 26°C.



**Figura 5.5:** confronto del GST a 2 cm e a 10 cm di profondità (P41 suolo nudo)

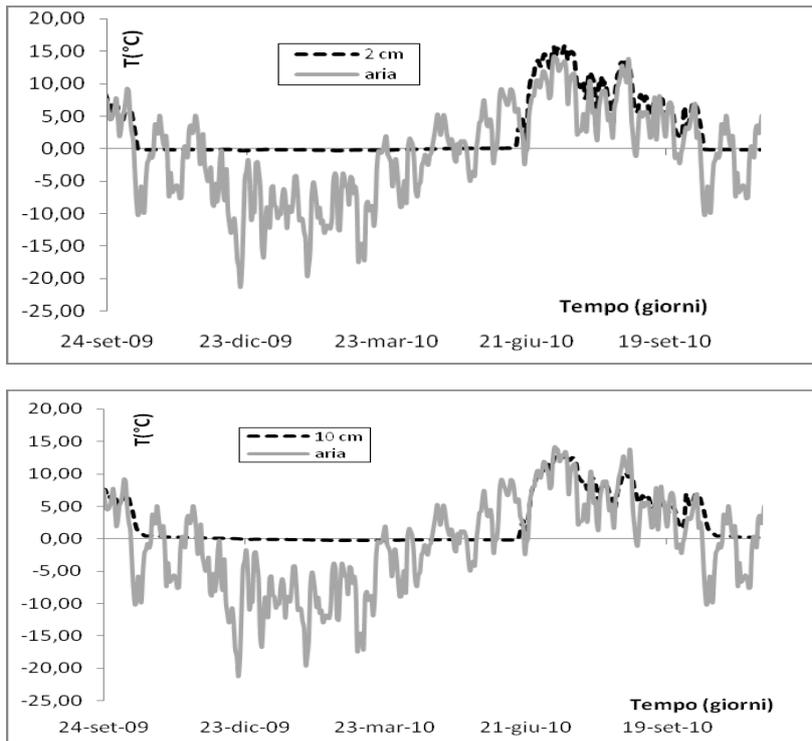
Se confrontiamo due siti con suolo nudo e uno completamente ricoperto di *Loiseleuria procumbens* notiamo che, in entrambi i casi, le variazioni di temperatura al livello di 2 cm, sono maggiori rispetto alle variazioni di temperatura al livello di 10 cm (figura 5.6.A e figura



**Figura 5.6A:** confronto dell'andamento della temperatura media giornaliera a 2cm e 10 cm in corrispondenza di suolo nudo (P32).

5.6.B). Mentre nel periodo invernale, ad entrambi i livelli si può vedere come il suolo non subisce nessuno scambio termico, e l'isolamento della neve fa sì che la temperatura rimanga costante, e alla stessa temperatura sia a 2 che 10 cm.

Confrontando gli andamenti delle temperature a 2 e 10 cm, con quelli dell'aria, notiamo una forte



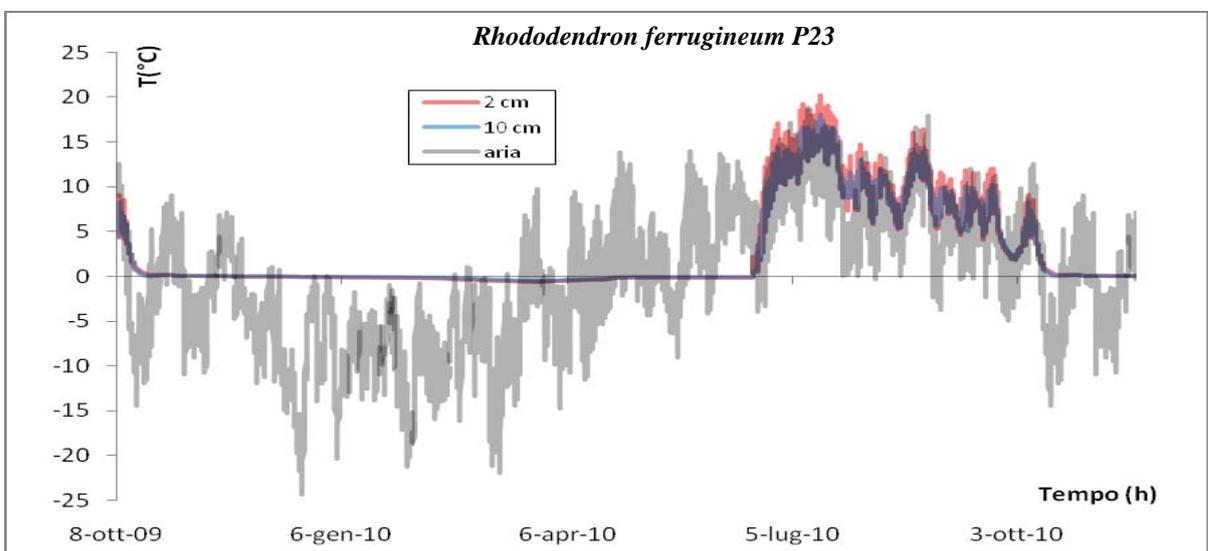
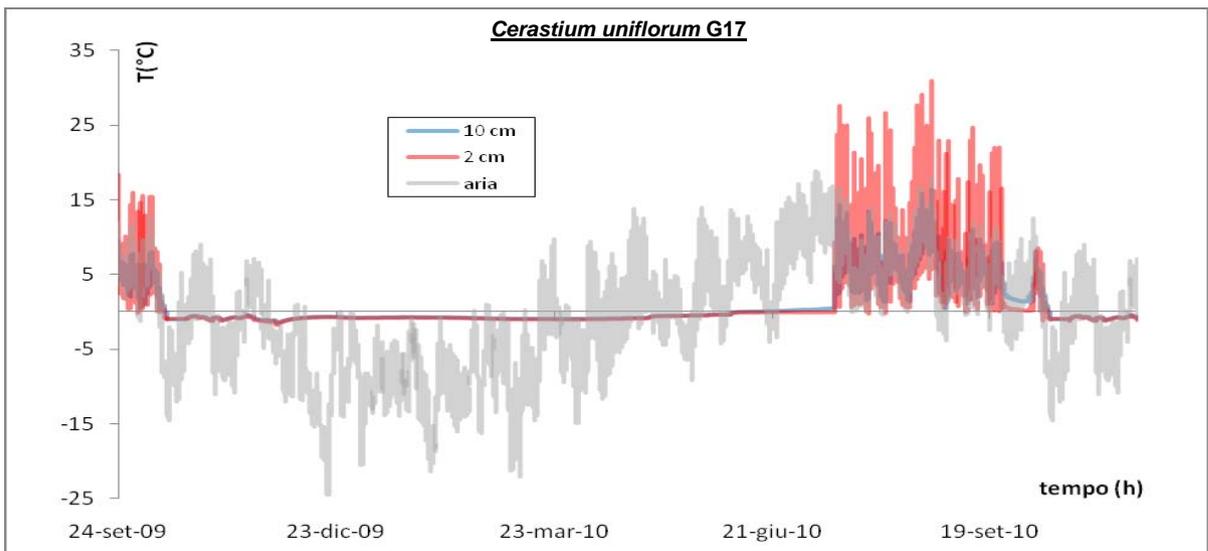
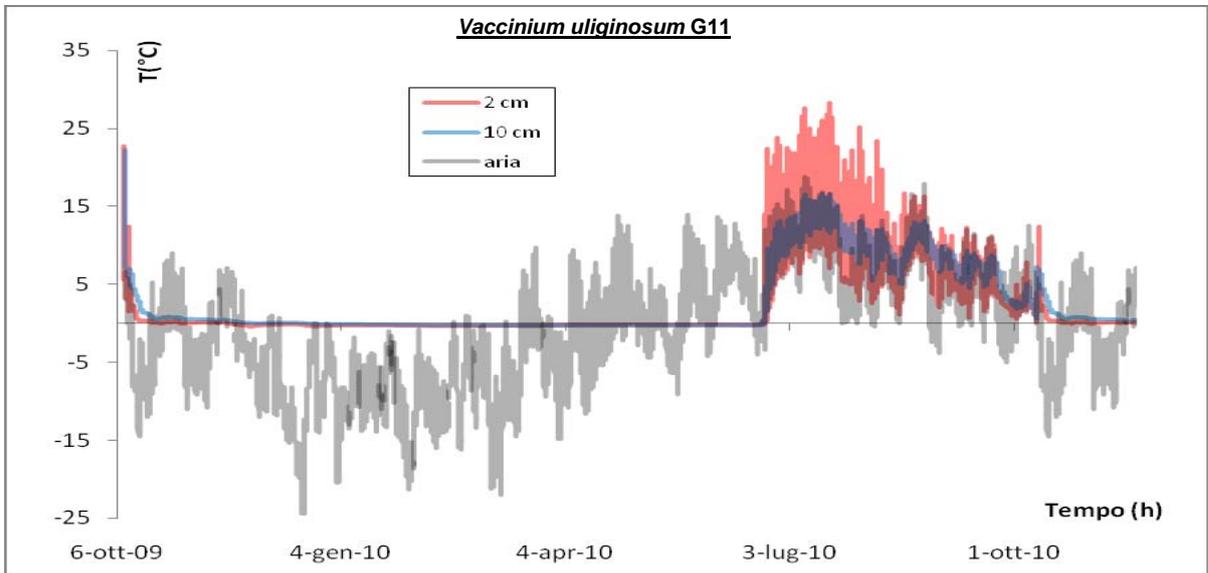
**Figura 5.6 B:** confronto dell'andamento della temperatura media giornaliera a 2 cm e 10 cm in presenza di *Loiseleuria procumbens* P31.

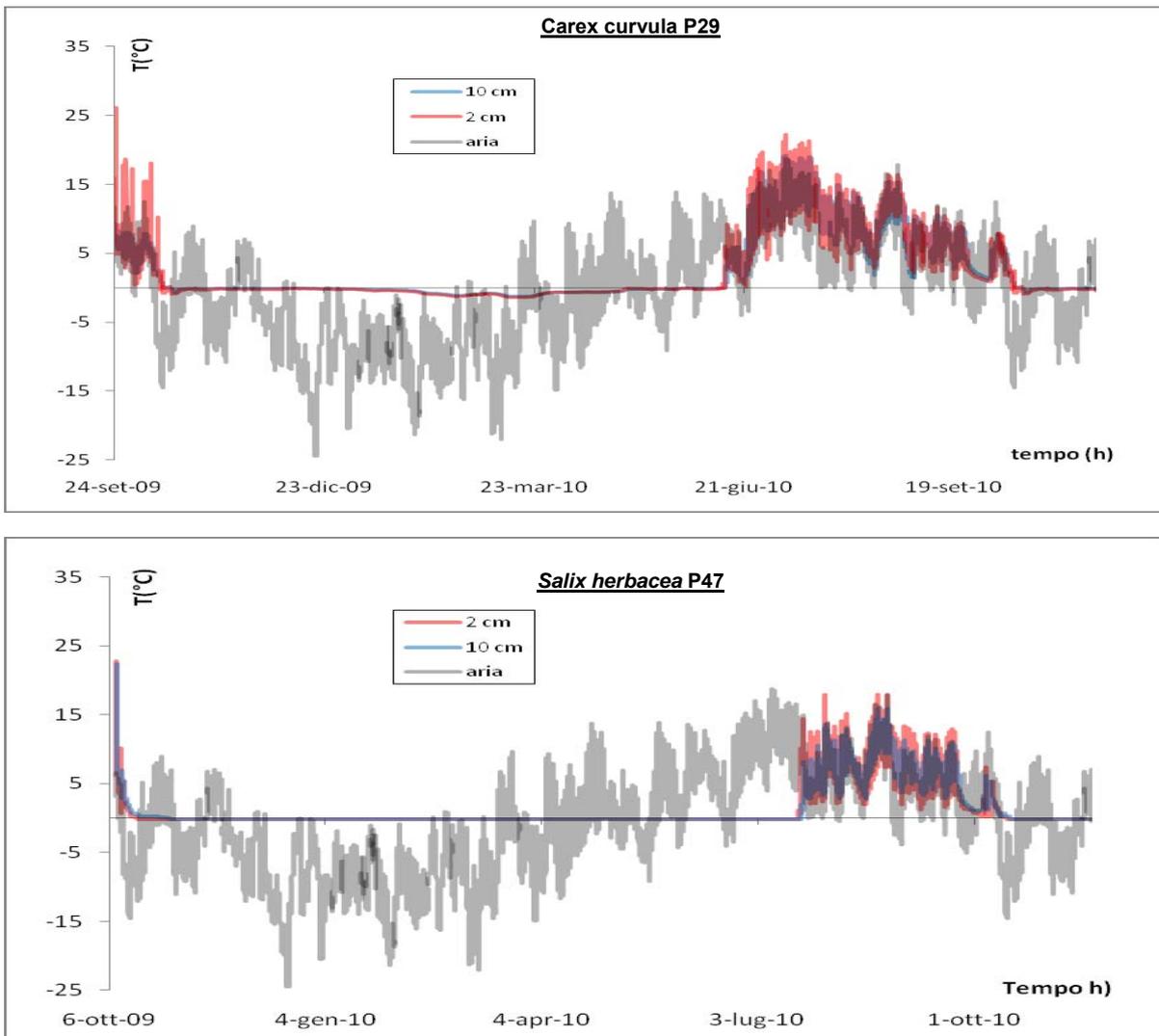
correlazione, ma al contrario di quanto ci si potrebbe aspettare, durante il periodo estivo, le variazioni di temperatura dell'aria sono minori rispetto a quelle della temperatura del suolo. Il calore che viene assorbito in superficie impiega un certo tempo per raggiungere il livello di 10 cm, e quello che si vede, è che questo fenomeno diventa più manifesto laddove la vegetazione ha una copertura densa, causando un decremento della temperatura a 2 cm più rapido rispetto ai 10 cm, soprattutto con l'incombere delle prime nevicate autunnali. Questo fenomeno è ben evidente in figura 5.4 e 5.7, in presenza rispettivamente di *Loiseleuria procumbens* e *Carex curvula*.

### 5.c.2. Confronto del GST tra suolo nudo e i diversi tipi di vegetazione

I diversi tipi di vegetazione hanno un impatto notevole sul bilancio termico del suolo, soprattutto nella fascia superficiale dei 2 cm. L'effetto di isolamento della vegetazione si può benissimo vedere confrontando i grafici orari dell'andamento della temperatura di figura 5.3, 5.4 e 5.5. Nel caso di suolo nudo P41 o P32 si può apprezzare un ampio range di variazioni giornaliere, in particolare a 2 cm (max 30,9°C e min -3,5°C per P41; max 31,9°C e min -0,16°C per P32); al contrario per *Loiseleuria procumbens*, già a 2 cm, abbiamo minori variazioni (max 24,8°C e min -0,35°C). Per approfondire questo fenomeno sono stati studiati altri tipi di vegetazione, i quali grafici vengono proposti di seguito: *Vaccinium uliginosum*, *Cerastium uniflorum*, *Rhododendron ferrugineum*, *Carex curvula* e *Salix herbacea*. In generale il *Rhododendron ferrugineum* risulta essere la specie che ha il maggior buffering effect sul suolo (figura 5.6). Questo si osserva anche tra le temperature medie in tabella 5.10,

qui infatti in presenza di *Rhod. ferr.* la temperatura media del suolo è di circa 3°C, sia a 2 che 10 cm per entrambi gli individui considerati. Un'altra vegetazione che sembra avere un affetto tampone molto elevato è il *Vaccinium uliginosum*, ed in modo più modesto il *Salix herbacea*





**Figura 5.7:** confronto del GST a 2 cm e a 10 cm: G11\_Vaccinium uliginosum; G17\_Cerastium uniflorum; P23\_Rhododendron ferrugineum; P29\_Carex curvula; P47\_Salix herbacea.

sebbene confrontando i grafici si vede già una tendenza alla diminuzione di questo effetto, probabilmente dovuta alla minore densità fogliare. Questo effetto tende a diminuire con specie erbacee quali il *Carex curvula* o il *Cerastium uniflorum*, che hanno invece minor effetto di isolamento.

In presenza di *Salix herbacea*, P47 (figura 5.7), le variazioni di temperatura sono minori a livello di 2 cm rispetto ad altre coperture vegetali e con un'ampiezza molto simile a quelle a 10 cm di profondità. Questo sarebbe attribuibile al tipo di legame della vegetazione rispetto al substrato, in quanto il *Salix herbacea*, è la specie che rappresenta l'associazione di valletta nivale sul substrato siliceo. Qui arrivano meno radiazioni solari e vi è un accumulo maggiore della neve e dell'acqua. In queste condizioni il suolo e quindi le piante di questa associazione sono soggette a minori variazioni di temperatura, che sembrerebbero essere attribuibili solo

alle variazioni della temperatura dell'aria. Possiamo infatti vedere dal grafico come le oscillazioni della temperatura dell'aria e del suolo, sia a 2 che 10 cm, sono molto simili.

Invece, in presenza di *Rhododendron ferrugineum* (figura 5.7) le oscillazioni della temperatura del suolo, sono molto ristrette rispetto alle variazioni della temperatura dell'aria, e in particolare rimangono sempre a valori più alti rispetto alla temperatura dell'aria, denotando la capacità di questo tipo di vegetazione di isolare la superficie del suolo.

Un altro caso particolare può essere quello in presenza di *Cerastium uniflorum* G17 (figura 5.7) e *Carex curvula* (5.7), dove possiamo vedere delle oscillazioni molto alte a livello di 2 cm, paragonabili a quelle in presenza di suolo nudo (figura 5.5).

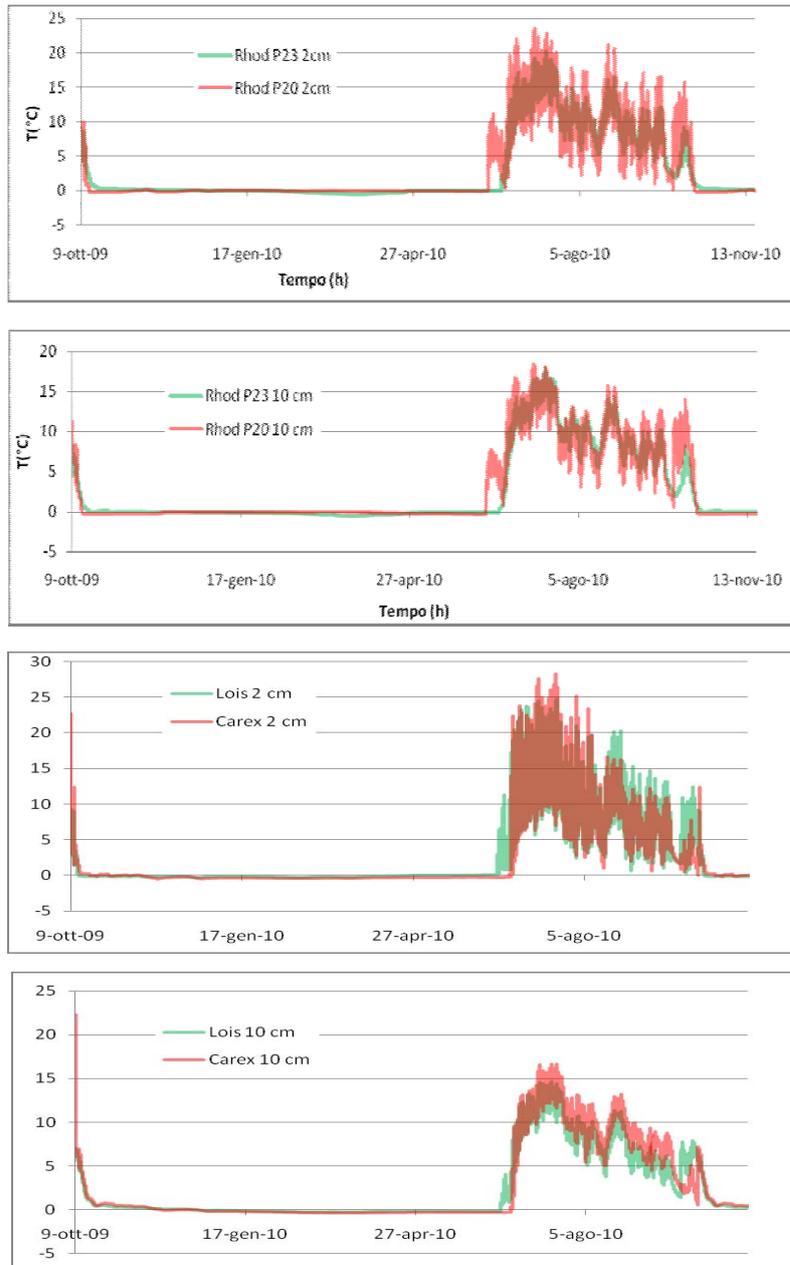
Laddove il suolo viene coperto da *Vaccinium uliginosum* sembra che le oscillazioni giornaliere di temperatura siano molto simili a quelle di *Rhododendron ferrugineum*. Tuttavia rispetto a quest'ultimo presenta temperature minime più basse. Sicuramente il tipo di copertura offerto dalla densità fogliare nei due casi risulta essere maggiore a favore del *Rhododendron ferrugineum*.

Si può notare come, la palina P47 (*Salix herbacea*) si trovi localizzata in una depressione, inclinazione 0°, sul corpo del rock glacier attivo; il suolo presenta una granulometria media, con una matrice sabbioso-ghiaiosa e clasti grossolani immersi. La palina G11 (*Vaccinium uliginosum*) si trova sul rock glacier inattivo, esposizione N-NE, inclinazione 10°, il suolo è ben sviluppato e la granulometria è sabbiosa, con grossi blocchi sparsi. La palina P23 (*Rhododendron ferrugineum*) si trova su una ruga terminale del rock glacier inattivo, la matrice è ghiaiosa con clasti grossolani, l'inclinazione è minima (2°), esposizione Est. La P29 (*Carex curvula*) è situata sul versante della morena antica, con esposizione E-SE, substrato con granulometria fine e un suolo ben sviluppato.

Infine in figura 5.7 (*Cerastium uniflorum*) possiamo vedere, nel mese di settembre, un altro fenomeno chiamato “Zero Curtain Effect” (Outcalt *et al.*, 1990), molto probabilmente attribuibile ad una nevicata. L'energia della radiazione viene completamente dissipata in fase di scioglimento della neve mantenendo il suolo a temperatura di 0°C. E' interessante notare che l'effetto *curtain* è più manifesto all'altezza di 2 cm, mentre a 10 cm non scende fino a 0°C; inoltre nello stesso periodo per tutti gli altri punti in questione la temperatura, seppur abbassandosi notevolmente, non arriva a 0°C.

Per approfondire lo studio della densità fogliare rispetto al *buffering effect*, sono stati confrontati i trend di temperatura del suolo a 2 e 10 cm per due tipi di vegetazione uguali (*Rhododendron f.* P20 e P23) (figura 5.8). Supponendo che, essendo della stessa specie, abbiamo densità fogliare simile, P20 presenta uno spessore maggiore della vegetazione, ma

non effettua un maggior effetto tampone sulla temperatura del suolo. (tabella 5.11 e figura



**Figura 5.8:** confronto delle temperature a 2 e a 10 cm di profondità tra individui appartenenti alla stessa specie (*Rhododendron f.*) o tra individui appartenenti ad habitat simili (*Loiseleuria* e *Carex c.*).

posizioni diversamente regolate dal fattore vento (figura 5.8). In particolare P31, collocata in cima alla morena antica, è molto soggetta a forti venti e quindi va incontro ad uno *snowmelt* anticipato, confermando la presenza di questo tipo di vegetazione in questo particolare habitat delle creste ventose.

6.3). Questa differenza tuttavia esalta l'importanza delle radiazioni solari nel bilancio energetico del suolo, infatti può essere spiegata nella localizzazione del P20, il quale si trova sul versante della morena antica al contrario di P23 che si trova nel fondovalle. Per questo motivo P20 è sottoposto a maggior radiazioni solari.

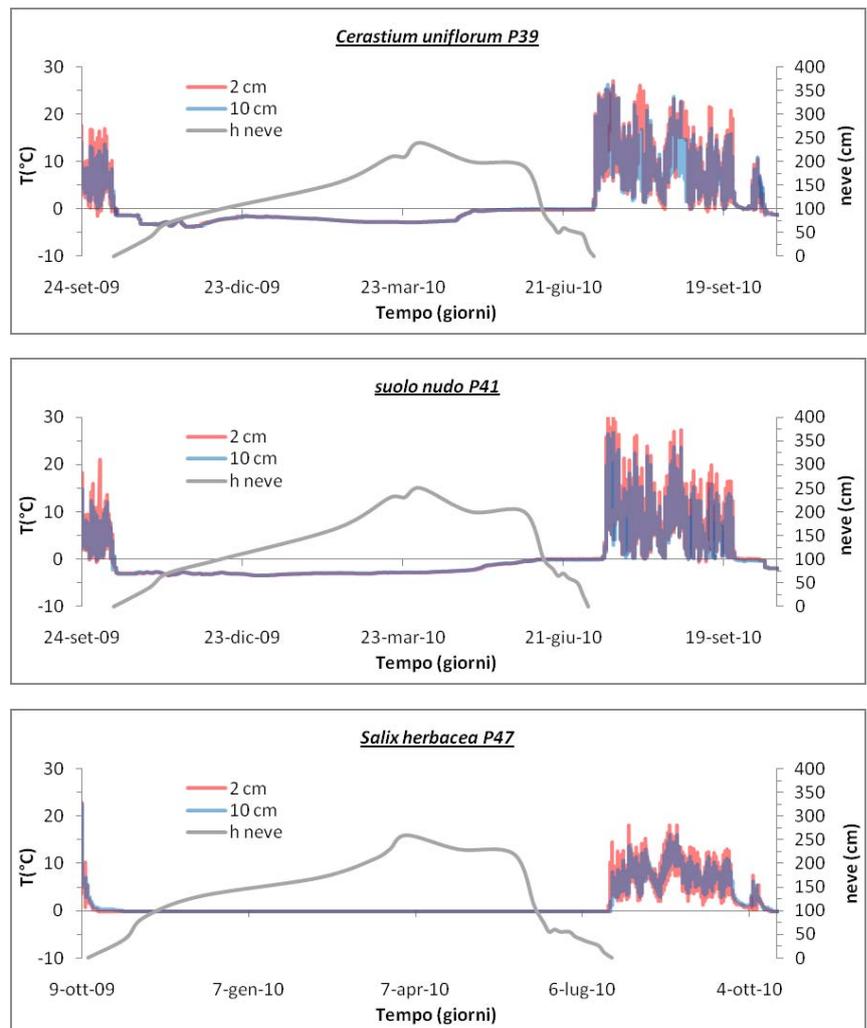
Lo scioglimento totale della neve segna anche l'inizio della stagione vegetativa, e dipende fortemente dal micro rilievo oltre che dai fattori climatici. Ad esempio P23 e P20 hanno avuto (figura 6.4) una diversa fase di scioglimento del manto nevoso ma anche P31 e P29, che si trovano in

### 5.c.3. Confronto con il periodo d'innevamento

Durante il periodo invernale la temperatura del suolo, rimane costante, più o meno vicino a 0°C, in base alla presenza o assenza di permafrost. Quando il manto nevoso diventa abbastanza spesso, svolge un ruolo di strato coibente, *buffering effect*, isolando la superficie del suolo da qualsiasi possibile scambio di calore con l'atmosfera (Guglielmin *et al.*, 2002; Guglielmin, 2005). L'innalzamento dal livello invernale della temperatura del suolo avviene, non in corrispondenza dell'innalzamento della temperatura dell'aria, lasciando presumere, che anche minime coperture nevose, siano ancora causa di isolamento (figure 5.3-5.4-5.5-5.6-5.7).

Il raffreddamento del suolo, con le prime nevicate e l'inizio della copertura nevosa avviene con un gradiente più leggero rispetto al riscaldamento primaverile/estivo. Questo però varia, in base al tipo di substrato e di vegetazione.

Confrontando la temperatura del suolo con quella del manto nevoso, e sommandoli con le conoscenze acquisite dal calcolo del numero di giorni con spessore >80 cm, tra 10 e 80 cm, <10 cm, si è visto che fino a quando la neve mantiene una copertura maggiore ai 10 cm, funziona da strato isolante (fig. 5.9). Inoltre il manto nevoso influenza la lunghezza della stagione vegetativa. A



**Figura 5.9:** confronto dell'andamento di GST a 2 e 10 cm e manto nevoso nel periodo da ottobre 2009 fino a ottobre 2010.

titolo di esempio possiamo confrontare P47 e P39 di figura 5.8. Il *Salice nano* infatti ha a disposizione un periodo vegetativo sicuramente più limitato rispetto al *Cerastium uniflorum*. Possiamo anche osservare tra questi 3 esempi che l'accumulo massimo di neve è stato riscontrato proprio in P47, nel mese di Aprile. Quindi anche l'altezza del manto nevoso è indirettamente legata al periodo vegetativo delle diverse specie.

#### 5.c.4. TDD (Thawing Degree Days), FDD (Freezing Degree Days) e GDD (Growing Degree Days)

	GST	GST	GST	Δ GST	GST	TDD	FDD	GDD	n-factor	n-factor	n-factor	spessore
	medio	min	max		DEV ST				TDD	FDD	GDD	vegetazione <sup>A</sup> (cm)
<i>Aria</i>	-0,9	14,2	-21,3	35,5	7,5	981,2	-1311,0	777,9				
<i>Suolo nudo P41</i>	0,1	-3,5	17,7	21,2	5,0	661,8	-636,0	617,9	0,7	0,5	0,8	
<i>Suolo nudo P32</i>	2,4	-0,2	18,6	18,7	4,8	931,8	-40,8	875,1	0,9	0,0	1,4	
<i>Vaccinium ulig. G11</i>	2,4	-1,5	15,9	17,4	4,8	1006,3	-131,8	913,7	1,0	0,1	1,0	13,0
<i>Vaccinium ulig. P27</i>	3,1	-0,2	19,0	19,2	5,5	1165,5	-40,5	1130,4	1,2	0,0	1,2	4,5
<i>Cerastium unif. G17</i>	1,1	-1,6	15,4	17,0	3,8	592,0	-185,3	546,8	0,6	0,1	0,5	2,5
<i>Cerastium unif. P39</i>	1,4	-3,0	20,8	23,8	5,7	903,2	-407,0	859,1	0,9	0,3	1,6	2,5
<i>Rhododendron ferr. P20</i>	3,2	-0,2	17,0	17,2	5,0	1184,4	-8,3	1139,3	1,2	0,0	1,3	47,0
<i>Rhododendron ferr. P23</i>	2,8	-0,5	16,2	16,7	4,8	1125,4	-40,1	1071,1	1,1	0,0	0,9	33,0
<i>Carex curvula P29</i>	2,7	-0,5	17,0	17,5	4,9	1029,1	-63,1	961,7	1,0	0,0	0,9	14,0
<i>Loiseleuria proc. P31</i>	2,8	-0,4	15,9	16,3	4,8	1061,0	-45,8	993,7	1,1	0,0	1,0	4,0
<i>Salix herbacea P21</i>	2,4	-0,1	14,3	14,3	4,2	875,1	-4,1	797,5	0,9	0,0	0,8	3,8
<i>Salix herbacea P47</i>	1,4	-0,2	12,6	12,7	3,2	537,2	-49,2	484,3	0,5	0,0	0,5	3,0

	GST	GST	GST	Δ GST	GST	TDD	FDD	GDD	n-factor	n-factor	n-factor	spessore
	medio	min	max		DEV ST				TDD	FDD	GDD	vegetazione (cm)
<i>Aria</i>	-0,9	14,2	-21,3	35,5	7,5	981,2	-1311,0	777,9				
<i>Suolo nudo P41</i>	-0,2	-3,5	16,1	19,6	4,4	555,8	-714,4	502,4	0,6	0,5	0,6	
<i>Suolo nudo P32</i>	2,1	-0,2	16,8	17,0	4,2	813,2	-45,9	730,7	0,8	0,0	0,9	
<i>Vaccinium ulig. G11</i>	2,5	-1,3	15,5	16,8	4,7	999,7	-102,3	910,1	1,0	0,1	1,2	13
<i>Vaccinium ulig. P27</i>	3,1	-0,2	17,9	18,0	5,4	1179,1	-39,7	1152,0	1,2	0,0	1,5	4,5
<i>Cerastium unif. G17</i>	0,9	-1,5	11,8	13,3	3,0	493,1	-176,1	370,8	0,5	0,1	0,5	2,5
<i>Cerastium unif. P39</i>	1,1	-3,5	17,4	20,9	5,0	790,8	-404,6	750,5	0,8	0,3	1,0	2,5
<i>Rhododendron ferr. P20</i>	3,0	-0,3	15,6	15,9	4,7	1100,4	-21,9	1033,4	1,1	0,0	1,3	47,0
<i>Rhododendron ferr. P23</i>	2,8	-0,5	16,2	16,7	4,8	1056,8	-33,2	1006,0	1,1	0,0	1,3	33,0
<i>Carex curvula P29</i>	2,7	-0,3	14,6	15,0	4,5	1028,2	-47,9	934,9	1,0	0,0	1,2	14,0
<i>Loiseleuria proc. P31</i>	2,4	-0,3	13,1	13,3	4,0	920,6	-29,7	806,8	0,9	0,0	1,0	4,0
<i>Salix herbacea P21</i>	2,4	0,1	12,5	12,4	3,8	888,9	0,0	737,1	0,9	0,0	0,9	3,8
<i>Salix herbacea P47</i>	1,4	-0,2	12,6	12,8	3,1	540,2	-49,1	474,6	0,6	0,0	0,6	3,0

B

**Tabella 5.11:** Temperatura dell'aria, GST, FDD, TDD, GDD e calcolo dell'n factor in diverse condizioni durante l'anno idrologico da 1 dicembre 2009 fino al 30 novembre 2010 (2cm-A; 10 cm-B).

Come si può vedere in tabella 5.11, c'è una forte correlazione tra il tipo di copertura vegetale e gli indici FDD, TDD e anche GDD.

La temperatura media dell'aria durante l'anno in studio è stata di  $-0,9^{\circ}\text{C}$ . Un valore molto simile si incontra in presenza di suolo nudo P41, con valori più bassi in corrispondenza di 10 cm. Questo basso valore potrebbe essere dato dalla presenza di permafrost, infatti l'altro caso di suolo nudo, P32, presenta temperature medie annue del suolo molto più simili alle temperature in presenza della vegetazione.

Come si poteva vedere anche guardando i grafici di figura 5.7, i range di variazione della temperatura del suolo,  $\Delta\text{GST}$ , sono più bassi nel caso dei 10 cm, rispetto ai 2 cm dell'ordine di  $1^{\circ}\text{C}$ , o al massimo di  $3^{\circ}\text{C}$ .

Per quanto riguarda i valori di FDD, essi sono molto bassi sempre nella palina P41, sia a 2 che 10 cm, se confrontati con i valori in presenza di vegetazione degli altri siti, confermando il *buffering effect* della vegetazione sul suolo (Guglielmin, Evans & Cannone, 2005; Cannone & Guglielmin, 2009).

Come si vedeva anche con i grafici dei data loggers, in presenza di *Cerastium uniflorum*, in particolare per P39, si hanno degli alti valori di FDD e di conseguenza di *n-factor*, sia a 2 che 10 cm.

*Salix herbacea*, presenta invece dei valori molto bassi, soprattutto in P47; molto simili a suolo nudo di P32. Confrontato ad esempio col *Rhododendron ferrugineum*, si può vedere come questa forte differenza potrebbe essere dovuta allo spessore della vegetazione.

Dall'analisi dei GDD invece, possiamo vedere che la temperatura dell'aria presenta dei GDD minori rispetto alla temperatura del suolo, in tutti i punti tranne il suolo nudo P41 ai 2 cm, e nella maggior parte dei *plot* ai 10 cm.

Confrontando diverse specie possiamo vedere ulteriormente la particolarità di *Salix herbacea* P47, che presenta dei valori molto bassi di GDD rispetto alle altre specie, come ad esempio il *Rhododendron ferrugineum* o il *Vaccinium uliginosum*, o semplicemente l'altro individuo di *Salix h.* preso in esame (P21).

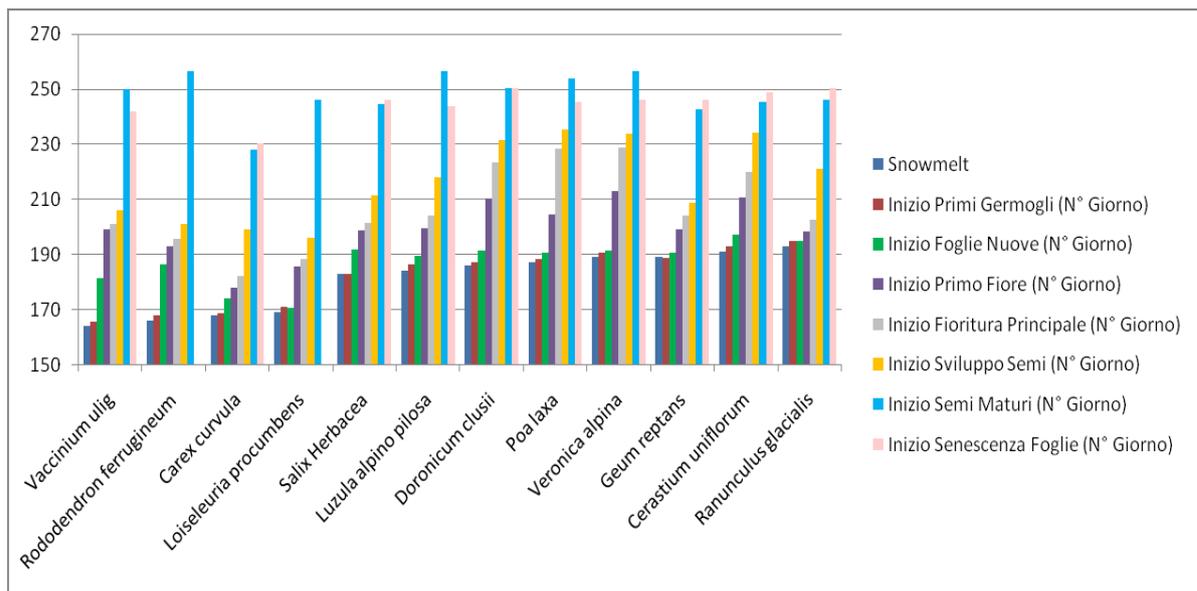
Prendendo in esame due coperture della stessa specie, ad esempio P23 e P20 (*Rhododendron f.*), essi mostrano invece *n-factor* uguali sia per FDD, che TDD e GDD. Tuttavia questo fenomeno sembra essere legato solo a questo tipo di vegetazione, infatti in presenza di *Salix herbacea*, P21 che ha uno spessore maggiore di quasi 1 cm, presenta *n-factor* più alto sia per TDD che GDD rispetto a P47. Anche per *Vaccinium uliginosum* succede che dove la vegetazione è più alta *n-factor* TDD e GDD sono più alti. Solo per *Cerastium uniflorum* non è

lo spessore della vegetazione il fattore predominante, dunque bisogna pensare che sia legato ai fattori abiotici.

Confrontando invece diversi tipi di specie con lo stesso spessore di vegetazione, come ad esempio P21 e P31, o G11 e P23 gli *n-factor* relativi a GDD e TDD sono molto simili, lasciando intendere lo stretto legame di questi fattori, e di conseguenza del GST, con il grado di copertura vegetale.

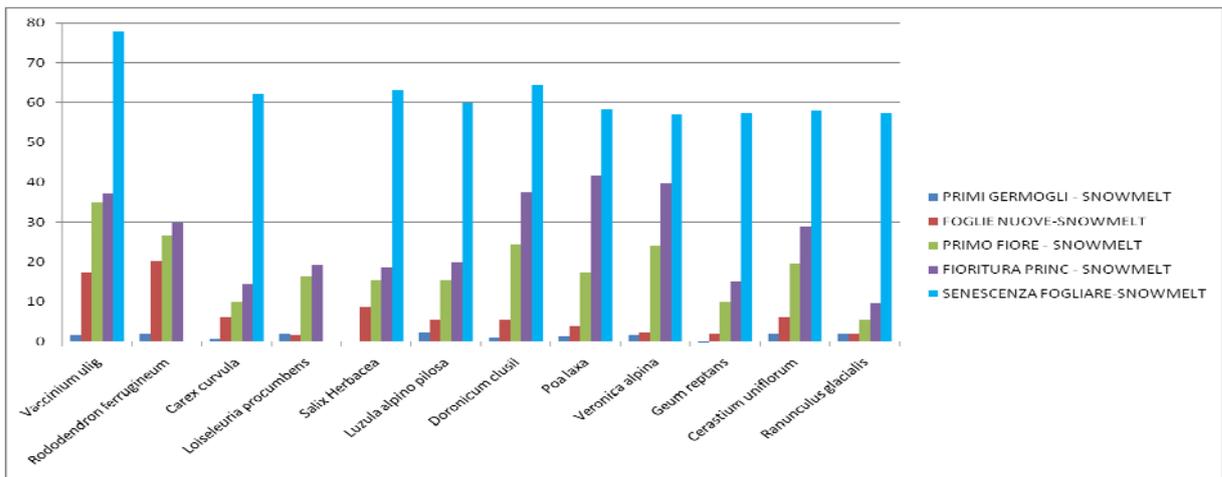
## 5.d. FENOLOGIA DELLA VEGETAZIONE

Da un'analisi preliminare degli andamenti medi fenologici delle singole specie (figura 5.10) si è visto che l'andamento dei ritmi fenologici è strettamente legato alle dinamiche climatiche ambientali: il *Vaccinium ul.* e il *Rhododendron f.* ad esempio presentano uno snowmelt molto anticipato, probabilmente legata alla morfologia di questi arbusti.



**Figura 5.10:** andamento delle fasi fenologiche delle specie target.

Anche le specie di prateria e di cresta ventosa (*Carex c.* e *Loiseleuria p.*) sono uscite molto presto dalla neve. La caratteristica più evidente è che le specie di cresta ventosa, sembrano essere fortemente influenzate anche dal fotoperiodo nella regolazione della fioritura, infatti fioriscono molto presto e nella stessa decade (180-190), appena finita la fase vegetativa. Anche gli arbusti sembrano mostrare questo tipo di relazione con la regolazione foto periodica della fioritura, sebbene andando in fioritura più tardi rispetto alle specie di cresta ventosa, ma sempre nella stessa decade 190-200.



**Figura 5.11:** distanza media delle singole fasi fenologiche dallo snowmelt delle specie target

Considerando la senescenza fogliare e la fase di formazione dei primi germogli si può dare una quantificazione del periodo di vita delle singole specie target usate in questo studio. Il *Vaccinium ul.* per esempio inizia a formare i germogli il 166 (due giorni dopo lo *snow melt*), entrando in senescenza fogliare il 242, indicando una durata del ciclo vitale di tale specie di 76 giorni, così come anche il *Rhododendron f.*, sebbene quest'ultimo mostra una formazione dei germogli ritardata di 2 giorni (168). La durata del ciclo vitale è molto relativa anche al tipo di ecologia della singola specie. Ad esempio *Loiseleuria procumbens*, forma i primi germogli il giorno 171 e arriva alla formazione dei semi maturi il giorno 246, a differenza di *Carex c.* (169-228). Per queste due specie non si può parlare di senescenza fogliare, infatti *Lois.*, non ha presentato tale fenofase, mentre *Carex c.* è tipica per avere dei funghi simbiotici nelle foglie che ne provocano arricciamento e ingiallimento sin dai primi giorni di vita, rendendole molto simile a foglie in senescenza, e quindi è difficile capire con certezza soltanto a vista quando la foglia presenta tessuti morti o ancora vivi. Per *Salix h.* (figura 5.10), la durata del ciclo vitale è di 63 giorni (183-246), per *Luzula alp.-pil.* 60 giorni (186-244), molto simile anche il *Doronicum clusii*, 64 giorni (187-250). Altre specie invece presentano un'ecologia legata ad un ciclo di vita ancora più breve: 58 giorni per *Poa laxa* (188-245) e per *Cerastium unif.* (143-249); 57 giorni per *Veronica alpina* (191-246), *Geum rept.* (189-246) e *Ranunculus glacialis* (195-250). I risultati mostrano quindi che c'è una forte differenza nel completamento di ciascuna fenofase per diverse specie, con 20 giorni circa di differenza nella formazione dei nuovi germogli tra *Vaccinium*, *Rhod*, *Carex* e *Lois* rispetto alle altre specie. La formazione di foglie nuove avviene con un intervallo di tempo di 30 giorni tra la *Loiseleuria*, che esce dalla coltre nevosa con le foglie praticamente già sviluppate (171) e il *Cerastium* che

è l'ultimo a completare la formazione delle foglie nuove (197). I valori medi indicano che la prima a formare le foglie nuove, dopo la *Loiseleuria* è il *Carex c.* (174), a seguito le specie della brughiera alpina (*Vacc.* e *Rhod.*) rispettivamente, il 182 e il 186. Il salice nano forma le foglie nuove il 192 (9 giorni dopo lo *snowmelt*) (figura 5.11), mentre altre specie arbustive quali *Vacc.* e *Rhod.* rispettivamente 18 e 20 giorni dopo lo *snow melt*. Tutte le altre specie presentano formazione di foglie nuove al massimo 5 giorni dopo la formazione dei primi germogli, come *Luzula alp.-pil.* o *Cerastium un.* o *Doronicum clusii*.

Le piante di valletta nivale invece, come il *Salix h.* sono fortemente legate al periodo dello *snowmelt* (figura 5.10, 5.11).

In figura 5.11 si vede una tendenza molto forte per le specie di valletta nivale, ad anticipare la fioritura. Questa tendenza si riscontra anche per le specie pioniere quali *Poa laxa*, *Ranunculus glac.*, *Cerastium unif.*, *Geum reptans*. Quello che possiamo vedere analizzando la distanza delle fenofasi dal periodo di scioglimento della neve è che per alcune specie vale un discorso di comunità, ossia *Luzula alpino pilosa* e *Doronicum clusii* ad esempio, collocate all'interno della stessa associazione del *Luzuletum spadiceae*, rispondono in modo diverso allo scioglimento nivale. Tuttavia questo è importante all'interno della stessa comunità, infatti le specie possono in tal modo assicurarsi l'impollinazione da parte degli insetti, e quindi una riproduzione sicura. In questo modo possiamo spiegare anche il comportamento di *Veronica alpina*, collocabile nell'ambiente di valletta nivale, ma avente ritmi fenologici molto più simili ad una qualsiasi altra specie pioniera. In realtà è un caso molto particolare, infatti è spesso specie compagna in altre associazioni quali l'*Oxyrietum dyginae*.

### **5.d.1. Confronti intraspecifici e tra le associazioni vegetali.**

Un'ulteriore analisi è stata quella di dividere per decenni le date di apparizione delle diverse fasi fenologiche, raggruppando in ordine di apparizione tutte le specie studiate. Questo ci ha permesso di confrontare il comportamento di determinate specie al fine di verificare che questo sia omogeneo per le diverse associazioni, se vi sia qualche discordanza all'interno delle associazioni o qualche forte legame coi fattori abiotici, in particolare con lo *snow melt*.

**Tabella 5.12:** date della manifestazione dei primi germogli (giorni giuliani) riordinate in decenni ed in ordine di apparizione; specie selezionate in base alla presenza di dati della temperatura del suolo e alla rappresentatività dell'associazione.

PRIMI GERMOGLI	161-170	171-180	181-190	191-200
<i>Vaccinium uliginosum</i>	166			
<i>Rhododendron ferrugineum</i>	168			
<i>Carex curvula</i>	169			
<i>Loiseleuria procumbens</i>		171		
<i>Salix herbacea</i>			183	
<i>Luzula alpino pilosa</i>			186	
<i>Doronicum clusii</i>			187	
<i>Poa laxa</i>			188	
<i>Geum reptans</i>			189	
<i>Veronica alpina</i>				191
<i>Cerastium uniflorum</i>				193
<i>Ranunculus glacialis</i>				195

LEGENDA	
colore	stadio fenologico
	avanzato di una decade
	avanzato di due decenni
	avanzato di tre decenni
	arretrato di una decade
	arretrato di due decenni
	arretrato di tre decenni
red	no data

Per confrontare le date di apparizione delle fenofasi delle specie target, scelte ai fini di questo lavoro, è stato adottato un metodo di confronto visivo evidenziando con colori diversi le specie che hanno presentato scostamento nella decade di apparizione della fase fenologica presa in esame rispetto alla manifestazione dei primi germogli (legenda a fianco).

Come termine di confronto sono stati usati i primi germogli (tabella 5.12), poiché questa fase è chiaramente la più suscettibile a cambiamenti nel pattern di scioglimento del manto nevoso. In tabella 5.13 possiamo vedere la prima fase fenologica importante dopo l'apertura dei germogli, cioè la formazione di foglie nuove, che segna l'inizio della produzione autotrofica di energia. Questa fase mostra un avanzamento di ben due decenni rispetto alla formazione dei primi germogli, per il *Vaccinium uliginosum* e il *Rhododendron ferrugineum* (colore rosso) rispetto alle altre specie. Un piccolo avanzamento si riscontra anche per *Carex curvula*, *Geum Reptans*, *Poa Laxa*, *Doronicum clusii*, *Salix herbacea* (colore verde).

**Tabella 5.13:** confronto della manifestazione delle foglie nuove per alcune specie target

FOGLIE NUOVE	161-170	171-180	181-190	191-200
<i>Loiseleuria procumbens</i>		171		
<i>Carex curvula</i>		174		
<i>Vaccinium uliginosum</i>			182	
<i>Rhododendron ferrugineum</i>			186	
<i>Luzula alpino pilosa</i>			189	
<i>Geum reptans</i>				191
<i>Poa laxa</i>				191
<i>Veronica alpina</i>				191
<i>Doronicum clusii</i>				191
<i>Salix Herbacea</i>				192
<i>Cerastium uniflorum</i>				197
<i>Ranunculus glacialis</i>				195

PRIMO FIORE	171-180	181-190	191-200	201-210	211-220
<i>Carex curvula</i>	178				
<i>Loiseleuria procumbens</i>		189			
<i>Rhododendron ferrugineum</i>			193		
<i>Ranunculus glacialis</i>			198		
<i>Vaccinium uliginosum</i>			199		
<i>Salix Herbacea</i>			199		
<i>Geum reptans</i>			199		
<i>Luzula alpino pilosa</i>			199		
<i>Doronicum clusii</i>				210	
<i>Poa laxa</i>				205	
<i>Cerastium uniflorum</i>					211
<i>Veronica alpina</i>					213

**Tabella 5.14** confronto della manifestazione del primo fiore per alcune specie target.

Come si può vedere in tabella 5.14 la prima specie, a formare il primo fiore è il *Carex c.*, mentre il *Rhododendron f.* e il *Vaccinium ul.* sono sempre posticipati di due decadi. Un caso particolare può essere

quello del *Ranunculus glacialis*, che anticipa la fase di formazione del primo fiore, di ben due decadi (colore azzurro). Anche in questa fase abbiamo un avanzamento di una decade per *Doronicum clusii*, *Poa laxa* e *Veronica alpina*. Per quanto riguarda la fioritura principale, possiamo vedere che presenta un andamento molto simile alla fase del primo fiore, sebbene *Doronicum clusii* e *Poa laxa* presentano un avanzamento di due decadi e il *Rhododendron ferrugineum* di una sola decade (tabella 5.14). Il fatto che molte specie concentrino la formazione del fiore nello stesso periodo potrebbe indicare l'importanza del fotoperiodo per questa specifica fase.

L'ultima fase analizzata è stata quella di senescenza fogliare, e in questa fase notiamo un arretramento in termini di decadi per diverse specie: *Veronica alpina*, *Cerastium uniflorum* e *Ranunculus glacialis* (tabella 5.15). Tuttavia la senescenza fogliare avviene per tutte le specie, tranne *Carex curvula* nella stessa decade.

Questo tipo di approccio è stato utilizzato anche per le diverse associazioni vegetali presenti nella zona in studio (tabella 5.16). E' stato possibile in questo modo poter vedere che l'unico caso di avanzamento si ha nel caso di formazione del primo fiore dell'associazione del *Vaccinium Rhododendretum ferruginei*.

FIORITURA PRINCIPALE	181-190	191-200	201-210	211-220	221-230
<i>Carex curvula</i>	182				
<i>Loiseleuria procumbens</i>	188				
<i>Rhododendron ferrugineum</i>		196			
<i>Vaccinium uliginosum</i>			201		
<i>Salix Herbacea</i>			202		
<i>Ranunculus glacialis</i>			203		
<i>Luzula alpino pilosa</i>			204		
<i>Geum reptans</i>			204		
<i>Cerastium uniflorum</i>				220	
<i>Doronicum clusii</i>					223
<i>Poa laxa</i>					229
<i>Veronica alpina</i>					229

**Tabella 5.15:** confronto della manifestazione della fioritura principale per alcune specie target.

SENESCENZA FOGLIE	221-230	231-240	241-250
<i>Carex curvula</i>	230		
<i>Vaccinium uliginosum</i>	242		
<i>Luzula alpino pilosa</i>	244		
<i>Poa laxa</i>	245		
<i>Salix Herbacea</i>	246		
<i>Geum reptans</i>	246		
<i>Veronica alpina</i>	246		
<i>Cerastium uniflorum</i>	249		
<i>Doronicum clusii</i>	250		
<i>Ranunculus glacialis</i>	250		
<i>Rhododendron ferrugineum</i>			
<i>Loiseleuria procumbens</i>			

Tabella 5.16 confronto della manifestazione della senescenza fogliare per alcune specie target.

In particolare per le foglie nuove abbiamo un arretramento, quindi uno sviluppo anticipato per AA e LS, e anche la fase del primo fiore sembra avvenire prima in AA, SH, OD, LS e VR e in particolare AA presenta un arretramento di due decenni.

La fase di fioritura principale invece sembra distribuirsi più gradatamente all'interno di un mese circa di tempo, e solo AA e

SH presentano un arretramento di una decade. A livello di associazione la senescenza fogliare avviene in comune per tutte le associazioni nella decade tra il 241 e il 250, indicando l'importanza del fotoperiodo in questa fase.

PRIMI GERMOGLI	161-170	171-180	181-190
LC	166		
VR	167		
CC	170		
SH			186
LS			187
AA			187
OD			191

LEGENDA ASSOCIAZIONI	
<i>Vaccinio-Rhododendretum</i>	VR
<i>Loiseleurieto-Cetrarietum</i>	LC
<i>Salicetum herbaceae</i>	SH
<i>Androsacetum alpinae</i>	AA
<i>Oxyrietum digynae</i>	OD
<i>Luzuletum spadiceae</i>	LS
<i>Caricetum curvulae</i>	CC

Tabella 5.17: confronto delle manifestazioni delle fasi fenologiche per le associazioni target presenti in Vallaccia nei pressi del rock glacier Foscagno.

FOGLIE NUOVE	171-180	181-190	191-200
valori medi VR	174		
valori medi CC	175		
valori medi LC	176		
valori medi AA		186	
valori medi LS		190	
valori medi SH			191
valori medi OD			194

PRIMO FIORE	191-200	201-210
valori medi LC	192	
valori medi CC	193	
valori medi AA	198	
valori medi SH		203
valori medi OD		204
valori medi LS		205
valori medi VR		206

FIORITURA PRINCIPALE	191-200	201-210	211-220
valori medi LC	195		
valori medi VR	196		
valori medi CC		204	
valori medi AA		209	
valori medi SH		210	
valori medi OD			212
valori medi LS			214

SENESCENZA FOGLIE	241-250
valori medi LC	242
valori medi CC	243
valori medi AA	245
valori medi OD	247
valori medi LS	247
valori medi SH	249
valori medi VR	

### 5.d.2 Andamento medio forme di crescita

Raggruppando le specie secondo la loro forma di crescita, è stato possibile vedere come le specie erbacee non graminoidi, presentano in media uno *snow melt*, posticipato di una decade, rispetto alle graminoidi e agli arbusti. Tuttavia già allo stadio fenologico delle foglie nuove recuperano il ritardo rispetto alle altre specie. Infatti entro la decade 191-200 tutte le erbacee e gli arbusti hanno formato le foglie, cosa che non avviene per le graminoidi che devono aspettare dieci giorni in più. Inoltre per quanto riguarda la formazione di foglie nuove possiamo vedere un picco per le graminoidi coincidente a 171-180, una decade dopo lo snowmelt, mentre le non graminoidi il 191-200 (figura 5.12).

Per quanto riguarda la fioritura principale questa è ugualmente distribuita, mentre notiamo un avanzamento nel tempo della formazione dei semi e anche della maturazione dei frutti nelle erbacee non graminoidi. La fase di maturazione dei semi viene anticipata di una decade per gli arbusti (251-260) e le graminoidi, ma avviene con la decade 261-270 per le specie erbacee. Inoltre le graminoidi, non sono arrivate tutte a maturazione, poiché guardando i valori medi nella decade 261-270 avviene l'inizio dello sviluppo dei semi e questi non arrivano a maturazione. Infatti c'è una piccola percentuale di graminoidi che termina la fioritura principale nella decade 241-250. La fase di primo fiore si concentra nella decade 191-200 con percentuale del 58%, come anche gli arbusti (63%). Le erbacee non graminoidi diluiscono la fase di sviluppo del primo fiore in ben 4 decenni e con percentuali simili.

Nonostante la fioritura sembra essere uguale tra graminoidi ed arbusti, questi ultimi presentano una fase anticipata di inizio sviluppo dei semi, rispetto alle altre forme di crescita, completando entro il 211-220 l'inizio dello sviluppo dei semi. Tuttavia in media possiamo dire che la maturazione dei semi avviene nella stessa decade, 241-250, indicando che gli arbusti hanno un tempo di maturazione dei semi almeno una decade più lungo rispetto alle graminoidi e alle erbacee.

Gli arbusti e le graminoidi, in sintesi, presentano l'inizio dello snowmelt e dei primi germogli la stessa decade (161-170), mentre le erbacee il 171-180, infatti il 63% delle erbacee non graminoidi forma i primi germogli nella decade 181-190. Tuttavia la fase di snowmelt e quindi anche quella di primi germogli termina una settimana più tardi per le graminoidi, tra il 201 e il 210 (8%). I valori medi mostrano che la fioritura principale sembra essere influenzata dallo snowmelt, in quanto le graminoidi, che presentano in media snowmelt nelle prime settimane, hanno ben 8 settimane di fioritura principale. Invece le erbacee presentano 5 settimane di fioritura principale

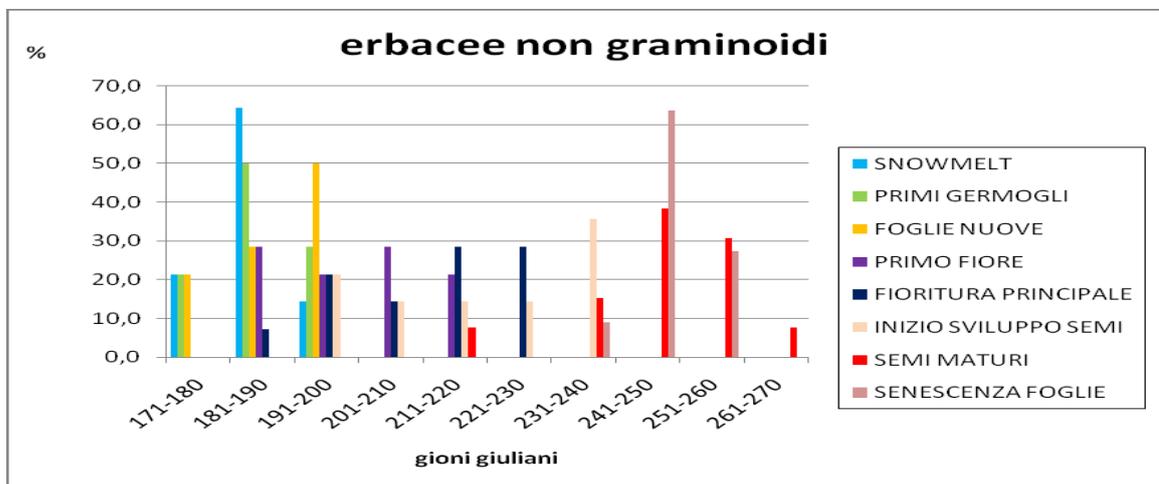
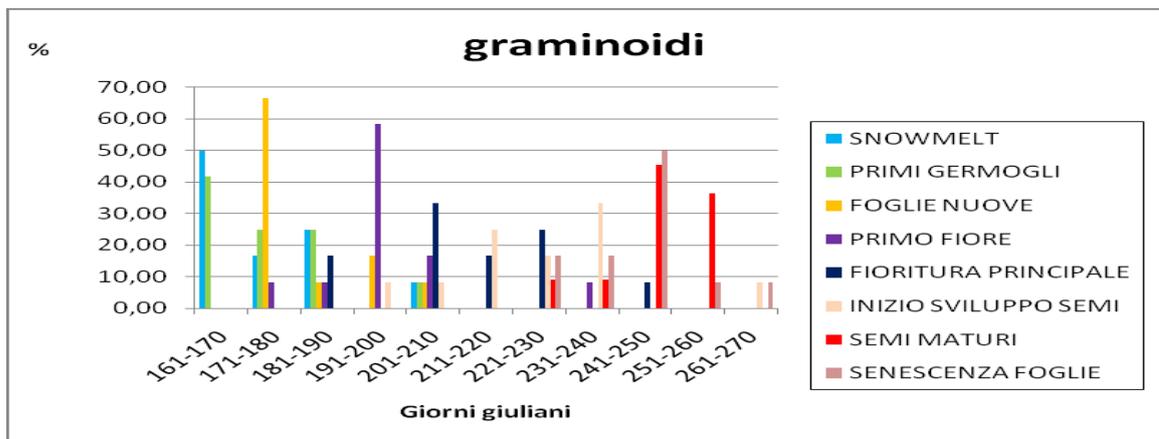
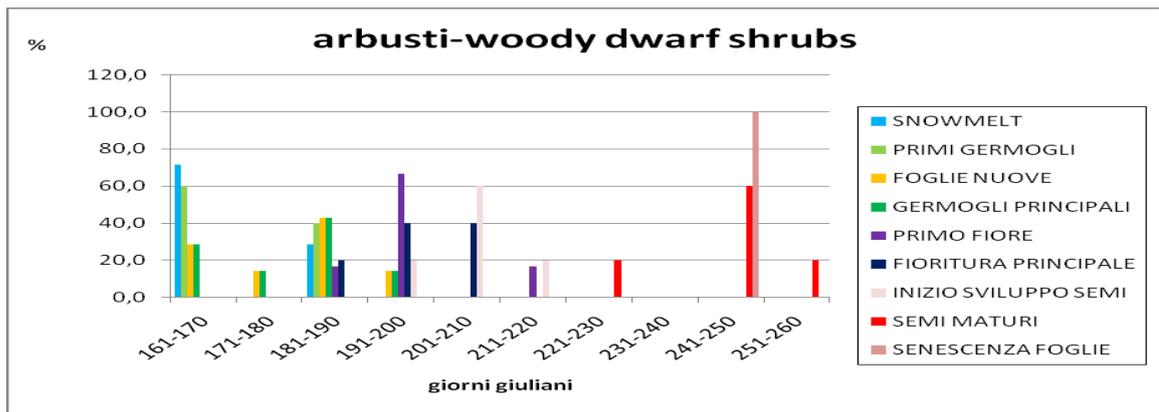


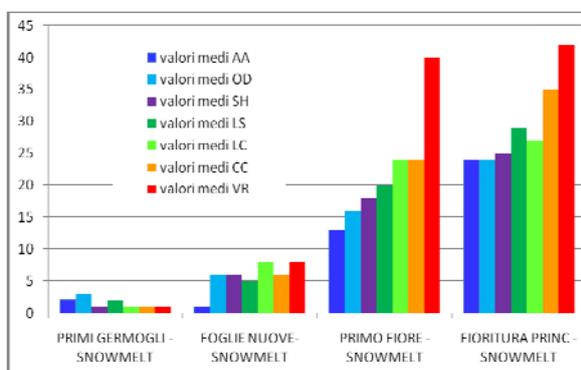
Figura 5.12: valori percentuali calcolati sui valori medi per le diverse forme di crescita.

## 5.d.3. Distanza dallo snow melt

	valori medi VR	valori medi LC	valori medi SH	valori medi AA	valori medi OD	valori medi LS	valori medi CC
<b>Quota</b>	<b>2406,02</b>	<b>2453,25</b>	<b>2455,44</b>	<b>2516,61</b>	<b>2516,93</b>	<b>2474,65</b>	<b>2449,98</b>
<i>snow melt (N°giorno)</i>	166	168	185	185	188	185	169
PRIMI GERMOGLI - SNOWMELT	1		1	2	3	2	1
FOGLIE NUOVE-SNOWMELT	8	8	6	1	6	5	6
GERMOGLI PRINCIPALI - SNOWMELT	10	8	7		9		
PRIMO FIORE - SNOWMELT	40	24	18	13	16	20	24
FIORITURA PRINC - SNOWMELT	42	27	25	24	24	29	35
SENESCENZA FOGLIE-SNOWMELT		74	64	60	59	62	74

**Tabella 5.18:** distanza dallo snow melt dei valori medi delle fasi fenologiche delle associazioni.

Osservando i valori medi delle fasi fenologiche delle associazioni, e la distanza di questi dal giorno di *snow melt* si vede che i primi germogli dell'OD avvengono con un ritardo maggiore rispetto allo scioglimento della neve (sebbene si tratta sempre di 3 giorni, in relazione ai 60 giorni di vita media per l'associazione OD) (tabella 5.18). In ogni caso l'OD è l'associazione che presenta durata del periodo vegetativo minore rispetto a tutte le altre, mentre al contrario il CC, VR e LC sono le due associazioni che hanno il periodo vegetativo più lungo (74



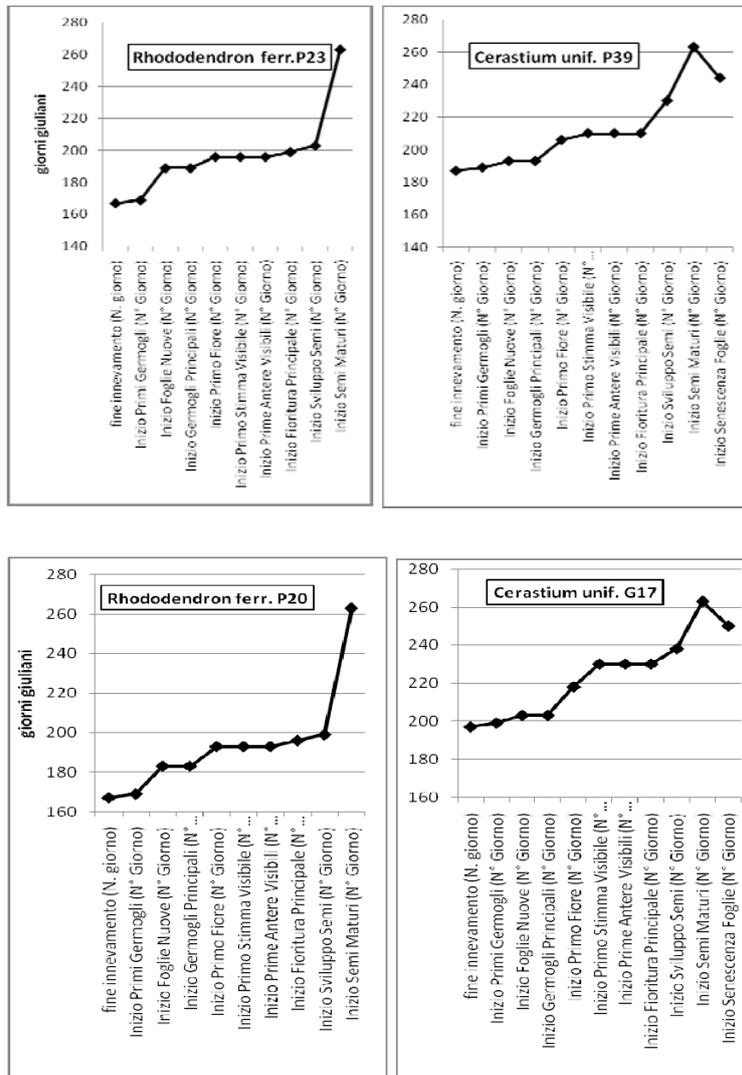
**Figura 5.13:** rappresentazione della distanza in giorni (asse y) delle fasi fenologiche più importanti dallo snow melt delle diverse associazioni.

giorni). Per quanto riguarda le associazioni VR e LC invece, esse hanno un gap di 8 giorni dalla formazione del germoglio all'apertura delle foglie, a differenza ad esempio di AA, che va incontro dopo 1 solo giorno alla formazione di foglie nuove. AA è anche la prima associazione a fiorire, rispetto allo snow melt, 13 giorni dopo, mentre VR 40 giorni dopo. Tale differenze sono ben evidenti anche in figura 5.13. Questa distribuzione è esemplificativa dei rapporti e

dell'ecologia delle diverse associazioni prese in esame. In particolare vediamo che le associazioni pioniere e di valletta nivale (AA, OD LS e SH) presentano un legame molto forte del periodo di fioritura rispetto allo *snowmelt*, ossia sono quelle che arrivano alla fase di fioritura circa in metà tempo (min 23 giorni-AA) rispetto alle altre associazioni (max 40-VR).

#### 5.d.4. Confronto della fenologia con TDD e GDD

La fenologia è strettamente correlata ai giorni di TDD e GDD. Infatti confrontando la fenologia di alcune specie target delle diverse associazioni che caratterizzano la zona del rock glacier Foscagno, possiamo vedere come ad esempio nel caso del *Rhododendron ferrugineum*



**Figura 5.14:** grafici delle fasi fenologiche dell'anno 2010 relative a *Rhododendron ferrugineum* (P23 e P20) e a *Cerastium uniflorum* (P39 e G17).

la formazione dei primi germogli avviene molto precocemente, il giorno giuliano 169 (sia P23 che P20). I valori di GDD e TDD, ed anche di GST media, sono tra i più alti, sia a 2 cm che 10 cm, per entrambi gli individui. Invece per *Cerastium uniflorum* (G17) i valori sono tra i più bassi e i primi germogli compaiono il giorno 189. Nonostante l'altezza della vegetazione sia uguale per *Cerastium uniflorum* (P39) esso presenta valori di GDD, TDD e anche GST più alti rispetto a G17, e la formazione dei germogli avviene il giorno 197. Notiamo subito una forte differenza tra le due specie rispetto alla prima fase fenologica, della formazione dei germogli. Tale differenza, come vediamo dal grafico di figura 5.14, è dovuta al ritardo dello *snow melt* nei plot P39 e G17. Per quanto possiamo vedere da queste due specie, la fase di formazione delle foglie nuove, potrebbe essere più legata ad altri fattori, e non tanto allo scioglimento della neve, per lo meno in P23 e P20. Per P39 e G17 invece, oltre ai primi germogli, si ha una sequenza di fasi strettamente legate allo scioglimento della neve, come la formazione delle foglie, e la formazione dei germogli

principali. La fase di fioritura è decisamente più lunga in P23 e P20, mentre è più corta in P39 e G17.

Per indagare ulteriormente questa relazione vengono prese in esame (figura 5.15) altre tre specie target per le quali sono state confrontati gli andamenti del GST (in figura 5.6).

Anche per queste specie possiamo vedere che esiste una stretta relazione coi giorni di TDD e GDD. Il falso mirtillo

infatti inizia a formare i germogli molto presto, come in P23 il Rododendro, e presenta dei valori molto alti di GDD e TDD. Per quanto riguarda il *Carex curvula*, di P29, la fine dell'innervamento è il giorno 175, ma

nonostante questo presenta anch'esso dei valori di GDD e TDD molto alti, come il Rododendro e il falso mirtillo. Il *Salix herbacea* in P47 invece esce molto in ritardo dalla

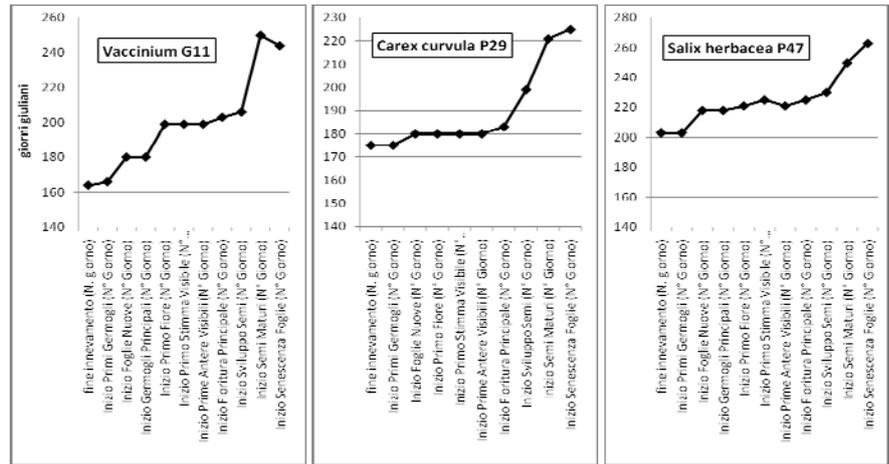


Figura 5.15: grafici delle fasi fenologiche dell'anno 2010 relative a *Vaccinium uliginosum* G11; *Carex curvula* P29; *Salix herbacea* P47.

neve, il giorno 203, e presenta valori molto bassi di GDD e TDD. In questo caso gli stadi fenologici sono molto vicini nel tempo individuando una potenziale relazione coi giorni di TDD. Confrontando invece P29 (*Carex c.*) e P31 (*Lois.-fig 5.16*): sebbene lo snowmelt è anticipato in P31, la fase di fioritura è posticipata rispetto a P29. I

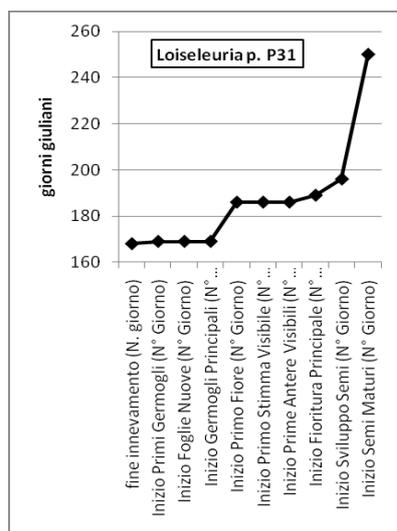


Figura 5.16: fasi fenologiche di *Loiseleuria procumbens* P31.

valori di GDD e TDD a 2 cm sono più alti per la *Loiseleuria p.* e il GST medio è molto simile. Al contrario a 10 cm è il *Carex c.* ad avere maggiori valori di GDD e TDD. Quindi si può pensare che gli alti valori di GDD e TDD a 2 cm in P31 siano dovuti all'effetto isolante maggiore dovuto alla struttura di *Loiseleuria p.*

In questo caso la fioritura in P29 sembra essere indipendente dal regime termico del suolo, effettivamente l'ecologia del *Carex c.* permette di avere un ciclo biologico molto rapido. Alti GDD e alti TDD indicano una alta disponibilità di temperature sopra gli 0°C (TDD) o sopra i

5°C (GDD). Questo influenza notevolmente l'avanzamento delle fasi fenologiche, con conseguenze sulla produzione vegetativa e quindi sul *buffering effect* della vegetazione sul bilancio termico del suolo.

## **6. DISCUSSIONE**

In alta quota la temperatura dell'aria, il tipo di copertura del suolo e la radiazione solare sono i maggiori fattori che contribuiscono al bilancio energetico netto della superficie (Happoldt & Schrott, 1992; Williams & Smith, 1989). Tuttavia esiste anche una forte relazione di *feedback* tra il regime termico del suolo e i ritmi fenologici delle piante. Con questo lavoro abbiamo potuto verificare che sulle Alpi, in particolare nella zona in studio del rock glacier Foscagno, questi fattori sono molto variabili e la copertura del suolo è il fattore principale nel definire il bilancio energetico e i flussi di calore tra l'atmosfera e la superficie (Luthin & Guymonn, 1974; Goodrich, 1982; Granberg, 1988). La copertura del suolo è data in inverno dal manto nevoso mentre in estate dal tipo e dalla quantità di vegetazione. Le proprietà della neve e della vegetazione però, possono essere estremamente variabili in base alla presenza di permafrost.

### **6.a. CARATTERISTICHE NIVOLOGICHE**

L'elemento che gioca il ruolo fondamentale nella trasformazione della neve è la temperatura, o meglio, la differenza di temperatura tra la superficie del manto nevoso e il terreno: il gradiente termico, definito come variazione di temperatura per centimetro di spessore del manto nevoso. Nei profili con temperature alla base attribuibili alla presenza di permafrost (figura 5.1), si nota una modesta variazione del gradiente termico. Tuttavia sarebbe necessaria un'analisi più approfondita di questo fenomeno non avendo a disposizione una quantità di dati sufficienti per una buona analisi statistica. In ogni caso sembra confermarsi l'ipotesi (Keller & Gubler, 1993) secondo la quale esistono forti differenze stratigrafiche nella copertura nevosa di siti con o senza permafrost. Nel primo caso infatti si ha un minore gradiente termico (metamorfismo distruttivo), nei livelli nivali di base, dovuto alla minore migrazione del vapore all'interno del manto nevoso (figura 5.1).

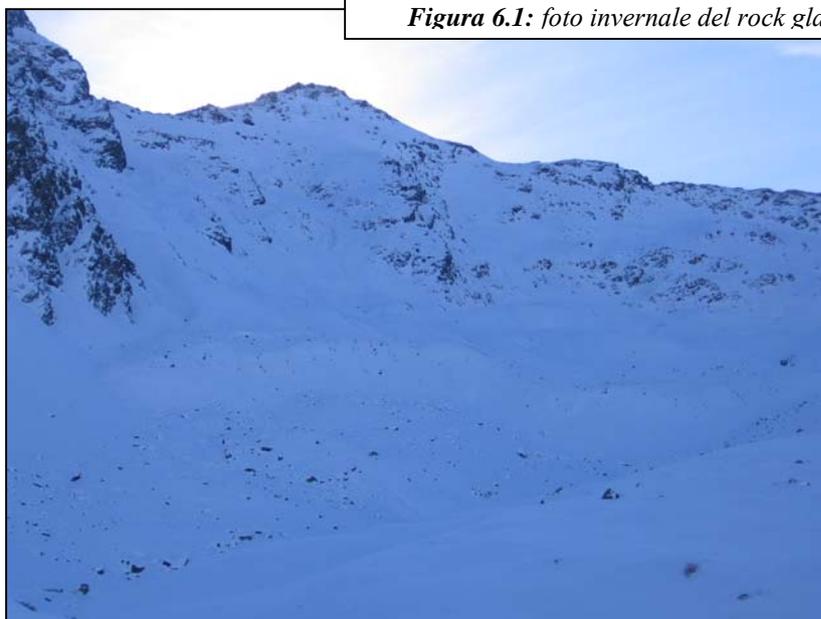
Oltre che per ricerca sul permafrost, questo fenomeno ha anche rilevanze importanti nella formazione delle valanghe in quanto la stabilità del manto nevoso è strettamente legata al tipo di substrato. Si può pensare che laddove vi siano terreni con permafrost, a parità di condizioni, la possibilità che si verificano valanghe di fondo siano minori, poiché le basse temperature aumenterebbero la coesione del manto nevoso al substrato; mentre siano maggiormente probabili quelle a lastroni superficiali, ipotizzando che gli strati inferiori più freddi facciano da piano di slittamento (Guglielmin & Tellini, 1995). Al contrario nella fase estiva, quando la tavola del permafrost si abbassa e lo strato attivo assume temperature

prossime a 0°C, può aumentare la saturazione del terreno dando luogo ad altri fenomeni gravitativi quali *debris flow* o slittamenti superficiali. Infatti i fenomeni di erosione del suolo sono particolarmente accentuati quando il processo di infiltrazione dell'acqua è ridotto, per la presenza di orizzonti gelati, in modo particolare nei tratti più ripidi.

### 6.b. BTS, DISTRIBUZIONE DEL PERMAFROST

Confrontando i valori di BTS misurati durante quest'inverno si può vedere come i valori delle stazioni prese in esame non scendano mai sotto i -3°C, indicando zone con probabile presenza di suolo con permafrost (-3°C < BTS < -2°C), e nella maggior parte dei punti suolo senza permafrost (BTS > -2°C). Alcune misure di BTS però possono variare per vari motivi, anno per anno, di qualche decimo di °C, anche negli stessi siti di misura (Guglielmin, 1995). Tuttavia questo è un risultato solo preliminare in quanto in molti punti, dove era stato segnalato permafrost tramite altre indagini (Guglielmin & Tellini, 1993-1994), in seguito a costrizioni tecniche non si è potuto verificarne la presenza: in molte misurazioni, il palo in acciaio usato per creare il foro attraverso il quale calare il termometro, incontrava una decisa resistenza da parte della neve negli strati basali, i quali compattandosi diventavano impenetrabili. Questo fenomeno tuttavia sarebbe attribuibile alla presenza di brina di fondo, (cristalli a calice) anch'essa attribuibile alla presenza di suolo gelato. La formazione della brina di fondo ha bisogno di un forte gradiente all'interno del manto nevoso, che si potrebbe instaurare in giornate calde e con suolo gelato). Dai risultati del BTS inoltre è possibile confermare la presenza di permafrost nella parte inattiva del rock glacier posta tra i 2370 e i 2480 m (in accordo con Guglielmin, 1995) (figura 5.2 e tabella 5.9).

**Figura 6.1:** foto invernale del rock glacier Foscagno- Vallaccia Corta.



## 6.c. PATTERN DI EVOLUZIONE E DISTRIBUZIONE DEL MANTO NEVOSO

Per quanto riguarda il pattern di accumulo, persistenza e scioglimento del manto nevoso, si è potuto vedere come la distribuzione della coltre nevosa cambia in base a diversi fattori. Il più importante è la topografia: la localizzazione geografica e morfologica, l'esposizione, l'energia di rilievo, l'inclinazione; quindi, la presenza di permafrost; la granulometria del substrato; e non da ultimo anche il tipo di vegetazione. I parametri presi come riferimento per

l'evoluzione del manto nevoso (spessore < 10 cm, tra 10 e 80 cm, >80 cm), mostrano una forte correlazione col tipo di localizzazione. In

particolare salendo in quota la neve presenta uno spessore maggiore, soprattutto nel periodo invernale (tabella 5.6, 5.7 e 5.8), e presenta un accumulo prolungato nella stagione primaverile. Questo fenomeno è attribuibile soprattutto anche al micro rilievo (P47), e alla presenza di suolo gelato (P41).

La neve ha un ruolo fondamentale nello stabilire il bilancio termico del suolo e quindi del permafrost; ma lo spessore del

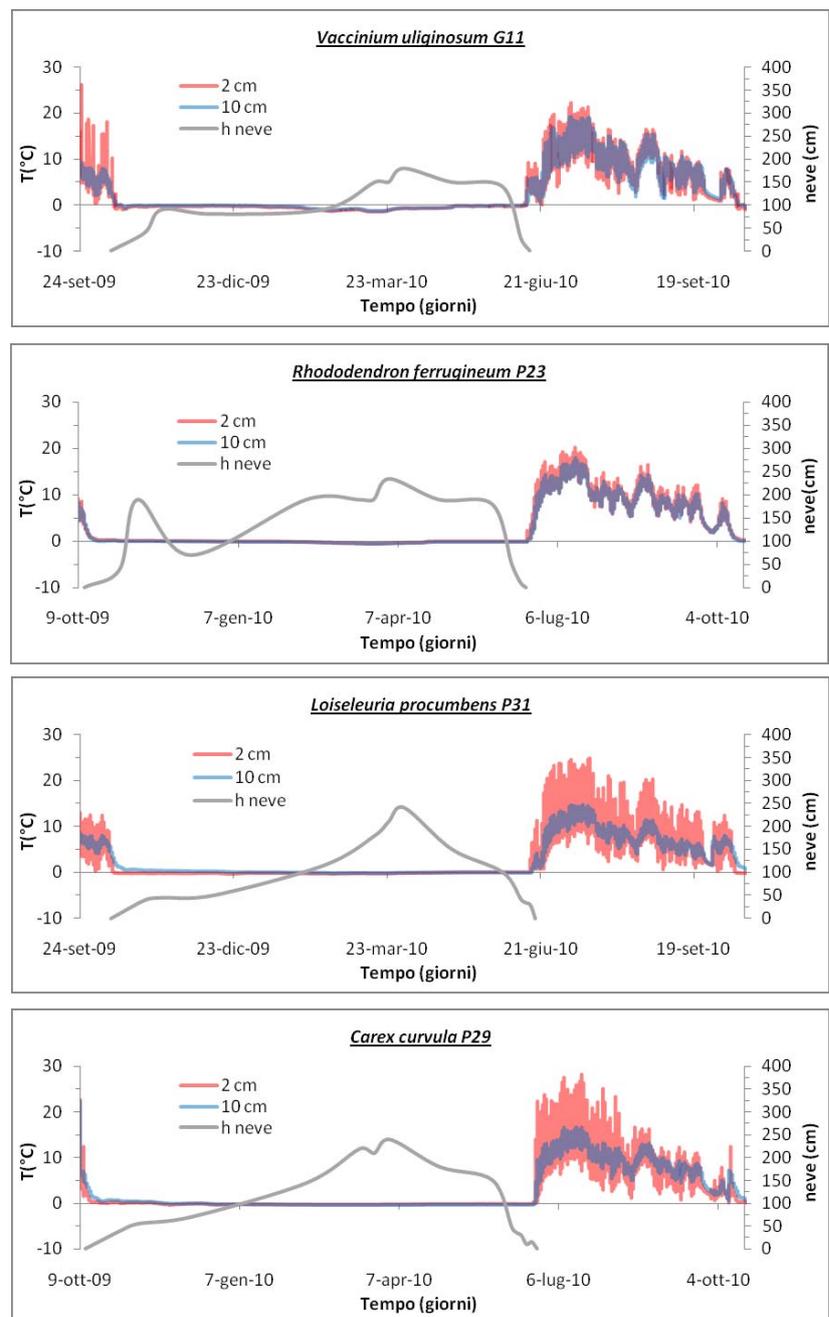


Figura 6.2: confronto del manto nevoso e del GST in P29, P31, P23 e G11.

manto nevoso non è sufficiente a spiegare il fenomeno di isolamento della superficie ad opera di questo. E' importante anche il periodo in cui tale spessore della coltre nevosa si viene a formare. Un aumento di neve in primavera previene il riscaldamento del suolo riducendo il GST; mentre uno spessore esiguo nel periodo autunnale impedisce il raffreddamento del suolo mantenendo il bilancio termico estivo, con conseguenze sull'aumento del GST e quindi sulle dinamiche del permafrost. Questo fenomeno è ben studiato in Artico (es. Nicholson & Granberg, 1973; Smith, 1975). Guardando quindi l'inizio dell' innevamento avutosi nel periodo autunnale nel 2009 (tabella 5.3) possiamo immaginare che sia stato questo la causa dei valori di BTS misurati nella primavera del 2010. Inoltre nei diversi punti è avvenuto quest'anno uno scioglimento ritardato; tuttavia è stata registrata la presenza di uno spessore nevoso limitato (tra 10 e 80 cm) per un periodo abbastanza lungo (tabella 5.4) e <10 cm per un periodo limitato; una tale copertura nevosa può essere lo stesso causa di trasferimento di calore dal suolo verso l'atmosfera, o dall'atmosfera al suolo in base alla temperatura dell'aria e del regime termico del suolo stesso. Confrontando però il GST e la copertura nevosa nei giorni in cui si aveva spessore < 10 cm o tra 10 e 80 cm della neve, possiamo vedere che una copertura < 10 cm sembrerebbe apportare seppur minime variazioni alla temperatura del suolo, mentre con una copertura al di sopra dei 10 cm, prevale l'effetto di isolamento del manto nevoso (figura 5.9 e 6.2).

L'esposizione e il micro rilievo sono fondamentali nel determinare il pattern di accumulo, persistenza e scioglimento del manto nevoso, in quanto influiscono sull'energia assorbita dalle radiazioni solari. P47 ad esempio si trova in una depressione sul corpo del rock glacier. In questo punto la neve permette un accumulo nevoso persistente sin dalle prime nevicate fino a stagione primaverile inoltrata (figura 5.9). Questo dimostra che la distribuzione e l'evoluzione della copertura nevosa dipende non solo dal gradiente altitudinale, ma anche dalle caratteristiche del versante e del rilievo, a diversi livelli di scala: in accordo con alcuni autori secondo i quali il periodo di *snow melt* mostra una variazione annuale (Beninston, 1997) ma la distribuzione della neve sui versanti rimane costante negli anni (Friedel, 1961; Walker *et al.*, 1993; Molau *et al.*, 2005).

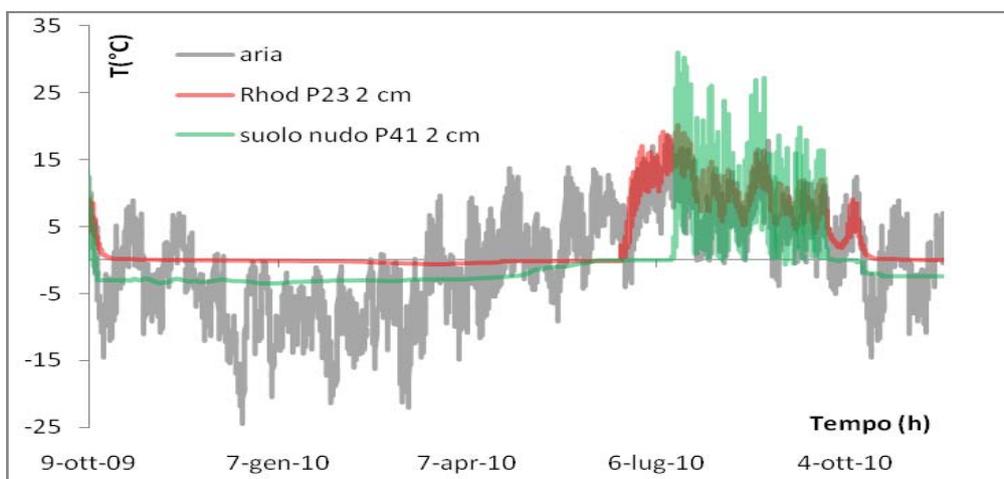
#### **6.d. REGIME TERMICO SUPERFICIALE E REGIME TERMICO DEL SUOLO**

Durante il periodo primaverile, quando iniziano ad alzarsi le temperature (figura 5.7), la neve subisce il metamorfismo da fusione e rigelo, gli strati superficiali sciolgono, l'acqua scende e

riempie le aree vuote. Il metamorfismo da fusione causa la scomparsa della coltre nevosa e conclude il processo di trasformazione del manto nevoso in acqua.

In questo momento il suolo inizia a subire i cicli di riscaldamento e raffreddamento giornalieri, e in particolare questi sono più o meno accentuati in base alla presenza di diversi tipi di specie vegetali. In particolare in presenza di suolo nudo (figura 5.3- 5.5-5.6.A-5.9) le oscillazioni sono maggiori rispetto a vari tipi di copertura vegetale ma anche rispetto alla temperatura dell'aria, evidenziando il contributo della radiazione solare nel bilancio termico del suolo. La vegetazione in secondo luogo effettua un forte *buffering effect* sul regime termico del suolo, il GTR (*Ground Thermal Regime*), e il suo ruolo nel bilancio energetico della superficie è importante e varia con diversi tipi di copertura vegetale.

L'effetto tampone della vegetazione è dovuto soprattutto alla morfologia dell'individuo preso in considerazione, come mostrano anche i risultati di GDD, TDD e FDD (tabella 5.11), e in particolare alla densità della *canopy*. Quando la pianta ha una struttura fogliare densa che non lascia passare le radiazioni solari, il suolo subirà meno oscillazioni termiche, stabilendosi su valori alti di temperatura (figura 5.7, 5.8, 6.2 e 6.3). Secondo i dati raccolti questo fenomeno non è attribuibile solo alla densità fogliare, infatti ciò che conta molto è lo spessore della vegetazione (tabella 5.11). Il caso rappresentativo può essere quello di *Loiseleuria procumbens* e *Carex curvula* (Tabella 5.11 e figura 5.8). La prima dovrebbe avere una maggiore effetto isolante considerando la densità della struttura, ma ciò non si verifica e subisce oscillazioni molto simili, sia a 2 cm che 10 cm, al *Carex curvula*, e presenta dei valori di GDD e TDD più bassi del *Carex curvula*, per lo meno a 10 cm. Il *Carex c.* infatti presenta una vegetazione alta a volte fino a 10 cm ma con una densità fogliare molto bassa.



**Figura 6.3:**  
confronto del  
GST del suolo  
nudo P41  
rispetto a  
*Rhododendron  
ferrugineum*  
P23.

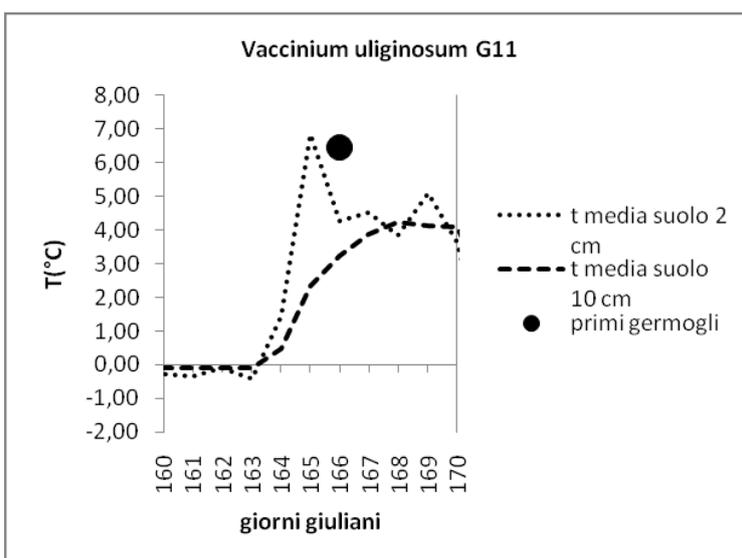
L'uso di TDD e *n-factor* TDD quindi è servito per quantificare l'effetto della vegetazione sul bilancio energetico del suolo (tabella 5.11). Il *Rhododendron f.* e il *Vaccinium ulig.* presentano valori molto simili di GST, ma diversi valori di TDD, attribuibili alla differenza di spessore della vegetazione. Osservando i valori di GST medio del suolo nudo e del suolo vegetato, il suolo nudo, in particolare in P41, presenta dei valori ben più bassi, attribuibili sia alla presenza di permafrost ma anche all'assenza di vegetazione (figura 6.3).

Possiamo concludere che il *Rhododendron f.* sembra essere la specie che presenta tra le specie target considerate un maggiore *buffering effect* (tabella 5.11, figura 6.2 e 6.3), in buona parte anche il *Vaccinium uliginosum* e *Loiseleuria procumbens*, indicando quindi lo stretto legame dell'effetto tampone sul bilancio energetico del suolo e l'ecologia della vegetazione.

### 6.e. ANALISI DELLA FENOLOGIA DELLA VEGETAZIONE IN AMBIENTE ALPINO D'ALTA QUOTA

La copertura vegetale influenza notevolmente il bilancio termico del suolo. Ma il grado di copertura vegetale dipende dal grado di sviluppo degli individui e indirettamente anche dalla loro fenologia.

La fenologia ha permesso di caratterizzare le piante presenti in Vallaccia sul rock glacier del Foscagno; grazie allo studio del loro ciclo vitale infatti, è stato possibile dividere le diverse specie in base alle risposte fenologiche al clima ed ai fattori climatici. Primo tra tutti, il manto



**Figura 6.4:** esempio del legame della comparsa dei primi germogli con il GST a 2 e 10 cm.

nevoso, ma anche la temperatura, le radiazioni e di conseguenza anche la presenza di permafrost.

Molte specie hanno manifestato un avanzamento o un arretramento della manifestazione fenologica, sul calendario giuliano, rispetto alla situazione di riferimento della formazione dei primi germogli. A livello di specie questi spostamenti (tabella 5.11-5.12-5.13-5.14-

5.15) si sono dimostrati essere relazionabili in primo luogo ai fattori edafici e microtopografici. Per cui ad esempio laddove c'è una valletta con accumulo nivale, oppure un piccolo versante in ombra, la fenologia riscontra un accorciamento delle diverse fasi. In punti di cresta prevale l'azione del vento, con conseguente minore innevamento invernale. Chiaramente questi pattern diversi di risposta fenologica ai fattori climatici sono strettamente legati al tipo di comunità o di associazione vegetale. Quello che si è potuto vedere infatti è che non solo c'è una relazione a livello di specie ma essa è molto forte anche a livello di comunità. Ma le comunità sono conseguenza dei fattori edafici e dei fattori climatici.

Quello che si è visto è che le prime fasi fenologiche, cioè la formazione dei primi germogli e la formazione di foglie nuove, sono strettamente legata principalmente a 2 fattori: il manto nevoso e la temperatura, sia essa dell'aria ma anche del suolo (figura 6.4). I rapporti della temperatura dell'aria con la fenologia della fioritura delle piante alpine sono stati molto investigati in questi ultimi anni. Le piante risponderanno velocemente e direttamente ad un incremento di temperatura (Hulber *et al.*, 2010). Sulle creste più ventate, si è visto che l'effetto di riscaldamento della temperatura del suolo è molto forte, confermando che per specie adattate ad habitat liberati presto dal manto nevoso in rapporto alle piante dove la neve persiste a lungo, la temperatura del suolo ha un influenza maggiore (Hulber *et al.*, 2010). La crescita delle piante è primariamente guidata dai fattori climatici controllati dal periodo della stagione nivale. La temperatura dell'aria e le precipitazioni prima l'inizio delle nevicate e dopo la fine della neve hanno un ruolo diretto sul trend di crescita delle piante (Jonas *et al.*, 2008). I risultati mostrano inoltre che lo scioglimento del manto nevoso influenza il periodo vegetativo e l'inizio del ciclo vitale delle piante (figura 5.9-5.10-5.11 e 6.4). La neve gioca un ruolo fondamentale nella distribuzione delle specie; questo si riflette a livello di comunità (tabella 5.17) (in accordo con Walker *et al.*, 1993). Si è visto (figura 6.6) che la risposta fenologica delle specie prese in considerazione varia in base al tipo di comunità, di conseguenza in base al tipo di substrato e topografia. Ciò equivale a dire che ciascuna comunità o associazione vegetale presenta un pattern fenologico esclusivo che la caratterizza, che ne permette il mantenimento, garantendo il tempo necessario per la riproduzione e quindi a lungo termine per l'evoluzione di adattamenti specifici, e questo è molto importante al fine del mantenimento della biodiversità negli ambienti di alta quota.

Come la produzione di nuovi germogli e di foglie nuove, i risultati mostrano che anche la fase di fioritura mostra una distribuzione degli andamenti medi delle fasi fenologiche, strettamente collegabili sia tipo di comunità, sia al tipo di forma strutturale della pianta (figura 5.10-5.12-5.13-5.14-6.6). Sicché piante che vivono in ambiente di valletta nivale mostrano un anticipo

della fioritura, al contrario gli arbusti che escono mediamente presto dalla coltre nevosa, ritardano la fase di fioritura. Questo adattamento geocologico della vegetazione al microhabitat rappresenta uno stadio evolutivo molto interessante dal punto di vista del cambiamento climatico, infatti tale equilibrio si crea dopo successioni di vegetazioni che durano centinaia di anni e anche più. Gli stretti legami, mostrati in questo lavoro, della fenologia con i fattori del clima, permettono di dire che gli sconvolgimenti climatici possono avere dei potenziali effetti disastrosi su questi ambienti. Sulle creste ventose ad esempio la neve lascia presto spazio alla vegetazione, ed è possibile riscontrare una fioritura precoce delle specie adattate a questo ambiente (*Loiseleuria p.* e *Carex c.* per esempio). Una fioritura rapida dopo lo *snow melt* è una tattica importante per un successo nella produzione dei semi nelle piante che vivono in valletta nivale. L'importanza della fenologia della fioritura riguarda la formazione di frutti; questa relazione è stata molto studiata, in particolare sulle montagne giapponesi o in zone sub artiche (Kudo e Suzuki, 2002).

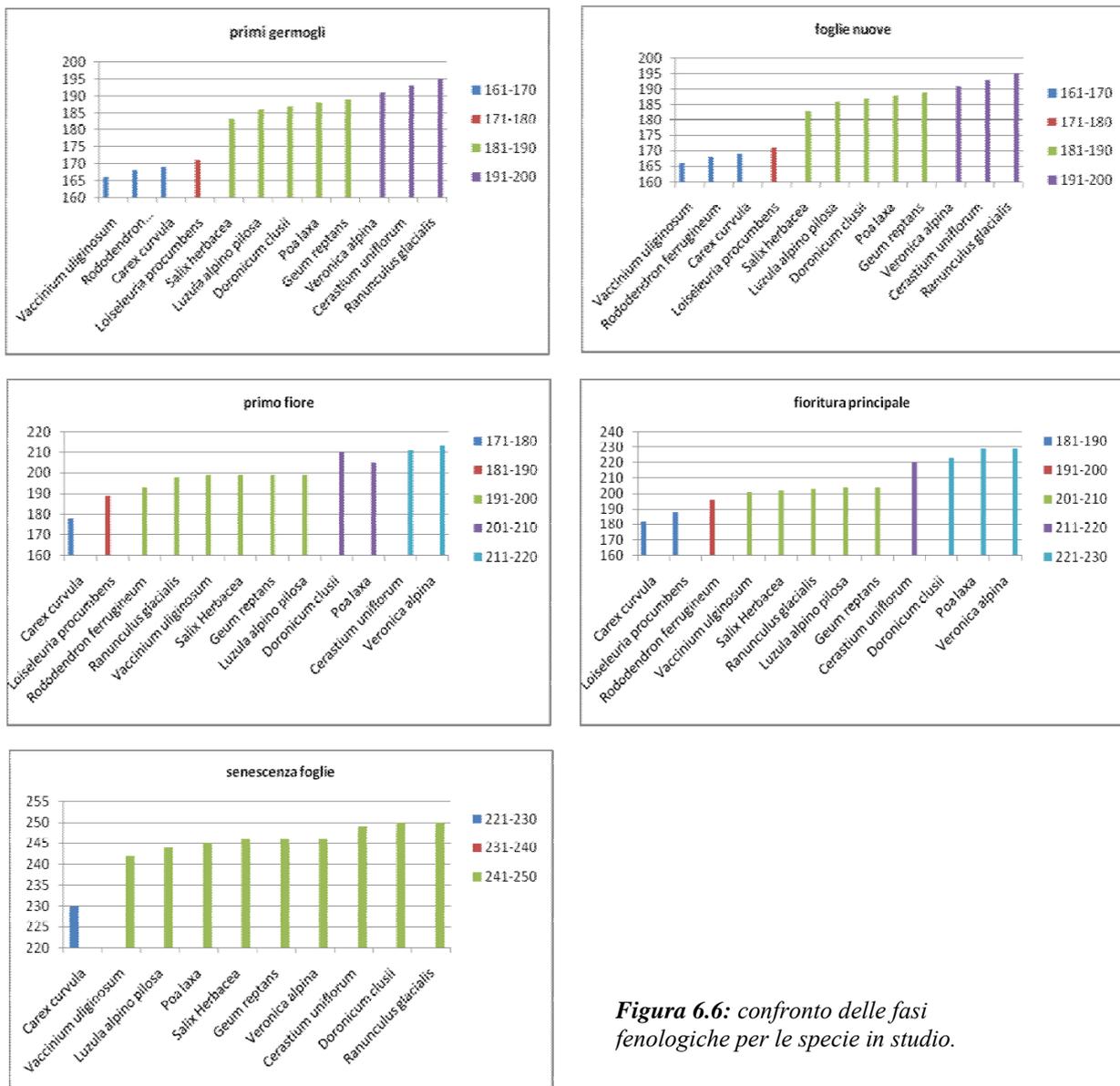


Figura 6.6: confronto delle fasi fenologiche per le specie in studio.

Le piante alpine di valletta nivale corrono il rischio di arrivare tardi alla maturazione dei semi a causa dello scioglimento della neve ritardato e in questo modo, troppo tardi per far maturare i frutti prima dell'inizio dell'inverno (Kudo, 1991). Al contrario piante che crescono sulle creste ventose hanno tempo sufficiente nella maturazione dei semi, ma una fioritura troppo anticipata risulta in una bassa produzione di semi a causa della limitazione di insetti impollinatori (Kudo & Suzuki, 2002). Possiamo quindi comprendere l'importanza della fenologia delle specie, ma ancora più delle comunità in questi ecosistemi.

Tra le piante d'alta quota, ve ne sono molte che molto spesso si riproducono solo vegetativamente; quindi producendo stoloni o aerei, o sotterranei, come ad esempio il *Geum reptans*, tuttavia la fioritura è molto importante per garantire una variabilità genetica (Keller 2005), che è fondamentale per sviluppare o mantenere gli adattamenti e quindi per garantire la biodiversità. In figura 6.6 è rappresentato il diverso trend di risposta della fasi fenologiche delle comunità vegetali monitorate. Il diverso periodo di scioglimento nivale, implica periodi di crescita molto ristretti ma soprattutto molto relazionati al tipo di associazione. Osservando quali di queste specie rispondono in un intervallo di tempo determinato (al massimo 10 giorni), si nota che le singole specie si distribuiscono secondo l'associazione di appartenenza. Le prime fasi sono molto sensibili alla persistenza del manto nevoso, ma anche il fotoperiodo, insieme alla temperatura, interviene nella regolazione delle fasi di fioritura. L'equilibrio esistente tra queste fasi è indice della sensibilità di queste associazioni ai potenziali cambiamenti climatici.

Secondo quanto possiamo vedere attraverso questi risultati, c'è una correlazione anche tra la temperatura del suolo e lo spessore del manto nevoso. Infatti nei punti dove si è dimostrato avere un maggior accumulo nevoso, le variazioni di temperatura sembravano essere più limitate, anche in presenza di coperture vegetali non molto spesse (es P47). Questo fenomeno può essere interpretato anche attraverso un'analisi della fenologia. Abbiamo visto che un manto nevoso molto spesso equivale ad una situazione morfologica tale per cui si ha un accumulo nevoso maggiore rispetto allo scioglimento, per lo meno nel periodo invernale. A questo pattern corrisponde un particolare tipo di vegetazione, rappresentata dall'associazione *Salicetum herbaceae* adattata a periodi vegetativi molto corti. I dati fenologici mostrano che queste piante dedicano un minor intervallo di tempo alla fase di sviluppo delle foglie rispetto alla fase di fioritura (figura 5.12-5.13).

Considerando anche la morfologia della specie, laddove le piante hanno poco tempo per produrre le foglie, esse agiscono con minor effetto sulla copertura del suolo (figure 5.7 e 5.8). Infatti al contrario l'associazione *Vaccinium Rhododendretum ferruginei*, tipica della

brughiera alpina, in media ha a disposizione un periodo vegetativo più lungo di un mese rispetto al *Salicetum*. Qui l'effetto "buffer" della vegetazione abbiamo visto essere molto accentuato, ed in effetti le specie della brughiera alpina hanno a disposizione un più lungo periodo vegetativo (figura 5.12 e 5.13).

Per di più, per specie arbustive, uno scioglimento nivale anticipato ha il risultato di prolungare il periodo vegetativo, potenzialmente aumentando la produttività. Questo può sembrare irrilevante se pensiamo ad un singolo individuo di *Rhododendron ferrugineum*, ma è molto importante in termini sia di espansione in quota della vegetazione, sia di bilanci di gas a livello atmosferico su scala globale, e in particolar modo di anidride carbonica (CO<sub>2</sub>). Infatti per esempio un aumento della temperatura media dell'aria influenza notevolmente la durata del periodo vegetativo e quindi la quantità di carbonio assimilata dalle piante tramite fotosintesi; al contrario però una modificazione che porti un aumento di precipitazione nevosa riduce il periodo vegetativo portando ad una diminuzione della quantità di carbonio sequestrato (Groendahl, 2007).

Non si può però negare che la copertura nevosa protegge le piante dalle basse temperature, mantenendo la temperatura costante durante l'inverno e garantendone la sopravvivenza (Jones *et al.*, 2001). Se però rimane il rischio di gelate primaverili, come è previsto secondo alcuni modelli climatici, le piante possono soffrirne maggiormente, soprattutto durante questo periodo (Inouye, 2000), dove tutte le energie e le riserve mantenute nell'inverno sotto forma di amidi vengono messe a disposizione dei nuovi germogli.

Le piante alpine d'alta quota tollerano un clima freddo con corte stagioni di crescita, ma questo ha ovviamente implicazioni sulle modalità di crescita, e quindi sui ritmi fenologici.

Ci sono ormai evidenze sufficienti per dire che la fenologia, così come altri eventi biologici, sta subendo uno spostamento in risposta al *global change* (Sparks & Menzel, 2002; Menzel, 2003; Badeck *et al.*, 2004; Walther, 2004; Menzel *et al.*, 2006). Questa evidenza viene sia da esperimenti di manipolazione del clima (Price & Waser, 1998; Cleland *et al.*, 1998; Sherry *et al.*, 2007) ma anche da osservazioni a lungo termine (Walther *et al.*, 2002; Badeck *et al.*, 2004).

Le regioni alpine dopo quelle polari sono tra quelle che saranno più affette dal cambiamento climatico (Kullman, 2004; Symon *et al.*, 2005; Solomon *et al.*, 2007). I fattori che contribuiscono per questa sensibilità sono la bassa produttività di questi ecosistemi, i pochi nutrienti e la loro estrema situazione per molti processi fisiologici delle piante (Bliss, 1985).

I risultati hanno mostrato come la distribuzione della vegetazione sia modulata da diversi fattori ambientali, primo tra tutti dal clima, inteso come precipitazioni e temperature, ma anche dalla radiazione solare, che è primariamente influenzata dall'angolo di versante e dall'orientazione (Fisher, 1990; Guisan *et al.*, 1998; Horsch, 2003). Le specie vegetali in queste zone esibiscono adattamenti specifici (microadattamenti) che sono per la maggior parte dovuti alle temperature, alla durata della coltre nevosa e al rilievo (Körner, 1995; Körner, 1999). I microhabitat sono certamente la chiave della diversità delle piante in alta quota, e le specie possono essere chiaramente differenziate sulla base delle loro nicchie micro topografiche (Gottfried *et al.*, 1998; Gottfried *et al.*, 1999).

Le piante delle creste ventose subiscono effetti negativi da un lungo permanere della neve, come molti licheni (Bendict, 1990; Welch *et al.*, 2005), muschi (Scott *et al.*, 2007) e carici (Bell & Bliss, 1979).

Tuttavia una possibile conseguenza dello *snowmelt*, nell'ottica in cui avvenga prima nell'anno potrebbe essere una modificazione nella composizione delle specie delle piante tipiche di questi habitat. In poco tempo questi cambiamenti guideranno infatti ad una riduzione della produttività delle singole specie, ma ad una scala di tempo più lunga porteranno ad un turnover delle specie (Bell & Bills, 1979; Kinght *et al.*, 1979; Galen & Stanton, 1995; Walker *et al.*, 1999), che vedrà l'entrata di nuove specie, magari anche avventizie od esotiche, con effetti disastrosi sulle comunità originarie.

Molti modelli climatici indicano un raccorciamento dell'inverno, per cui ci potremmo aspettare un sviluppo della biomassa delle piante negli scenari futuri (Jonas *et al.*, 2008).

Inoltre il manto nevoso rappresenta una fonte importante di ioni, soprattutto di N, che rappresentano un'importante fonte di nutrimento per le piante al momento dello scioglimento (Hiltbrunner *et al.*, 2004). Una modificazione del pattern di scioglimento del manto nevoso presenta implicazioni anche da questo punto di vista.

Altri modelli prevedono un aumento di temperatura. Si è calcolato che un incremento di temperatura media di 3 o 5 K può ridurre la copertura e la durata della neve per più di un mese (Keller *et al.*, 2005). Un incremento di temperature è previsto avvenga con più importanza in inverno e in primavera (Weber *et al.*, 1997), apportando una dispersione temporale del periodo di fioritura ed una diminuzione della sovrapposizione fenologica tra le specie, potenzialmente cambiando le interazioni tra le diverse specie e a lungo termine la composizione in specie delle comunità.

Per quanto concerne i gas serra invece la fenologia della fioritura appare insensibile ad un aumento di concentrazione di CO<sub>2</sub> nell'ecosistema alpino (Hovenden *et al.*, 2008), tuttavia gli

studi in questo settore sono ancora ai primordi. In ogni caso un aumento in biomassa coincide con un aumento in lettiera, e quindi con un potenziale aumento di CO<sub>2</sub> se questa viene rilasciata in atmosfera.

In ogni caso un cambiamento di queste dinamiche porterà ad un'ulteriore espansione della vegetazione, come è stato già segnalato in varie regioni delle Alpi (es. aumento della copertura arbustiva al Passo dello Stelvio: Cannone *et al.*, 2007; aumento di quota del limite del bosco: Camarero e Gutierrez, 2004 & Kullman, 2002; nell'Artico aumento della copertura arbustiva (Strum *et al.*, 2001).

In ultimo, questo lavoro si è svolto in una zona che mostra avere permafrost discontinuo e sporadico (Guglielmin *et al.*, 2003). La presenza di questo ha sicuramente implicazioni anche sulle dinamiche della vegetazione. Ma non solo, il permafrost, ed in particolare lo strato attivo, è un ottimo indicatore del *climate change* (Guglielmin, 2003), essendo legato ai fattori climatici, sia a piccola scala che a grande scala. Come abbiamo già citato nelle prime pagine, le variazioni climatiche a scala annuale-decennale possono variare lo spessore dello strato attivo, mentre a scala decennale-secolare portano ad una variazione del profilo termico del permafrost. Il permafrost, soprattutto se ad alto contenuto di ghiaccio, ha un'inerzia termica elevata, si calcola che lo scioglimento del permafrost avviene infatti in tempi molto lenti da 1 a 15 mm/anno (Lachenbruch *et al.*, 1982; Osterkamp e Gosink, 1991). Se calcoliamo che il 16 % della Lombardia è rappresentata da quote sopra i 1500 m, il 3% è occupato da ghiacciai e glacionevati, il 17 % è possibile sede di permafrost. Se aumentiamo la scala, il 26 % della superficie terrestre è occupata da permafrost, e quello alpino rappresenta più di un terzo del totale. Ciò vuol dire che potenzialmente, seguendo molti modelli climatici questo 20 % di terreno gelato della Lombardia, o un terzo del nostro pianeta, tra centinaia di anni sarà potenzialmente colonizzato da vegetazione, apportando degli effetti *feedback* imprevedibili.

## **7. CONCLUSIONI**

Ripercorrendo i dati presentati con questo lavoro, i risultati del monitoraggio del manto nevoso, del permafrost, della vegetazione e le interazioni che tra essi sono state evidenziate, hanno mostrato come la vegetazione, il regime termico del suolo e i fattori climatici siano molto correlati. In particolare laddove aumenta la biomassa della vegetazione, si riscontra anche un aumento di effetto isolante rispetto al suolo, con feedback sul regime termico del suolo. I vari modelli climatici sottolineano quanto potrà variare un determinato fattore ambientale; questo non porterà cambiamenti solo alla matrice interessata ma a tutto l'ecosistema con effetti che si manifesteranno su tutte le componenti ambientali.

Lo studio dell'evoluzione del manto nevoso, ha mostrato forti correlazioni con il permafrost, quindi con il regime termico dei suoli, il microrilievo e soprattutto con la fenologia della vegetazione. Al contrario si è potuto vedere come la vegetazione può influire anch'essa sul bilancio energetico del suolo, e quindi indirettamente, anche la fenologia può avere delle conseguenze.

Basterebbe la sola relazione del manto nevoso e della temperatura dell'aria con la fenologia per spiegare questo, tuttavia abbiamo potuto vedere che anche il permafrost è legato al manto nevoso, e alla vegetazione.

Il permafrost sul rock glacier Foscagno, ha mostrato una copertura molto sporadica; si è visto che questo influisce sul gradiente termico all'interno del manto nevoso, ed anche sul pattern di accumulo e persistenza. Inoltre la distribuzione di neve e di vegetazione sono strettamente legati. La topografia permette ad una grande varietà di microhabitat di esistere come risultato di una particolare condizione microclimatica.

La degradazione del permafrost che sembrerebbe stia avvenendo nella zona in studio, avrà dei riscontri molto imponenti sulla morfologia del rock glacier, sul tipo di sviluppo dei suoli e quindi sul tipo di colonizzazione vegetale. Come un effetto a catena, un aumento della vegetazione, apporterà una degradazione maggiore del permafrost del rock glacier. Infatti la vegetazione, e in particolare la vegetazione arbustiva, si è visto che ha forti riscontri sul bilancio energetico del suolo. Non da ultimo la fenologia delle specie alpine, si è visto che è fortemente legata al microhabitat, implicando che anche il successo riproduttivo delle specie è la conseguenza di questo equilibrio coi fattori climatici ed edafici, e se tale ambiente venisse a mancare o a modificarsi, andremmo incontro ad una diminuzione della biodiversità e ad una monotonizzazione del paesaggio alpino.

L'aumento di CO<sub>2</sub> e altri gas serra in atmosfera negli ultimi decenni sono la causa degli sconvolgimenti climatici ai quali stiamo assistendo (IPCC, 2001, 2007). I cambiamenti climatici avranno effetti sulla fisiologia, così come sulla fenologia, sulla distribuzione e sugli adattamenti delle specie. Questo porterà ad una modificazione delle interazioni tra le specie, apportando il rischio di spostamenti nella distribuzione e di estinzione. Tutto ciò avrà delle ripercussioni sulla struttura e sulla comunità, e quindi sugli ecosistemi. La fenologia rappresenta in sintesi un'impronta molto importante degli ecosistemi al *global change*, ma bisogna essere consapevoli che, come questo lavoro ha potuto dimostrare, gli ecosistemi sono un raggruppamento di sinergismi, che non devono essere trascurati, bensì devono essere la base per interpretare le dinamiche del clima.

## **8. RINGRAZIAMENTI**

Vorrei esprimere i miei più calorosi ringraziamenti a tutte le persone che mi hanno sostenuto in questo lavoro di tesi, in particolare:

Per l'aiuto e il sostegno sia in fase di raccolta di dati, sia in fase di analisi e scrittura di questo lavoro, e per avermi dato la possibilità di svolgere questo lavoro ringrazio il Professor Guglielmin e la Professoressa Cannone;

Per il sostegno morale, le revisioni in fase di scrittura, ringrazio tutti i familiari e i parenti, in particolare i miei genitori Giancarlo e Natalina, i fratelli e le sorelle, il Raffa, il Gabri, la Lety, l'Ale, la Samu, il cognato Jean Claude, le nipotine Danielle e Rachel;

Per l'appoggio logistico durante le uscite invernali ringrazio la guida alpina Luca Martinelli;

Tutti i miei amici, i miei compagni e le persone che mi sono state vicine;

La "gente del prava";

Il Fra, amico, compagno e collega;

Il CAI Varese per l'appoggio economico.

**9. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI**

- Augspurger Carol K., 2009: “Spring 2007 warmth and frost: phenology, damage and refoliation in a temperate deciduous forest”. *Functional ecology*, 23, 1031-1039.
- Aerts R. *et al.*, 2004 : “Effects of experimentally imposed climate scenarios on flowering phenology and flower production of subarctic bog species”. *Global Change Biology*, 10, 1599-1609.
- Arft A. *et al.*, 1999: “Responses of Tundra plants to experimental warming : Meta-Analysis of the International Tundra Experiment”. *Ecological Monographs*, 69 (n°4), 491-551.
- Badeck F.W., Bondeau A., Böttcher K. *et al*, 2004: “Responses of spring phenology to climate change”. *New Phytologist*, 162, 295-309.
- Beck P.S.A. *et al.*, 2005: “Modelling local distribution of an Arctic dwarf shrub indicates an important role for remote sensing of snow cover”. *Remote sensing of Environment*, 98, 110-121.
- Beniston M., 1997: “Variation of snow depth and duration in the Swiss Alps over the last 50 years: links to changes in large-scale climatic forcings”. *Climatic Change*, 36, 281-300.
- Beniston M., 2003: “Climatic Change in Mountain Regions. A review of possible impacts”. *Climatic Change*, 59, 5-31.
- Burga C.A., Fraunfelder R., Ruffet J., Hoetzle M. & Käab A., 2004: “Vegetation on Alpine rock glacier surfaces: a contribution to abundance and dynamics on extreme plant habitats”. *Flora*, 199, 505-515.
- Calderoni G., Gugliemin M. & Tellini C., 1998: “Radiocarbon Dating and Postglacial Evolution, Upper Valtellina and Livignese Area (Sondrio, Central Italian Alps)”. *Permafrost and Periglacial Process*, 9, 275-284.
- Cannone N., 1997: “Vegetazione periglaciale e crionivale: caratteristiche, modelli di aggregazione e rapporti con forme e processi periglaciali”. *Tesi di Dottorato di Ricerca*, X ciclo, Università degli Studi di Pavia.
- Cannone N., 1999: “Vegetazione e dinamica dei rock glaciers durante l’Olocene in Alta Valtellina (Italia)”. In Orombelli G. (eds): *Studi geografici e geologici in onore di Severino Belloni*, 145-160.
- Cannone N. & Gerdol R., 2003: “Vegetation as an Ecological Indicator of Surface Instability in Rock Glaciers”. *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 35, 384-390.

- Cannone N., Guglielmin M., Hauck C., Muhll V., 2003: "The Impact of recent glacier fluctuation and human activities on permafrost distribution: a case study from Stelvio Pass (Italian Central-Eastern Alps)".
- Cannone N., Guglielmin M., Gerdol R., 2004: "Relationships between vegetation patterns and periglacial landforms in northwestern Svalbard". *Polar biology*, 27 (9), 562-571.
- Cannone N., 2005: "Moss and Lichen Flora of Victoria Land (Continental Antarctica) along a Latitudinal Transect". *Terra Antarctica Reports*, 11, 1-9.
- Cannone N., Sgorbati S., Guglielmin M., 2007: "Unexpected impact of climate change on alpine vegetation". *Frontiers in Ecology and the Environment*, 5, 360-364.
- Cannone N., Diolaiuti G., Guglielmin M., Smiraglia C., 2008: "Accelerating climate change impacts on alpine glacier forefield ecosystems in the European Alps". *Ecological Applications*.
- Cannone N. & Guglielmin M., 2009: "Influence of vegetation on the ground thermal regime in continental Antarctica". *Geoderma*, 151, 215-223.
- Carton A. & Pelfini M., 1991: "Forme del paesaggio d'alta montagna". *Zanichelli ed.*
- Credaro V., 1955: "La vegetazione colonizzatrice ai margini dei ghiacciai del Bernina". *Valtellina e Val Chiavenna*, n.11 Nov.
- Delbart N. & Picard G., 2007: "Modelling the date of leaf appearance in low arctic tundra". *Global Change Biology*, 13, 2551-2562.
- Dirnböck T., Dullinger S., Ginzler C., Gottfried M., Grabherr G., 2003: "Mapping alpine vegetation based on images analysis, topographic variables and Canonical Correspondence Analysis". *Applied Vegetation Science*, 6, 85-96.
- Doležal, Šrútek, 2002: "Altitudinal changes in composition and structure of mountain-temperate vegetation: a case study from the western Carpathians". *Plant Ecology*, 158, 201-221.
- Dramis F. & Guglielmin M., 2001: "Permafrost investigations in the Italian mountains: the state of art". *R. Paepke and Melnikov (eds.), Permafrost Response on Economic Development, Environmental Security and Natural Resources*, 259-273.
- Dunne J.A., Harte J., Taylor K.J., 2003: "Subalpine meadow flowering phenology responses to climate change: integrating experimental and gradient methods". *Ecological Monographs*, 73 (n°1), 69-86.
- Fenaroli L., 1998: "Flora delle Alpi e degli altri monti d'Italia". *Nuova Edizione, Giunti Gruppo Editoriale*, Firenze.
- Ferranti R., 2005: "Flora Alpina di Valtellina e Valchiavenna". *Lysis Edizioni*.

- Forrest J., Inouye D.W., Thomson J.D., 2010: "Flowering phenology in subalpine meadows: Does climate variation influence community co-flowering patterns?". *Ecology*, 91(2), 431-440.
- Galen C. & Stanton M.L., 1995: "Responses of Snowbed Plant Species to Changes in Growing-Season Length". *Ecology*, 76(n°5), 1546-1557.
- Giacomini V., Pignatti S., 1955: "Flora e vegetazione dell'Alta valle del Braulio con speciale riferimento ai pascoli di altitudine". *Mem. Soc. It. Sc. Nat.*, 11, 47-238.
- Gottfried *et al.*, 1998: "Prediction of vegetation patterns at the limits of plant life: a new view of the alpine-nival-ecotone". *Arctic and Alpine research*, 30 (n°3), 207-221.
- Gottfried *et al.*, 1999: "A fine scale predictive model for changes in species distribution patterns of high mountain plants induced by climatic warming". *Diversity and Distribution*, 5 (n°6), 241-251.
- Guglielmin M., 1989: "Carta geomorfologica del Monte Foscagno (Alta Valtellina)". *Natura Bresciana*, 26 ann. Mus. Civ. Sc. Nat.
- Guglielmin M. & Tellini C., 1992: "Contributo alla conoscenza dei rock glaciers delle Alpi Italiane-I rock glaciers del Livignasco (Alta Valtellina)". *Rivista Geografica Italiana*, 99, 395-414.
- Guglielmin M. & Tellini C., 1995: "Relazioni tra Permafrost alpino e copertura nevosa: risultati preliminary (area del Foscagno, Sondrio, Italia)". *Geograf. Fis. Dinam, Quat.*, 18, 25-29.
- Guglielmin M., 1997: "Il permafrost alpino. Concetti, morfologia e metodi di individuazione (Con tre indagini esemplificative in Alta Valtellina)". *Quad. Geodinamica Alpina e Quaternaria*, Milano, vol.5.
- Guglielmin M., Cannone N., Dramis F., 2001: "Permafrost-Glacial evolution during the Holocene in the Italian Central Alps". *Permafrost Periglac. Process.*, 12, 111-124.
- Guglielmin M., Aldighieri B., Testa B., 2002: "Permaclim: a model for the distribution of mountain permafrost, based on climatic observation". *Geomorphology*, 51,245-257.
- Guglielmin M., 2004: "Observation on permafrost ground thermal regimes from Antarctica and the Italian Alps, and their relevance to global climate change". *Global and Planetary Change*, 40, 159-167.
- Guglielmin M., Camusso M., Polesello S. & Valsecchi S., 2004: "An old Relict Glacier Body Preserved in Permafrost Environment: The Foscagno Rock Glacier Ice Core (Upper Valtellina, Italian Central Alps)". *Artic, Antarctic and Alpine Research*, 36 (n°1), 108-116.

- Guglielmin M., J.C. Ellis Evans & N.Cannone, 2005: "Interaction between Climate, Vegetation and Active Layer in Maritime and Continental Antarctica for Climate Change Monitoring". *Terra Antarctica Reports*, 11, 15-26.
- Guisan A. & Theurillat J.P., 2000: "Assessing alpine plant vulnerability to climate change: a modeling perspective". *Integrated Assesment*, 1, 307-320.
- Hiltbrunner E., Schwikowski M., Körner C., 2005: "Inorganic nitrogen storage in alpine snow pack in the Central Alps (Switzerland)". *Atmospheric Environment*, 39, 2249-2259.
- Hoersch B., Braun G., Schmidt U., 2002: "Relation between landform and vegetation in alpine regions of Wallis, Switzerland. A multiscale remote sensing and Gis approach". *Computers, Environment and Urban Systems*, 26, 113-139.
- Hovenden M., Wills K., Vander Schoor J.K., Williams A.L., Newton P.C.D., 2008: "Flowering phenology in a species-rich temperate grassland in sensitive to warming but not elevated CO<sub>2</sub>". *New Phytologist*, 178, 815-822.
- Huelber *et al.*, 2006: "Phenological responses of snowbed species to snow removal dates in the Centra Alps: implication for climate warming". *Arctic, Antarctic and Alpine Research*, 38 (n°1), 99-103.
- Hülber K., Winkler M. & Grabherr G., 2010: "Intraseasonal climate and habita-specific variability controls the flowering phenology of high plant species". *Functional Ecology*, 24, 245-252.
- Jonas T., Rixen C., Sturm M., Stoeckli V., 2008: "How alpine plant growth is linked to snow cover and climate variability". *Journal of geophysical research*, 113, G03013.
- Keller F., Goyette S. & Beniston M., 2005: "Sensitivity analysis of snow cover to climate change scenarios and their impact on plant habitats in alpine terrain". *Climatic Change*, 72, 299-319.
- Keller F. & Körner C., 2003: "The role of Photoperiodism in Alpine Plant Development". *Artic, Antartic and Alpine research*, 35(n°3), 361-368.
- Körner C., 1999: "Alpine Plant Life-Functional Plant Ecology of High Mountain Ecosystems". *Springer, second edition*.
- Kudo G. & Suzuki S., 2002: "Relationships between Flowering Phenology and Fruit-set of Dwarf Shrubs in Alpine Fellfields in Northern Japan: a comparison with a Subarctic Heathland in Northern Sweden". *Arctic, Antartctic, and Alpine Rresearch*, Vol 34, n° 2, 185-190.

- Kullman L., 2002: "Rapid recent range-margin rise of tree and shrub species in the Swedish Scandes". *Journal of Ecology*, 90, 68-77.
- Lading U., Wagner J., 2006: "Timing of reproductive success in the high mountain plant *Saxifraga bryoides* L." *Plant Biology*, 9, 683-693.
- Larl L., Wagner J., 2006: "Timing of Reproductive and vegetative development in *Saxifraga oppositifolia* in Alpine and subnival climate". *Plant Biology*, 9, 155-166.
- Lopez-Moreno J.I., Goyette S., Beniston M., 2009: "Impact of climate change on snowpack in the Pyrenees: Horizontal spatial variability and vertical gradients". *Journal of Hydrology*, 374, 384-396.
- Luckman B. & Kavanagh T., 2000: "Impact of climate fluctuations on mountain environments in the Canadian Rockies". *Ambio*, 29.
- Martin M., Gavazov K., Korner C. *et al* , 2010: "Reduced early growing season freezing resistance in alpine treeline plants under elevated atmospheric CO<sub>2</sub>". *Global Change Biology*, 16, 1057-1070.
- Matthews J.A., 1992: "The Ecology of Recently-Deglaciated Terrain-A geocological approach to glacier forelands and primary succession." *Cambridge studies in ecology*.
- Menzel A., 2000: "Trend in phenological phases in Europe between 1951 and 1996". *Int J. Biometeorol*, 44, 76-81.
- Menzel A., Sparks T., Estrella N. *et al* , 2006: "European phenological response to climate change matches the warming pattern" . *Global Change Biology*, 12, 1969-1976.
- Miglietta F., Vaccari F.P., Gioli B., Ewert F., Porter J., 2008: "Fenologia del frumento: ricerca ed applicazioni avanzate per lo studio degli effetti del cambiamento climatico in agricoltura e per la protezione delle piante"
- Muller P. & Gusewell S., 2003: "Predicting the species richness of Alpine pastures using indicator species". *Bulletin of the Geobotanical Institute ETH*, 69, 107-116.
- Nangeroni G., 1954: "Neve, acqua, ghiaccio. Fenomeni crionivali delle regioni periglaciali delle Alpi Italiane". Como.
- Palmer W.H., Miller A.K., 1961: "Botanical evidence for the recession of a glacier". *Oikos*, 12:I, 75-86.
- Pfeffer K., Pebesma E.J., Burrough P.A., 2003: "Mapping Alpine vegetation using vegetation observations and topographic attributes". *Landscapes Ecology*, 18, 759-776.
- Phoenix G. *et al.*, 2001 : « Effects of global change on a sub-Arctic health : effects of enhanced UV-B radiation and increased summer precipitation". *The Journal of Ecology*, 89 (n°2), 256-267.

- Pietracarpina A., 1963: "I fenomeni crionivali dei monti a Ovest dell'Ortles-Cevedale (Alpi Retiche)". *Studi Sassaesi*, XI, 3-26.
- Pignatti S., 1982: "La flora d'Italia." *Edagricoltore*.
- Pirola A., 1959: "Flora e Vegetazione periglaciale sul versante meridionale del Bernina". *Flora et Vegetatio Italica*, 1, 115.
- Pirola A., Credaro V., 1993: "Changes in the vegetation of a recent glacier moraine in the Bernina Group". *Annali di Botanica*, LI, 145-153.
- Pirola A., Credaro V., 1994: "Osservazioni sul dinamismo della vegetazione di morena recente nel gruppo del Bernina". *Fitosociologia*, 27, 139-149.
- Price M. & Waser N., 2000: "Response of subalpine meadow vegetation to four years of experimental warming". *Ecological Applications*, 10 (n°3), 811-823.
- Ozenda P., 1985: "La végétation de la chaîne alpine-dans l'espace montagnard européen". *Ed Masson*
- Polunin O. & Walters M., 1992 : "Guida alle vegetazioni d'Europa". *Ed.Zanichelli*.
- Pomeroy J.W. *et al.*, 2006: "Srhub tundra snowmelt". *Hydrological processes*, 20, 923-941.
- Price M., Waser N., 2000: "Response of subalpine meadow vegetation to four years of experimental warming". *Ecological Applications*, 10 (n°3), 811-823.
- Ramming A., Jonnas T., Zimmermann N. E., Rixen C., 2009: "Changes in Alpine Plant growth under future climate conditions". *Biogeosciences Discuss.*, 6, 10817-10847.
- Reisigl H. & Keller R., 1990: „Fiori e Ambienti delle Alpi“. *Arti grafiche Saturnia*, Trento.
- Salick J., Zhendong F., Big A., 2009: "Eastern Himalayan plant ecology, Tybetan ethnobotany, and climatic change". *Global Enviromental Change*, 19, 147-155.
- Seppi R., Baroni C., Carton A., Bassi L., 2004: "Caratteristiche morfodinamiche di due rock glaciers attivi nel gruppo Adamello-Presanella". *Studi Trent. Sci. Nat., Acta geol*, 81, 75-85.
- Sherry R. *et al.*, 2007: "Divergence of reproductive phenology under climate warming". *PNAS* January 2, 104 (n°1), 198-202.
- Spanna F. *et al*, 2009: "Effetti della variabilità climatica nelle aree olivicole piemontesi".
- Studer S., Appenzeller C., Defila C., 2005: "Inter annual variability and decadal trends in alpine spring phenology: a multivariate analysis approach". *Climate Change*, 73, 395-414.

- Sturm M. *et al.*, 2005 : “Chaging snow and srhub conditions affect albedo with global implications”. *Journal of Geophysical Research*, 110.
- Suzuki S. & Kudo G., 1997: “Short term effects of simulated environmental change on phenology, leaf traits, and shoot growth of alpine plants on a temperate mountain, northern Japan”. *Global Change Biology*, 3, 108-115.
- Theurillat J.P. & Guisan A., 2001 : “Potential impacts of climate change on vegetation in the European central Alps: a review”. *Climatic Change*, 50, 77-109.
- Thórhallsdóttir T., 1998: “Flowering phenology in the central highland of Iceland and implications for climatic warming in the Antarctic”. *Oecologia*, 114, 43-49.
- Wada N., Shimono M., Miyamoto M., Kojima S., 2002: “Warming effects on shoot developepmental growth and biomass production in sympatric evergreen alpine dwarf shrubs *Empetrum nigrum* and *Loiseleuria procumbens*”. *Ecological Research*, 17, 125-132.
- Walker D.A., Halfpenny James C., Walker Marilyn D., Wessman Carol A., 1993: “Long term studies of Snow-Vegetation interactions”. *American Institute of Biological Sciences*, 43, 287-301.
- Walther G., 2003: “Plants in a warmer world”. *Urban and Fisher Verlag*, 6/3, 169-185.
- Wipf S. & Rixen C., 2010: “A review of snow manipulation experiments in Artctic and Alpine tundra ecosystems”. *Polar research*, 29, 95-109.
- Wipf S., Rixen C., Mulder C., 2006: “Andvanced snowmelt causes shift towards positive neighbour interactions in a sbarctic tundra community”. *Global Change Biology*, 12, 146-150.

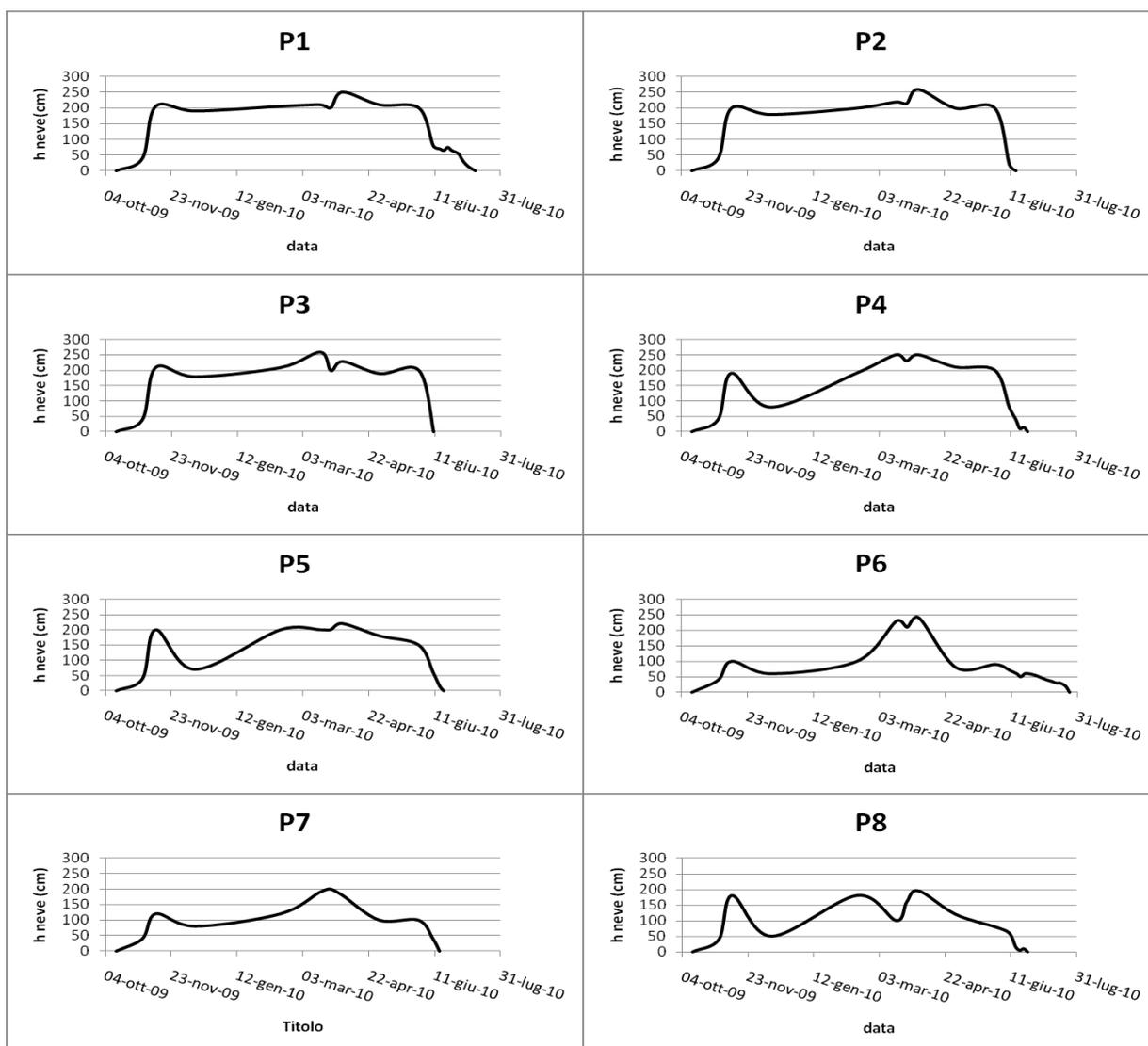
**10. APPENDICI**

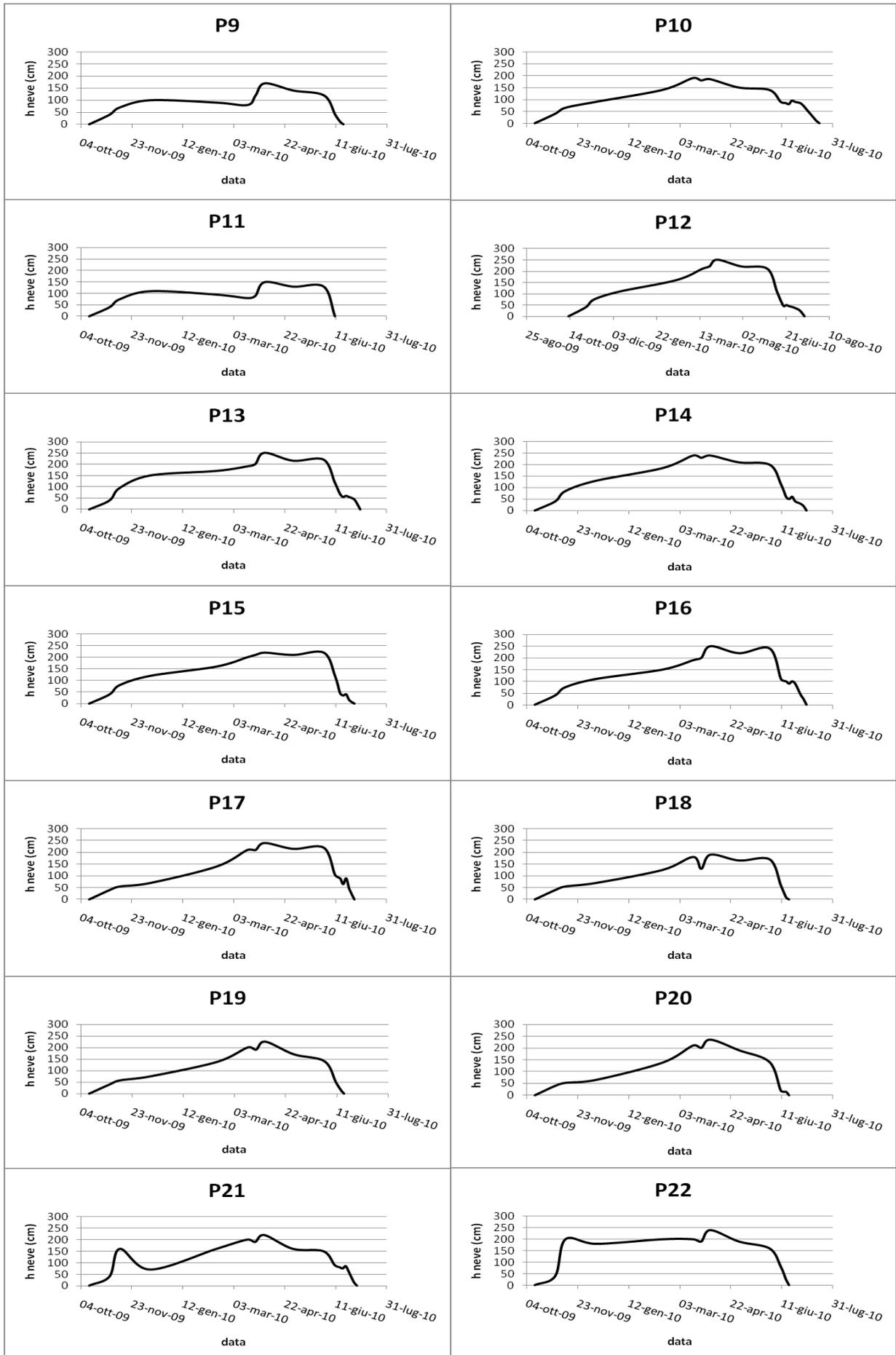
**Appendice A.1:** *parametri di spessore nivale considerati per lo studio dell'evoluzione e della distribuzione del manto nevoso*

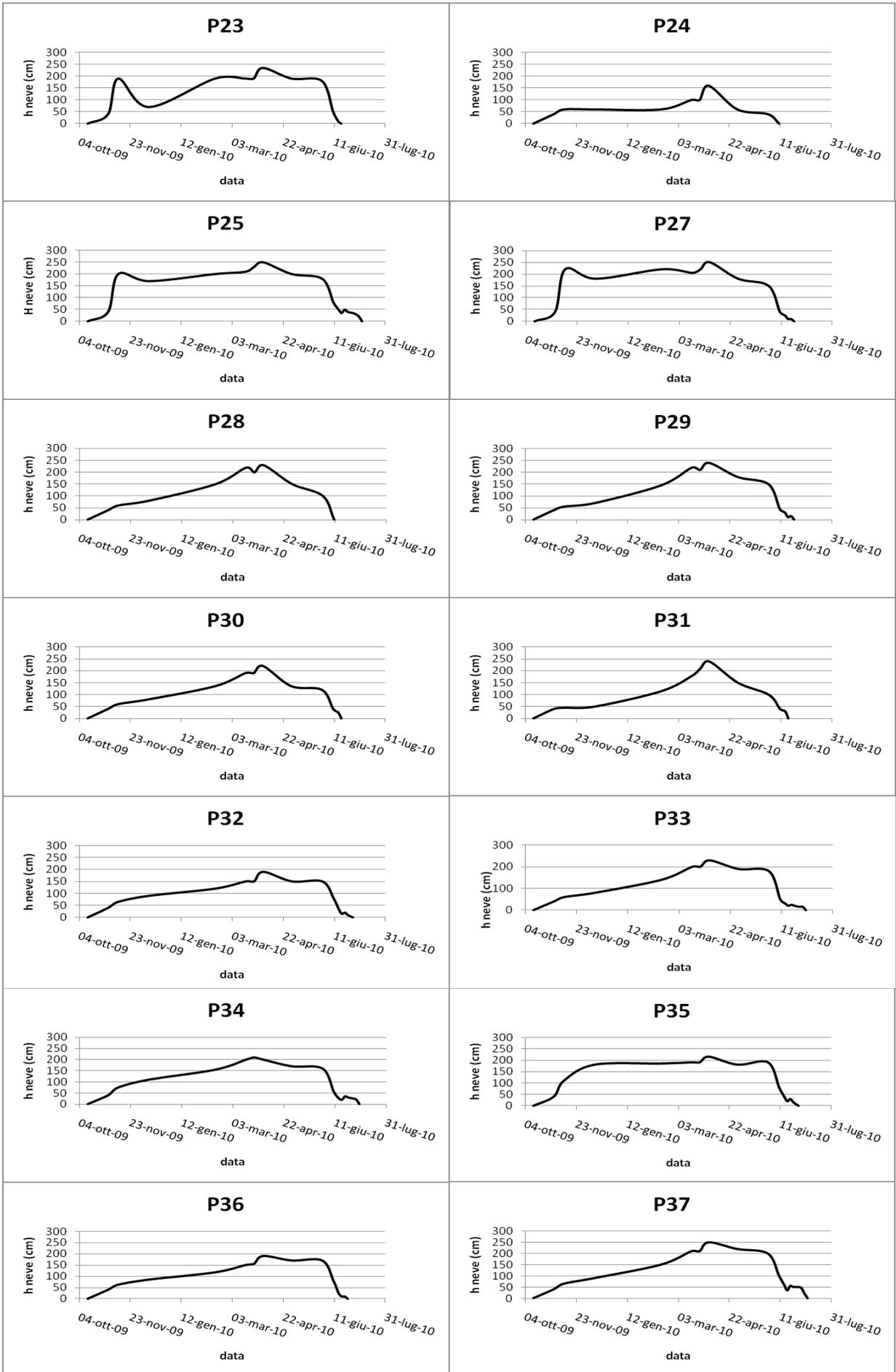
palina	< 10 cm			tra 10 e 80 cm			>80 cm		
	inizio	fine	n°giorni	inizio	fine	n°giorni	inizio	fine	n°giorni
P1	193	196	3	166	193	27	307	166	224
P2	166	169	3	160	166	6	307	160	218
P3	163	166	3	155	163	8	307	155	213
P4	172	180	8	166	172	6	307	166	224
P5	169	172	3	162	169	7	307	162	220
P6	208	210	2	164	208	44	310	164	219
P7	167	169	2	160	167	7	310	160	215
P8	175	180	5	150	175	25	307	150	208
P9	177	180	3	158	177	19	320	158	203
P10	199	203	4	172	199	27	335	172	202
P11	163	166	3	154	163	9	320	154	199
P12	195	196	1	168	195	27	320	168	213
P13	187	189	2	168	187	19	310	168	223
P14	187	189	2	162	187	25	310	162	217
P15	181	183	2	168	181	13	315	168	218
P16	187	189	2	178	187	9	320	178	223
P17	182	183	1	176	182	6	350	176	191
P18	169	172	3	164	169	5	350	164	179
P19	170	172	2	161	170	9	350	161	176
P20	170	172	2	153	170	17	350	153	168
P21	184	186	2	169	184	15	307	169	227
P22	170	172	2	166	170	4	307	166	224
P23	169	172	3	160	169	9	307	160	218
P24	163	166	3	105	163	58	50	105	55
P25	191	193	2	166	191	25	310	166	221
P27	175	180	5	163	175	12	310	163	218
P28	163	166	3	152	163	11	345	152	172
P29	172	180	8	160	172	12	350	160	175
P30	170	172	2	153	170	17	345	153	173
P31	171	172	1	151	171	20	355	151	161
P32	180	183	3	166	180	14	340	166	191
P33	186	189	3	162	186	24	345	162	182
P34	187	189	2	161	187	26	320	161	206
P35	180	183	3	166	180	14	310	166	221
P36	175	180	5	166	175	9	340	166	191
P37	189	193	4	167	189	22	340	167	192
P38	187	189	2	170	187	17	340	170	195
P39	190	193	3	167	190	23	320	167	212
P40	189	193	4	180	189	9	320	180	225
P41	188	189	1	169	188	19	320	169	214
P42	191	193	2	175	191	16	320	175	220
P43	184	186	2	169	184	15	315	169	219
P44	189	193	4	168	189	21	340	168	193
P45	203	206	3	167	203	36	350	167	182
P46	191	193	2	169	191	22	312	169	222
P47	203	206	3	168	203	35	312	168	221
P48	181	183	2	167	181	14	320	167	212
P49	187	189	2	167	187	20	350	167	182
P50	210	213	3	175	210	35	320	175	220
P51	191	193	2	167	191	24	340	167	192
G1	177	183	6	153	177	24	345	153	173
G2	187	189	2	151	187	36	320	151	196
G3	170	172	2	162	170	8	345	162	182

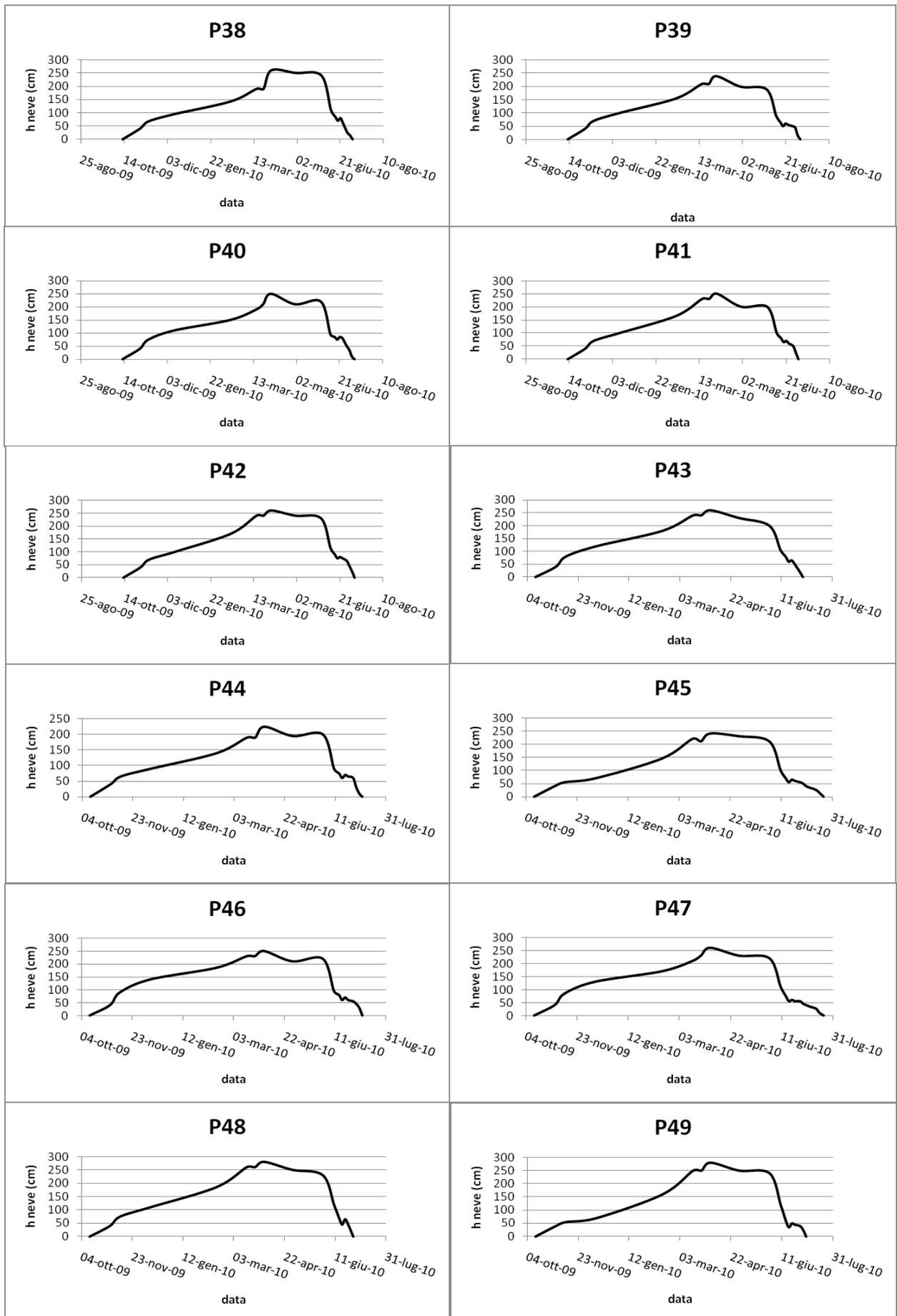
G4	181	183	2	164	181	17	350	164	179
G5	191	193	2	168	191	23	350	168	183
G6	179	183	4	167	179	12	315	167	217
G7	191	193	2	167	191	24	350	167	182
G8	194	196	2	167	194	27	350	167	182
G9	192	193	1	167	192	25	320	167	212
G10	184	186	2	168	184	16	340	168	193
G11	168	169	1	152	168	16	345	152	172
G12	197	199	2	166	197	31	310	166	221
G13	163	166	3	152	163	11	307	152	210
G14	191	193	2	164	191	27	315	164	214
G15	170	172	2	153	170	17	315	153	203
G16	201	203	2	168	201	33	312	168	221
G17	200	203	3	168	200	32	312	168	221
G18	194	196	2	169	194	25	312	169	222
G19	187	189	2	181	187	6	312	181	234

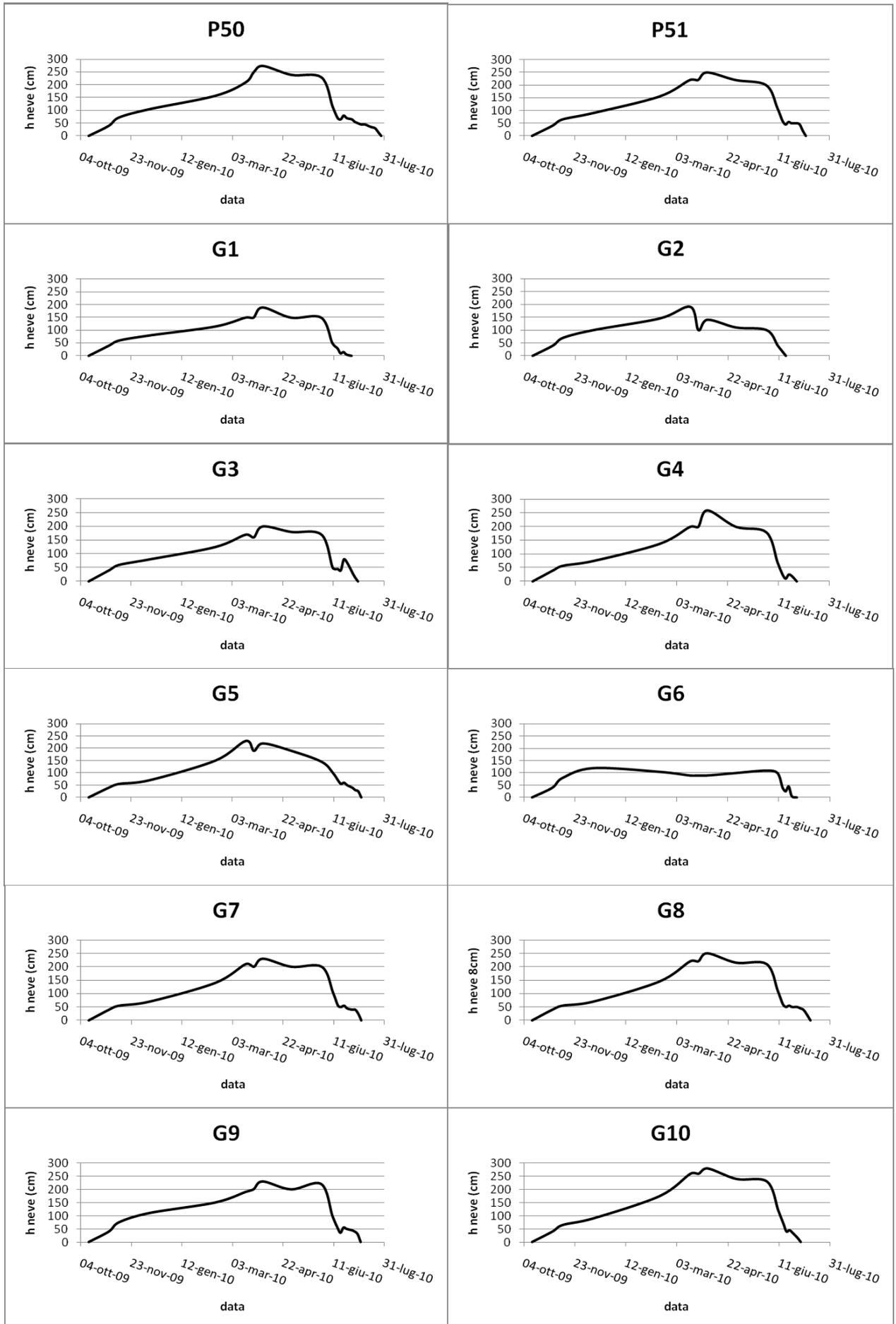
**Appendice A.2:** grafici rappresentanti l'andamento del manto nevoso nei 69 punti in studio in Vallaccia Bormina (periodo dal 12 ottobre 2009 al 25 luglio 2010)

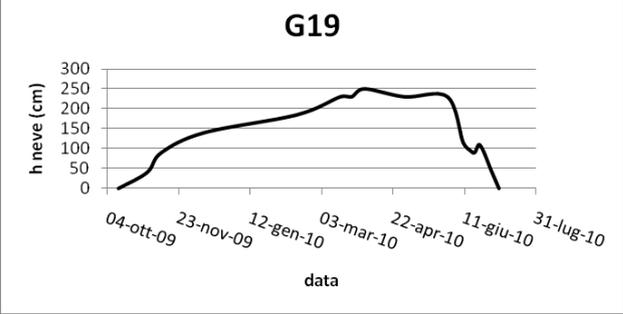
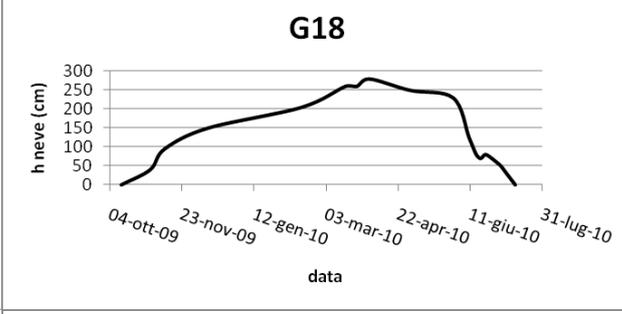
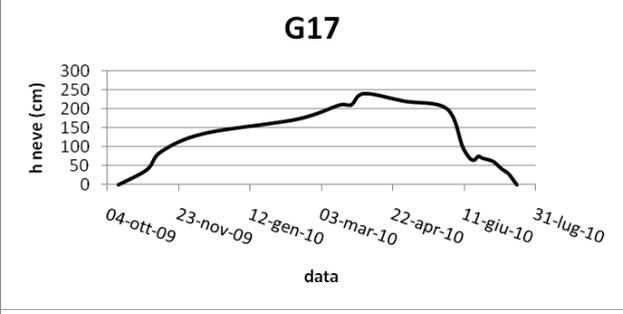
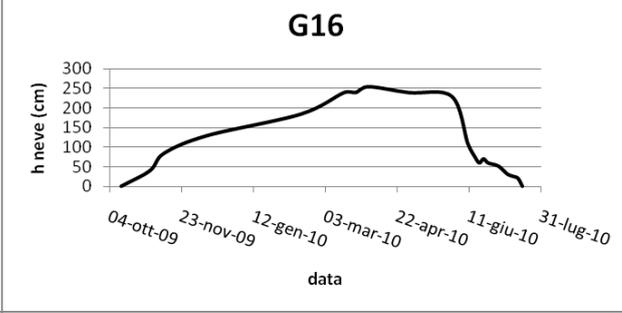
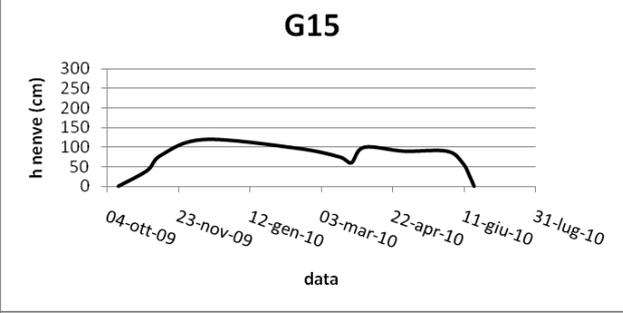
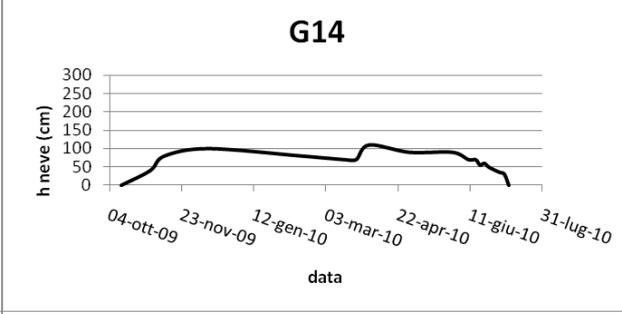
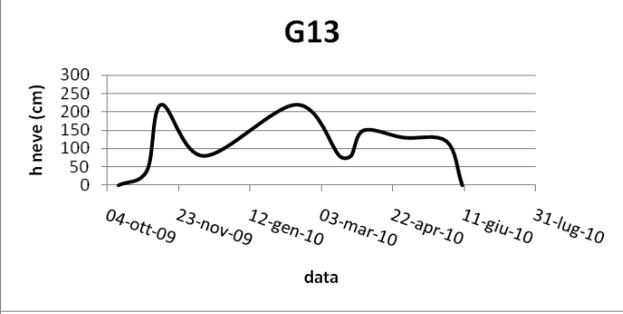
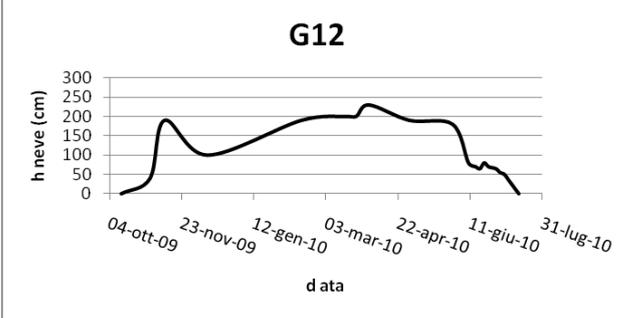
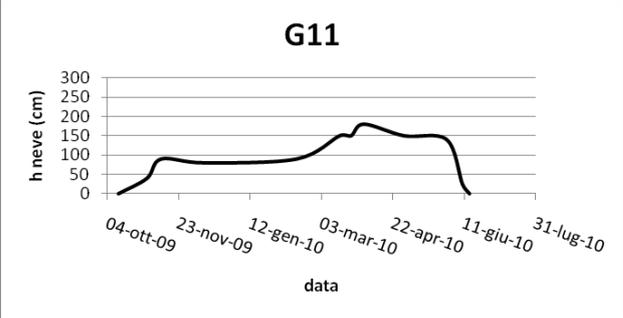












**Appendice A.3:** record delle misurazioni del manto nevoso del periodo compreso tra il 12 ottobre 2009 e il 25 luglio 2010

palina	12-ott- 2009	01-nov- 2009	11-nov- 2009	11-dic- 2009	14-feb- 2010	16-mar- 2010	24-mar- 2010	02-apr- 2010	30-apr- 2010	30-mag- 2010	10-giu- 2010	15-giu- 2010	18-giu- 2010	21-giu- 2010	24-giu- 2010	29-giu- 2010	02-lug- 2010	05-lug- 2010	08-lug- 2010	12-lug- 2010	15-lug- 2010	18-lug- 2010	22-lug- 2010	25-lug- 2010
P1	0	40	205	190	205	210	200	250	210	200	80	70	65	75	65	55	35	20	10	0				
P2	0	40	200	180	200	220	215	260	200	200	20	0												
P3	0	40	210	180	210	260	200	230	190	200	0													
P4	0	40	190	80	190	250	230	250	210	200	80	40	10	15	0									
P5	0	40	200	70	200	200	200	220	180	150	60	15	0											
P6	0	40	100	60	100	230	210	240	80	90	70	60	50	60	60	55	50	45	40	35	30	30	20	0
P7	0	40	120	80	120	190	200	180	100	100	40	0												
P8	0	40	180	50	180	100	160	195	120	80	60	15	5	10	0									
P9	0	40	70	100	90	80	120	170	140	120	40	10	0											
P10	0	40	65	90	140	190	180	185	150	140	90	85	80	95	90	85	75	60	45	25	10	0		
P11	0	40	75	110	95	80	90	150	130	130	0													
P12	0	40	75	110	160	210	220	250	220	210	110	65	45	50	45	40	35	30	20	0				
P13	0	40	95	150	170	190	200	250	215	220	120	70	55	60	55	45	25	0						
P14	0	40	85	130	185	240	230	240	210	200	115	60	50	60	40	30	20	0						
P15	0	40	80	120	160	200	210	220	210	220	120	45	35	40	15	0								
P16	0	40	75	110	150	190	200	250	220	240	110	100	90	100	90	45	25	0						
P17	0	40	55	70	140	210	210	240	215	220	105	90	65	90	45	0								
P18	0	40	55	70	125	180	130	190	165	170	60	10	0											
P19	0	40	58	75	138	200	190	225	170	140	50	15	0											
P20	0	40	53	65	138	210	200	235	190	140	20	15	0											
P21	0	40	160	70	160	200	190	220	160	150	90	80	75	85	60	15	0							
P22	0	40	200	180	200	200	190	240	190	160	80	25	0											
P23	0	40	190	70	190	190	190	235	190	180	50	10	0											
P24	0	40	60	60	60	100	100	160	60	40	0													
P25	0	40	200	170	200	210	230	250	200	180	80	50	35	50	40	35	30	20	0					
P27	0	40	220	180	220	205	220	250	180	150	40	25	10	10	0									
P28	0	40	60	80	150	220	200	230	150	100	0													
P29	0	40	55	70	145	220	210	240	180	150	45	30	10	15	0									
P30	0	40	60	80	135	190	190	220	135	120	40	25	0											
P31	0	40	45	50	115	180	210	240	150	100	40	30	0											
P32	0	40	65	90	120	150	150	190	150	150	80	35	15	20	10	0								
P33	0	40	60	80	140	200	200	230	190	180	50	30	20	25	20	15	15	0						
P34	0	40	75	110	155	200	210	200	170	160	55	25	20	35	30	25	20	0						
P35	0	40	110	180	185	190	190	215	180	190	80	40	20	30	15	0								
P36	0	40	63	85	118	150	155	190	170	170	80	25	10	10	0									
P37	0	40	65	90	150	210	210	250	220	200	100	60	35	55	50	50	45	20	0					
P38	0	40	68	95	143	190	190	260	250	240	110	85	70	80	60	25	15	0						

palina	12-ott-2009	01-nov-2009	11-nov-2009	11-dic-2009	14-feb-2010	16-mar-2010	24-mar-2010	02-apr-2010	30-apr-2010	30-mag-2010	10-giu-2010	15-giu-2010	18-giu-2010	21-giu-2010	24-giu-2010	29-giu-2010	02-lug-2010	05-lug-2010	08-lug-2010	12-lug-2010	15-lug-2010	18-lug-2010	22-lug-2010	25-lug-2010
P39	0	40	70	100	155	210	210	240	200	190	90	65	50	60	55	50	45	15	0					
P40	0	40	75	110	150	190	210	250	210	220	95	85	75	85	80	50	35	10	0					
P41	0	40	70	100	165	230	230	250	200	200	100	80	65	70	60	50	25	0						
P42	0	40	70	100	170	240	240	260	240	230	115	90	75	80	75	65	45	25	0					
P43	0	40	80	120	180	240	240	260	230	200	105	80	60	65	50	20	0							
P44	0	40	65	90	140	190	190	225	195	200	90	75	60	70	65	60	30	10	0					
P45	0	40	55	70	145	220	210	240	230	210	100	70	55	65	60	55	50	40	35	30	25	15	0	
P46	0	40	90	140	185	230	230	250	210	220	95	80	60	70	60	55	45	30	0					
P47	0	40	85	130	170	210	230	260	230	220	110	75	55	60	55	55	45	40	35	30	25	10	0	
P48	0	40	75	110	185	260	260	280	250	230	120	70	45	65	45	0								
P49	0	40	55	70	160	250	250	280	250	240	120	60	35	50	45	40	25	0						
P50	0	40	73	105	158	210	250	275	240	230	115	70	65	80	70	65	55	50	45	45	40	35	30	15
P51	0	40	65	90	155	220	220	250	220	200	110	60	45	55	50	50	45	20	0					
G1	0	40	60	80	115	150	150	190	150	150	50	30	10	15	5	0								
G2	0	40	70	100	145	190	100	140	110	100	40	15	0											
G3	0	40	60	80	125	170	160	200	180	170	50	45	40	80	70	35	15	0						
G4	0	40	58	75	138	200	200	260	200	180	70	25	10	25	20	0								
G5	0	40	55	70	150	230	190	220	190	145	100	70	55	60	50	40	30	25	0					
G6	0	40	80	120	105	90	90	90	100	110	100	40	25	45	5	0								
G7	0	40	55	70	140	210	200	230	200	200	105	55	50	55	45	40	40	25	0					
G8	0	40	55	70	145	220	220	250	215	210	110	60	50	55	50	50	45	40	25	0				
G9	0	40	75	110	150	190	200	230	200	220	100	55	35	55	50	45	40	30	0					
G10	0	40	65	90	175	260	260	280	240	230	120	70	40	45	35	15	0							
G11	0	40	90	80	90	150	150	180	150	140	25	0												
G12	0	40	190	100	190	200	200	230	190	180	80	70	65	80	70	65	55	50	35	15	0			
G13	0	40	220	80	220	80	80	150	130	120	0													
G14	0	40	80	100	80	70	70	110	90	90	70	70	55	60	50	40	35	30	0					
G15	0	40	80	120	98	75	60	100	90	90	60	25	0											
G16	0	40	85	130	185	240	240	255	240	230	110	75	60	70	60	55	50	40	30	25	20	0		
G17	0	40	88	135	173	210	210	240	220	200	100	70	65	75	70	65	60	50	40	30	15	0		
G18	0	40	95	150	205	260	260	280	250	230	125	80	70	80	75	60	50	35	20	0				
G19	0	40	90	140	185	230	230	250	230	230	115	95	90	110	95	50	25	0						

**Appendice A.4:** dati base dell'innevamento delle 69 paline in studio

**BASE DATI NEVE - PALINE**

<b>PALINE</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>	<b>11</b>
<i>INIZIO INNEVAMENTO (numero giorno)</i>	315	315	315	315	315	315	315	315	315	315	315
<i>FINE INNEVAMENTO (numero giorno)</i>	193	169	166	175	169	206	166	175	180	199	166
<i>DURATA INNEVAMENTO (N° di gg)</i>	243	219	216	225	219	256	216	225	230	249	216
<i>INIZIO INNEVAMENTO (data)</i>	1-nov-09										
<i>FINE INNEVAMENTO (data)</i>	12-lug-10	15-giu-10	10-giu-10	24-giu-10	18-giu-10	25-lug-10	15-giu-10	24-giu-10	29-giu-10	18-lug-10	10-giu-10
<i>Altezza MAX</i>	250	260	260	250	220	240	200	195	170	190	150
<i>Altezza MIN</i>	10	20	180	10	15	20	40	5	5	10	5
<i>Altezza MED</i>	126	188	210	145	150	82	126	96	73	99	99
<i>STAND DEV</i>	83,04	66,90	25,07	93,02	73,43	64,58	54,11	70,39	61,21	53,58	48,17
<i>QUOTA</i>	2356,74	2359,27	2364,18	2368,82	2424,00	2410,77	2414,00	2410,00	2502,37	2504,55	2512,59
<i>PENDENZA</i>	7	6	10	11	5	5	10	10	3	5	1

<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>	<b>19</b>	<b>20</b>	<b>21</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>24</b>	<b>25</b>	<b>27</b>
315	315	315	315	315	315	315	315	315	315	315	315	315	315	315
193	186	186	180	186	180	169	169	183	169	169	166	189	175	166
243	236	236	230	236	230	219	219	233	219	219	216	239	225	216
1-nov-09														
12-lug-10	05-lug-10	05-lug-10	29-giu-10	05-lug-10	29-giu-10	18-giu-10	18-giu-10	18-giu-10	02-lug-10	18-giu-10	18-giu-10	10-giu-10	08-lug-10	24-giu-10
250	250	240	220	250	240	190	225	235	220	240	235	160	250	250
20	25	20	15	25	45	10	15	15	15	25	10	40	20	10
111	127	125	130	136	142	122	133	121	123	167	150	80	124	143
85,73	79,91	87,46	84,66	74,53	75,87	66,87	77,27	92,26	61,89	64,64	76,10	38,54	86,61	93,31
2527,75	2537,07	2570,00	2544,49	2545,36	2528,46	2498,16	2492,77	2470,00	2362,74	2375,22	2388,48	2390,31	2389,13	2431,41
35	10	30	1	40	35	2	4	30	14	2	3	6	3	3

<b>43</b>	<b>44</b>	<b>45</b>	<b>46</b>	<b>47</b>	<b>48</b>	<b>49</b>	<b>50</b>	<b>51</b>	<b>G1</b>	<b>G2</b>	<b>G3</b>	<b>G4</b>	<b>G5</b>	<b>G6</b>
315	315	315	315	315	315	315	315	315	315	315	315	315	315	315
183	189	203	189	203	180	186	210	189	169	186	180	189	180	189
233	239	253	239	253	230	236	260	239	219	236	230	239	230	239
1-nov-09														
02-lug-10	08-lug-10	22-lug-10	08-lug-10	22-lug-10	29-giu-10	05-lug-10	29-lug-10	08-lug-10	29-giu-10	18-giu-10	05-lug-10	29-giu-10	08-lug-10	29-giu-10
260	225	240	250	260	280	280	275	250	190	190	200	260	230	120
20	10	15	30	10	45	25	15	20	5	15	15	10	25	5
139	111	99	127	104	158	132	105	117	89	99	100	115	102	74
88,34	72,53	81,11	82,66	85,53	97,48	103,33	84,84	84,59	69,96	54,28	65,87	93,17	76,09	38,33
2530,00	2518,00	2524,45	2544,49	2514,74	2516,43	2503,68	2496,00	2510,00	2491,00	2497,00	2488,12	2491,12	2464,17	2439,88
30	3	10	5	1	5	1	10	4	3	3	7	3	12	5

<b>28</b>	<b>29</b>	<b>30</b>	<b>31</b>	<b>32</b>	<b>33</b>	<b>34</b>	<b>35</b>	<b>36</b>	<b>37</b>	<b>38</b>	<b>39</b>	<b>40</b>	<b>41</b>	<b>42</b>
315	315	315	315	315	315	315	315	315	315	315	315	315	315	315
175	169	169	180	186	186	180	180	175	189	186	189	189	186	189
225	219	219	230	236	236	230	230	225	239	236	239	239	236	239
1-nov-09														
10-giu-10	24-giu-10	18-giu-10	18-giu-10	29-giu-10	05-lug-10	05-lug-10	29-giu-10	24-giu-10	08-lug-10	05-lug-10	08-lug-10	08-lug-10	05-lug-10	08-lug-10
230	240	220	240	190	230	210	215	190	250	260	240	250	250	260
80	10	25	5	10	15	20	15	10	20	15	15	10	25	25
163	117	125	112	95	97	97	121	105	114	128	113	122	128	134
63,46	92,05	72,56	86,17	66,50	87,52	79,47	82,49	71,24	83,56	86,35	78,34	77,94	80,92	86,24
2470,00	2495,00	2375,00	2509,98	2492,00	2497,24	2485,00	2494,14	2500,07	2498,96	2511,27	2519,44	2515,00	2518,77	2523,33
7	10	2	7	2	10	1	3	10	15	5	3	15	10	2

G7	G8	G9	G10	G11	G12	G13	G14	G15	G16	G17	G18	G19
315	315	315	315	315	315	315	315	315	315	315	315	315
193	193	189	183	166	196	166	189	169	199	199	193	186
243	243	239	233	216	246	216	239	219	249	249	243	236
1-nov-09												
08-lug-10	12-lug-10	08-lug-10	02-lug-10	15-giu-10	15-lug-10	10-giu-10	08-lug-10	24-giu-10	18-lug-10	18-lug-10	12-lug-10	05-lug-10
230	250	230	280	180	230	220	110	120	255	240	280	250
25	25	30	15	5	15	80	30	10	20	15	20	25
109	111	111	140	106	115	135	69	70	114	109	135	145
79,04	84,12	78,43	104,43	58,11	70,60	58,55	22,99	35,44	89,23	76,12	94,42	78,27
2515,00	2513,00	2505,79	2518,30	2519,95	2516,38	2519,48	2520,72	2527,06	2538,32	2539,96	2577,32	2596,52
20	10	11	3	17	13	8	20	7	1	6	5	14

***Appendice A.5: caratterizzazione dei punti in studio***

PALINE	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
<b>QUOTA</b>	2356,74	2359,27	2364,18	2368,82	2424,00	2410,77	2414,00	2410,00	2502,37	2504,55	2512,59	2527,75	2537,07
<b>PENDENZA</b>	7	6	10	11	5	5	10	10	3	5	1	35	10
<b>Localizzazione</b>	FON_VALL	FON_VALL	FON_VALL	FON_VALL	R_G_I	R_G_I	R_G_I	R_G_I	R_G_A	R_G_A	R_G_A	R_G_A	R_G_A
<b>esposizione</b>	Est	Est	Nord-E	Nord	Nord	Nord	West	Nord-E	Sud-E	Est	Sud-E	Nord-W	Nord-E
<b>esposizione (°)</b>	90	90	45	360	360	360	270	45	135	90	135	315	45

LEGENDA	
<b>Fon-Val</b>	Fondovalle
<b>Mor-Ant</b>	Morena antica

<b>R-G_A</b>	Rock glacier attivo
<b>R_G_I</b>	Rock glacier inattivo
<b>P_R_G_I</b>	Piedi del rock glacier inattivo

14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	27	28	29
2570,00	2544,49	2545,36	2528,46	2498,16	2492,77	2470,00	2362,74	2375,22	2388,48	2390,31	2389,13	2431,41	2470,00	2495,00
30	1	40	35	2	4	30	14	2	3	6	3	3	7	10
R_G_A	R_G_A	R_G_A	R_G_A	MOR_ANT	MOR_ANT	MOR_ANT	FON-VAL	FON-VAL	FON-VAL	P_R_G_I	P_R_G_I	MOR_ANT	MOR_ANT	MOR_ANT
Nord	Est-N/E	Nord	Nord-E	SUD_W	Est	Sud-E	Nord-W	Est	West	West	Est	Sud-E	Sud-E	Est
360	70	360	45	225	90	135	315	90	270	270	90	135	135	90

30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44
2375,00	2509,98	2492,00	2497,24	2485,00	2494,14	2500,07	2498,96	2511,27	2519,44	2515,00	2518,77	2523,33	2530,00	2518,00
2	7	2	10	1	3	10	15	5	3	15	10	2	30	3
MOR_ANT	MOR_ANT	R_G_A	R_G_A	R_G_A	R_G_A	R_G_A	R_G_A	R_G_A	R_G_A	R_G_A	R_G_A	R_G_A	R_G_A	R_G_A
Sud-S/W	Est	Nord-E	Sud-E	Sud-E	Nord	Nord-N/E	Nord	Nord-E	Est-N/E	Nord	Est-N/E	Est-N/E	Nord-E	Sud
200	90	45	135	135	360	20	360	45	70	360	70	70	45	180

45	46	47	48	49	50	51	G1	G2	G3	G4	G5	G6	G7	G8
2524,45	2544,49	2514,74	2516,43	2503,68	2496,00	2510,00	2491,00	2497,00	2488,12	2491,12	2464,17	2439,88	2515,00	2513,00
10	5	1	5	1	10	4	3	3	7	3	12	5	20	10
R_G_A														
Nord-E	Nord-W	Sud-E	Nord	Sud-E	Sud	Nord	Nord-E	Nord-E	Sud-E	Nord	Sud-E	West	Nord	Sud-E
45	315	135	360	135	180	360	45	45	135	360	135	270	360	135

G9	G10	G11	G12	G13	G14	G15	G16	G17	G18	G19
2505,79	2518,30	2519,95	2516,38	2519,48	2520,72	2527,06	2538,32	2539,96	2577,32	2596,52
11	3	17	13	8	20	7	1	6	5	14
R_G_A										
Nord-E	Est-N/E	Sud-E	Nord-W	Nord	SUD_W	Nord-W	SUD_W	Nord	Nord	Nord-E
45	70	135	315	360	225	315	225	360	360	45

**Appendice A.6:** sintesi dei gradienti della neve ogni 25 m e ogni 50m

<b>VALORI MINIMI</b>	<b>2350- 2375</b>	<b>2375- 2400</b>	<b>2400- 2425</b>	<b>2425- 2450</b>	<b>2450- 2475</b>	<b>2475- 2500</b>	<b>2500- 2525</b>	<b>2525- 2550</b>
INIZIO INNEVAMENTO (numero giorno)	315	315	315	315	315	315	315	315
FINE INNEVAMENTO (numero giorno)	166	166	166	166	175	169	166	169
DURATA INNEVAMENTO (N° di gg)	216	216	216	216	225	219	216	219
Altezza MAX	220	160	195	120	230	190	110	120
Altezza MIN	70	60	50	90	70	65	50	60
Altezza MED	123	80	82	74	102	89	69	70
STAND DEV	25	39	54	38	63	54	23	35
QUOTA	2357	2375	2410	2431	2464	2470	2375	2527

<b>VALORI MASSIMI</b>	<b>2350- 2375</b>	<b>2375- 2400</b>	<b>2400- 2425</b>	<b>2425- 2450</b>	<b>2450- 2475</b>	<b>2475- 2500</b>	<b>2500- 2525</b>	<b>2525- 2550</b>
INIZIO INNEVAMENTO (numero giorno)	315	315	315	315	315	315	315	315
FINE INNEVAMENTO (numero giorno)	193	189	206	189	180	210	203	199
DURATA INNEVAMENTO (N° di gg)	243	239	256	239	230	260	253	249
Altezza MAX	260	250	250	250	230	275	280	260
Altezza MIN	190	170	80	150	80	180	150	140
Altezza MED	210	167	150	143	163	133	158	142
STAND DEV	93	87	84	93	76	93	104	89
QUOTA	2369	2390	2515	2440	2470	2499	2537	2570

<b>VALORI MEDI</b>	<b>2350- 2375</b>	<b>2375- 2400</b>	<b>2400- 2425</b>	<b>2425- 2450</b>	<b>2450- 2475</b>	<b>2475- 2500</b>	<b>2500- 2525</b>	<b>2525- 2550</b>
INIZIO INNEVAMENTO (numero giorno)	315	315	315	315	315	315	315	315
FINE INNEVAMENTO (numero giorno)	174	175	184	178	178	182	185	186
DURATA INNEVAMENTO (N° di gg)	224	225	234	228	228	232	235	236
Altezza MAX	248	221	223	185	230	221	227	233
Altezza MIN	140	115	67	120	75	91	92	113
Altezza MED	158	130	112	109	133	109	115	120
STAND DEV	66	66	71	66	70	78	75	78
QUOTA	2362	2386	2448	2436	2467	2492	2509	2540

<b>DEVIAZIONE STANDARD</b>	<b>2350- 2375</b>	<b>2375- 2400</b>	<b>2400- 2425</b>	<b>2425- 2450</b>	<b>2450- 2475</b>	<b>2475- 2500</b>	<b>2500- 2525</b>	<b>2525- 2550</b>
INIZIO INNEVAMENTO (numero giorno)	0	0	0	0	0	0	0	0
FINE INNEVAMENTO (numero giorno)	11	10	16	16	4	11	11	9
DURATA INNEVAMENTO (N° di gg)	11	10	16	16	4	11	11	9
Altezza MAX	16	41	22	92	0	28	43	41
Altezza MIN	60	58	10	42	7	29	21	27
Altezza MED	39	38	23	49	43	13	20	21
STAND DEV	26	21	11	39	9	12	18	16
QUOTA	5	7	52	6	4	7	30	13

<b>Valori Minimi</b>	<b>2350- 2400</b>	<b>2400- 2450</b>	<b>2450- 2500</b>	<b>2500- 2550</b>
INIZIO INNEVAMENTO (numero giorno)	315	315	315	315
FINE INNEVAMENTO (numero giorno)	166	166	169	166
DURATA INNEVAMENTO (N° di gg)	216	216	219	216
Altezza MAX	160	120	190	110
Altezza MIN	60	50	65	50
Altezza MED	80	74	89	69
STAND DEV	25	38	54	23
QUOTA	2357	2410	2464	2375

<b>Valori Massimi</b>	<b>2350- 2400</b>	<b>2400- 2450</b>	<b>2450- 2500</b>	<b>2500- 2550</b>
INIZIO INNEVAMENTO (numero giorno)	315	315	315	315
FINE INNEVAMENTO (numero giorno)	193	206	210	203
DURATA INNEVAMENTO (N° di gg)	243	256	260	253
Altezza MAX	260	250	275	280
Altezza MIN	190	150	180	150
Altezza MED	210	150	163	158
STAND DEV	93	93	93	104
QUOTA	2390	2515	2499	2570

<b>Valori Medi</b>	<b>2350- 2400</b>	<b>2400- 2450</b>	<b>2450- 2500</b>	<b>2500- 2550</b>
INIZIO INNEVAMENTO (numero giorno)	315	315	315	315
FINE INNEVAMENTO (numero giorno)	175	181	180	186
DURATA INNEVAMENTO (N° di gg)	225	231	230	236
Altezza MAX	235	204	226	230
Altezza MIN	128	93	83	102
Altezza MED	144	110	121	118
STAND DEV	66	68	74	77
QUOTA	2374	2442	2479	2524

<b>Deviazione Standard</b>	<b>2350- 2400</b>	<b>2400- 2450</b>	<b>2450- 2500</b>	<b>2500- 2550</b>
INIZIO INNEVAMENTO (numero giorno)	0,00	0,00	0,00	0,00
FINE INNEVAMENTO (numero giorno)	0,49	0,21	5,39	1,00
DURATA INNEVAMENTO (N° di gg)	0,49	0,21	5,39	1,00
Altezza MAX	17,59	49,55	19,97	1,28
Altezza MIN	1,10	22,70	15,56	4,32
Altezza MED	0,65	17,89	21,20	0,83
STAND DEV	3,80	19,94	2,12	1,57
QUOTA	1,72	32,20	2,34	11,82