

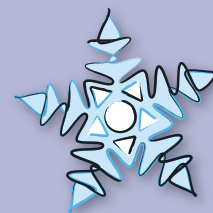


effetti ambientali delle dinamiche climatiche globali



▶ Bilancio di massa dei ghiacciai	250
▶ Andamento delle fronti glaciali	254
▶ Distribuzione potenziale del permafrost	256
■ PROGETTO REPHLEX: impiego di immagini satellitari per l'analisi della variabilità interannuale del ciclo fenologico della vegetazione (nel periodo 2000-2005) come indicatore di risposta alle variazioni climatiche	258
■ MONITORAGGIO DEL PERMAFROST: i siti di Cime Bianche e della parete sud del Cervino	262

Bilancio di massa dei ghiacciai



Attraverso il bilancio di massa si determina la variazione della massa di un corpo glaciale calcolando la differenza fra gli accumuli, costituiti dalle precipitazioni nevose invernali e primaverili, e la massa persa per fusione di neve e ghiaccio (ablazione) nella stagione estiva. Il valore del bilancio specifico netto annuale, che costituisce una media per l'intero ghiacciaio, è espresso in mm di equivalente in acqua (millimeter water equivalent, mm w. e.); esso si determina realizzando misure puntuali di variazione di livello della superficie del glacionevato e misure di densità del manto nevoso, in corrispondenza di paline

ablato metriche. Da questi dati si deducono i valori di massa accumulata e persa in ogni stagione relativi a settori omogenei del ghiacciaio. Le variazioni di massa dei ghiacciai, essendo direttamente influenzate dalle condizioni meteo-climatiche stagionali (in particolare dall'andamento della temperatura nel periodo di ablazione e dalle caratteristiche degli accumuli invernali e primaverili), consentono di valutare in che modo i cambiamenti climatici agiscono sui corpi glaciali, di stimare la persistenza dei singoli apparati alpini in relazione agli scenari globali ipotizzati e di valutare la corrispondenza a livello locale degli scenari climatici definiti a livello globale.

classificazione

- ▶ **Tema** Cambiamenti climatici
- ▶ **Sottotema** Criosfera e ghiacciai
- ▶ **Settore** Energia: Produzione (risorsa idrica)
- ▶ **DPSIR** **S**

DETERMINANTI - PRESSIONI - STATO - IMPATTO - RISPOSTE

Qualità dell'informazione*



* Metodologia applicata secondo i più evoluti criteri scientifici. La complessità operativa del metodo ne limita la possibilità di estensione a corpi glaciali distribuiti su tutto il territorio regionale.

Giudizio stato**



Tendenza**



** La consistente diminuzione di massa dei ghiacciai è connessa ai mutamenti climatici in atto, correlabili ad impatti antropici globali. Le tendenze osservate potranno avere a breve termine significativi impatti sulla disponibilità della risorsa idrica.

riferimenti normativi

- ▶ **Normativa di riferimento**
L'indicatore non ha riferimenti normativi. Il bilancio di massa viene tuttavia indicato dall'Agenzia Europea come indicatore prioritario per il monitoraggio degli effetti del global change sui sistemi naturali
- ▶ **Relazione con la normativa**
Non applicabile
- ▶ **Livelli normativi di riferimento**
Non applicabile

copertura temporale e spaziale

- ▶ **Aggiornamento**
31/12/2005
- ▶ **Periodicità di aggiornamento**
Annuale
- ▶ **Copertura territoriale**
Serie storica disponibile su un apparato glaciale regionale (Ghiacciaio del Timorion Valsavarenche - Gruppo del Gran Paradiso). Dal 2005 bilancio di massa sul Ghiacciaio del Rutor



Fonti dei dati

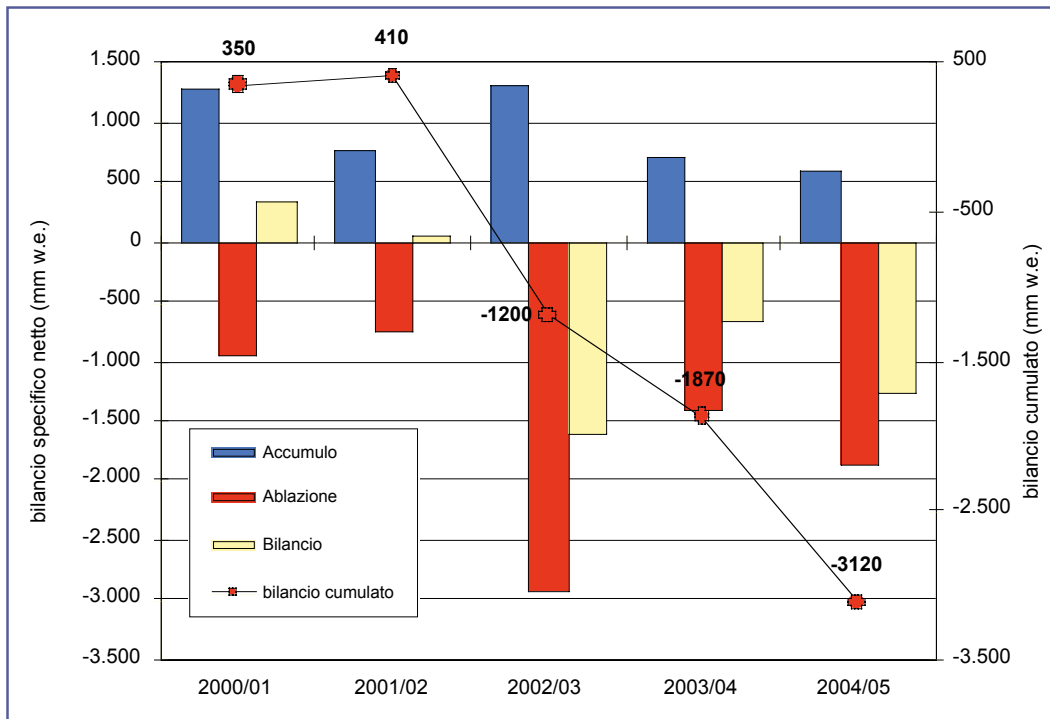
- ARPA Valle d'Aosta (Ghiacciaio del Timorion)
- Società Meteorologica Italiana onlus (Ghiacciaio del Ciardoney)
- Parco Nazionale Gran Paradiso (Ghiacciaio del Grand Etret)
- Regione Autonoma Valle d'Aosta (Ghiacciaio del Rutor)
- Società Meteorologica Italiana onlus, redazione Nimbus (Ghiacciaio del Basodino).

Presenza in altri documenti

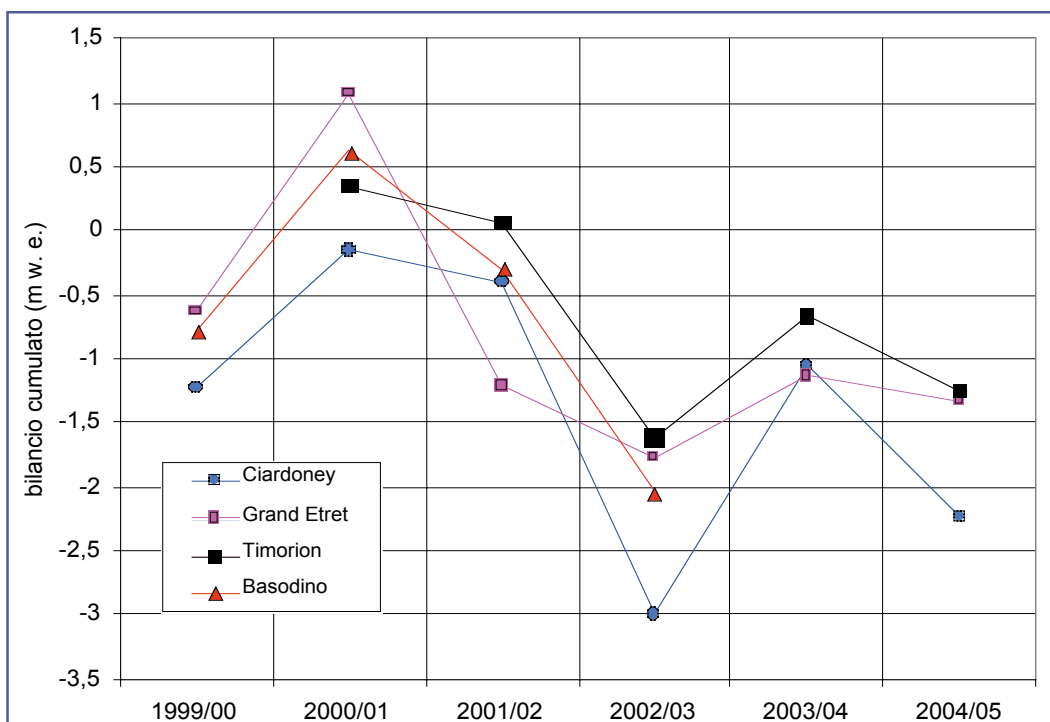
- IPCC, 2001
- EEA Report 2/2004 Impacts of Europe's changing climate, An indicator-based assessment
- APAT - Annuario dei dati ambientali 2004
- World Glacier Monitoring Service e pubblicati sul sito <http://www.geo.unizh.ch/wgms/>

elaborazione e presentazione

BILANCIO DI MASSA DEL GHIACCIAIO DEL TIMORION



Bilancio specifico netto e cumulato dei Ghiacciai del Timorion (Gruppo Gran Paradiso) per le annate idrologiche 2000/01 - 2004/05.



Bilancio cumulato del Ghiacciaio del Ciardoney, Grand Etret, Timorion e Basodino per le annate idrologiche 1999/00 - 2004/05.

I dati di bilancio di massa costituiscono un'indicazione fondamentale per valutare gli effetti dei determinanti climatici negli ambienti alpini: attualmente in Italia ne sono monitorati una decina, spesso con serie discontinue o di entità ridotta. Per l'elaborazione dell'indicatore è stato considerato il Ghiacciaio del Timorion (Valsavarenche, Gruppo del Gran Paradiso), monitorato da ARPA Valle d'Aosta, a cui si aggiungono, per il confronto con la tendenza rilevata negli ultimi anni, i ghiacciai del Basòdino (Alpi ticinesi), del Ciardoney (Val Soana, Gruppo del Gran Paradiso, a cura della Società Meteorologica Italiana) e del Grad Etret (Valsavarenche, a cura del Parco Nazionale Gran Paradiso).

Dai dati rilevati è possibile valutare come fortemente negativo l'attuale periodo per i ghiacciai delle Alpi occidentali; in particolare nel 2005 le temperature elevate di fine primavera e di inizio estate hanno determinato, anche alle quote superiori, la rapida fusione del manto nevoso già caduto poco

abbondante nel corso dell'inverno.

Si evidenzia, con il bilancio cumulato, la progressiva riduzione di massa glaciale in tutti gli apparati monitorati, tendenza confermata anche da altre osservazioni condotte in settori geografici e climatici differenti. A partire dall'annata 2004/05 nell'ambito delle attività della Cabina di Regia dei Ghiacciai valdostani, ARPA Valle d'Aosta partecipa alla determinazione del bilancio di massa del Ghiacciaio del Rutor (Valle di La Thuile): il valore di bilancio specifico netto è stato calcolato in 1.480 mm di acqua equivalente perduta.

Sebbene l'informazione di bilancio annuale possieda un valore intrinseco elevato, la risposta del ghiacciaio al clima non sempre risulta lineare: di fatto, la dinamica glaciale è la risultante del fattore termico a cui si combinano le variazioni della distribuzione delle precipitazioni nel corso dell'anno e le condizioni locali.



Lo scarso accumulo nevoso invernale misurato in data 11.06.2005 sul Ghiacciaio del Timorion (610 mm w.e.) ha contribuito, nell'annata 2004-2005, ad un bilancio di massa molto negativo, secondo, nel periodo di indagine solo all'annata 2002/03.

Confronto delle condizioni del Ghiacciaio del Timorion dallo stesso punto di osservazione (Levionaz Superiore) in data 08.07.2004 (sinistra) e 11.06.2005. La scarsa copertura nevosa dell'inverno 2005 ha contribuito ad un bilancio di massa molto negativo.



Il Ghiacciaio del Timorion visto dal punto fotografico a monte di Levionaz superiore. La copertura residua della neve dell'anno è praticamente assente in data 07.09.2004: per l'intero corpo glaciale si registra ablazione, anche nei settori altitudinali più elevati.

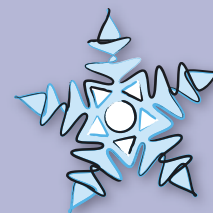


Ghiacciaio del Timorion
Misure per la valutazione del bilancio di massa.

Nel settore della palina n. 8 (3.230 m di quota) il ghiacciaio ha ridotto il suo spessore di circa 7,5 m (pari ad una "lama" di acqua di 6,5 m), a sinistra.


Misure di densità e altezza del manto nevoso realizzate per determinare gli accumuli invernali, a destra.

Andamento delle fronti glaciali



L'indicatore sintetizza l'attività di monitoraggio delle fronti glaciali di un campione di ghiacciai valdostani. Per l'elaborazione, la regressione glaciale è stata intesa come un *innalzamento altitudinale della quota minima* del fronte. Scopo dell'indicatore è verificare la presenza di una tendenza o di una ciclicità nell'andamento delle fronti glaciali e valutare la corrispondenza a livello locale degli scenari climatici definiti a livello globale.

classificazione

- ▶ **Tema** Cambiamenti climatici
- ▶ **Sottotema** Criosfera e ghiacciai
- ▶ **Settore** Energia: produzione (risorsa idrica), Gestione dei territori alpini, Turismo
- ▶ **DPSIR** 

DETERMINANTI – PRESSIONI – STATO – IMPATTO – RISPOSTE

referimenti normativi

- ▶ **Normativa di riferimento**
L'indicatore non ha riferimenti normativi
- ▶ **Relazione con la normativa**
Non applicabile
- ▶ **Livelli normativi di riferimento**
Non applicabile

copertura temporale e spaziale

- ▶ **Aggiornamento**
31/12/2004
- ▶ **Periodicità di aggiornamento**
Annuale
- ▶ **Copertura territoriale**
Tutto il territorio regionale

Qualità dell'informazione*



- * L'elaborazione significativa delle serie di dati storici risulta alquanto problematica. Sono stati considerati inizialmente (1958) i dati relativi a 218 ghiacciai e successivamente un sotto campione variabile di anno in anno. Ogni ghiacciaio possiede caratteristiche proprie (altitudine, substrato, esposizione, morfologia, ecc.): di fatto a un'effettiva regressione non corrisponde sempre e comunque un aumento della quota minima della fronte stessa (ad esempio per ghiacciai con porzione terminale pianeggiante, ghiacciai di circo e lingue glaciali incassate, possono fondere senza presentare un innalzamento significativo della fronte). Inoltre la serie di dati attualmente disponibile è disomogenea: il numero dei ghiacciai campionati è molto variabile nel tempo e sono stati esaminati campioni di individui glaciali solo in parte sovrapponibili. In generale, il valore medio annuale della quota minima è condizionato dal numero di ghiacciai campionati: quando il numero di ghiacciai campionati è basso (1979, 1982, 1983, 1984) l'affidabilità del dato medio è minore rispetto agli anni in cui il numero di corpi glaciali monitorati è superiore (a partire dagli anni '90). Infine il dataset non contiene informazioni precedenti al 1958 e non consente elaborazioni di lungo periodo. Il punto di forza dell'indicatore rimane tuttavia la sua copertura spaziale in quanto nell'insieme sono riportate informazioni relative all'intera regione. L'elaborazione alternativa del dataset potrebbe essere costituita dall'utilizzo dei dati di *arretramento / avanzamento* lineare della fronte: tuttavia essi sono relativi ad un numero minore di ghiacciai e risultano complessivamente meno affidabili in quanto riferiti a segnali di posizione spesso variati o scomparsi nel tempo.

Giudizio stato**



Tendenza**



- ** Il generale arretramento delle fronti glaciali (esteso a tutto l'arco alpino) è connesso a mutamenti climatici in atto, ragionevolmente correlabili ad impatti antropici globali. I ghiacciai si dimostrano sistemi particolarmente vulnerabili agli effetti del riscaldamento globale.



Fonti dei dati

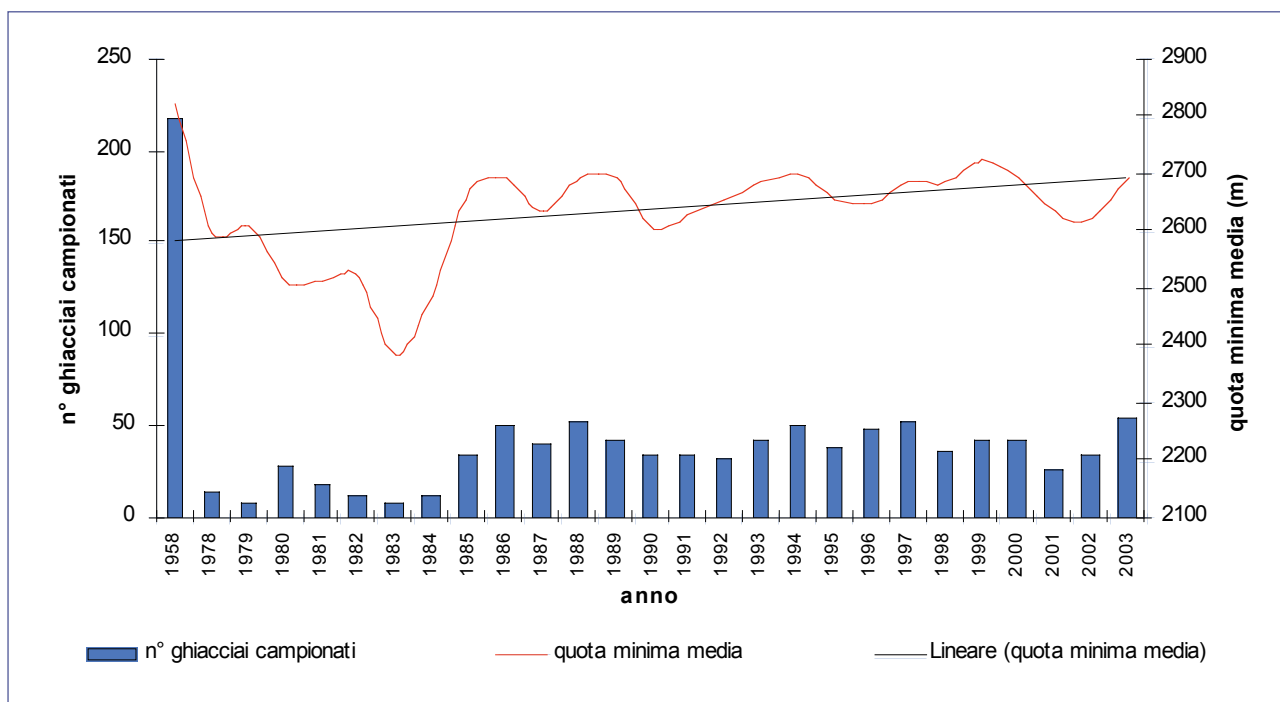
- Catasto dei ghiacciai italiani - anno 1958, Comitato Glaciologico Italiano
- Geografia fisica e dinamica quaternaria, Bollettini del Comitato Glaciologico Italiano ser. 3: Relazioni delle campagne glaciologiche degli anni dal 1978 al 2004 (ultima pubblicazione anno 2005)

Presenza in altri documenti

- APAT – Annuario dei dati ambientali 2004

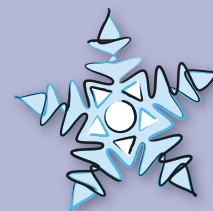
elaborazione e presentazione

ANDAMENTO MEDIO DELLA QUOTA MINIMA DEL FRONTE GLACIALE (1958 - 2003)



Nella valutazione dell'andamento medio della quota delle fronti glaciali, riportato nel grafico, si deve tener conto della variabilità del campione considerato, sia in termini di numero, che di apparati glaciali misurati. Essi, in ogni caso, rappresentano una percentuale non superiore al 20% dei 218 ghiacciai censiti nel Catasto del Comitato Glaciologico Italiano del 1958.

Distribuzione potenziale del permafrost



Il permafrost, definito come la porzione di terreno permanentemente gelato per più di due anni consecutivi, rappresenta un elemento importante, anche se poco appariscente, della criosfera. Le dinamiche di cambiamento climatico, e in particolare il progressivo riscaldamento globale, interferendo direttamente con i fattori che determinano il bilancio energetico della superficie del suolo, inducono variazioni sulla localizzazione e le caratteristiche del permafrost e sulla porzione superficiale dello stesso che, nella stagione estiva, subisce scongelamento dell'acqua interstiziale. Un parametro fondamentale per la valutazione della presenza e delle caratteristiche del permafrost è la temperatura media annua del suolo. L'indicatore è elaborato applicando il modello PERMACLIM (Guglielmin et al, 2003) al territorio regionale suddiviso in celle di 100 m di lato e determinando la classe di probabilità di presenza del permafrost sulla base del valore della temperatura

media annua della superficie del suolo (TMASS). La TMASS è calcolata sulla base delle caratteristiche morfologiche (derivate dal modello digitale del terreno) e dei dati meteo-climatici delle stazioni valdostane (temperatura aria e altezza manto nevoso) ed è trasformata in classi di probabilità secondo lo schema seguente:

- TMASS > 0°C = permafrost assente
- 0°C < TMASS < -2°C = permafrost probabile
- TMASS < - 2° C = permafrost presente

Scopo dell'indicatore è definire, sulla base di modelli di distribuzione già impiegati in area alpina, la presenza potenziale del permafrost in Valle d'Aosta al fine di caratterizzarne la distribuzione, valutare, nel tempo, le possibili variazioni ascrivibili ai cambiamenti climatici e, quindi, evidenziare i settori di territorio regionale potenzialmente oggetto di instabilità.

classificazione

- ▶ **Tema** Cambiamenti climatici
- ▶ **Sottotema** Criosfera e ghiacciai
- ▶ **Settore** Gestione dei territori alpini
- ▶ **DPSIR** **S**

DETERMINANTI - PRESSIONI - STATO - IMPATTO - RISPOSTE

riferimenti normativi

- ▶ **Normativa di riferimento**
L'indicatore non ha riferimenti normativi
- ▶ **Relazione con la normativa**
Non applicabile
- ▶ **Livelli normativi di riferimento**
Non applicabile

Qualità dell'informazione 

Giudizio stato* 

Tendenza* 

* L'elaborazione dell'indicatore presentata è finalizzata alla definizione di un quadro completo della situazione attuale. Evoluzioni di tale quadro, oggetto di studi e approfondimenti (vedi approfondimento pag. 262), potranno evidenziare criticità e problemi, connessi a fenomeni di scioglimento collegati a tendenze globali di riscaldamento dell'atmosfera.

copertura temporale e spaziale

- ▶ **Aggiornamento**
2004
- ▶ **Periodicità di aggiornamento**
Non definibile a priori. Trattandosi di indicatore basato su un modello che impiega fra i dati di input serie climatiche pluriennali appare significativo un aggiornamento sulla base di una nuova serie temporale ed in seguito alla migliorata disponibilità di dati meteorologici
- ▶ **Copertura territoriale**
Tutto il territorio regionale



► **Fonti dei dati**

- Attività in convenzione ARPA VdA-Università degli Studi dell'Insubria: Rapporto finale in preparazione
- Dati meteo: ARPA Valle d'Aosta, Regione Autonoma Valle d'Aosta, Compagnia Valdostana delle Acque

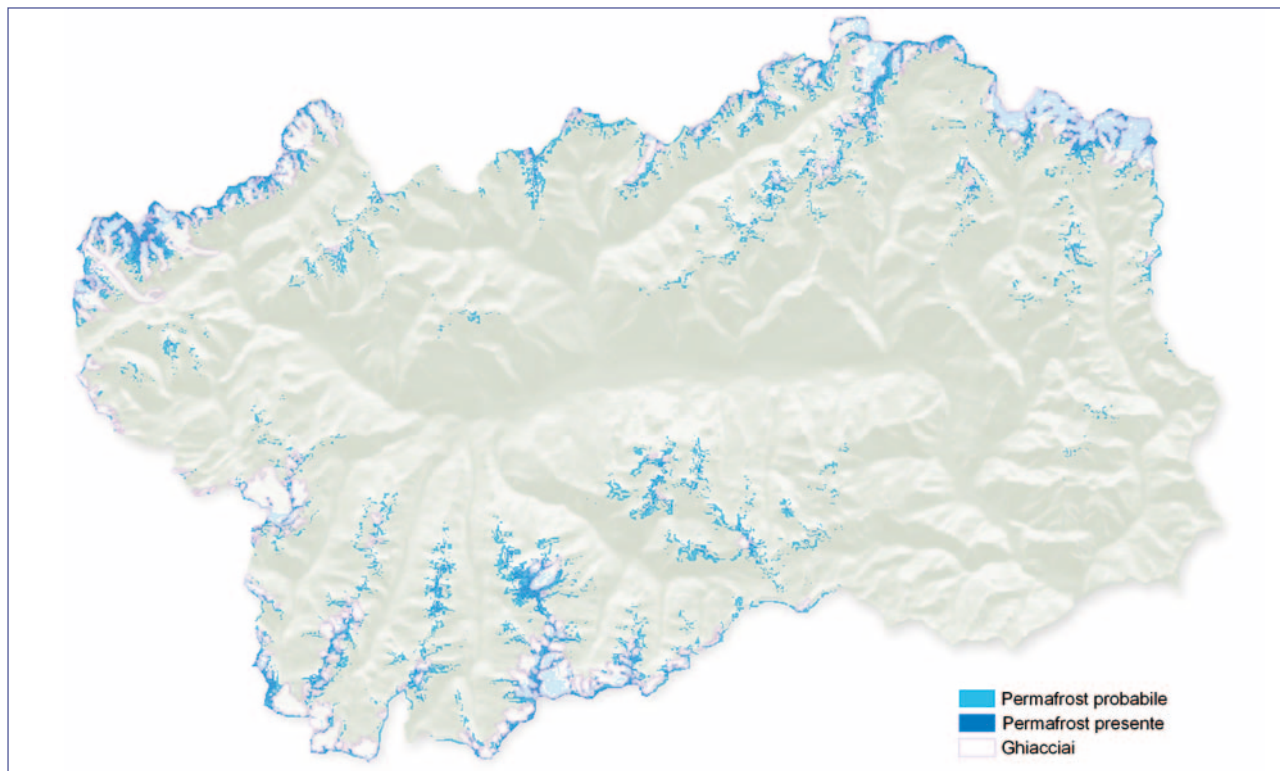
► **Presenza in altri documenti**

- Indicatore di cambiamento climatico raccomandato da Agenzia Europea dell'Ambiente (EEA), International Union of Geological Sciences (IUGS), National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) - *Cryospheric Climate indicators*

elaborazione e presentazione



► **DISTRIBUZIONE POTENZIALE DEL PERMAFROST IN VALLE D'AOSTA**



Il modello di distribuzione restituisce la localizzazione e l'estensione del permafrost in Valle d'Aosta secondo le classi sopra definite e sulla base dei dati di temperatura e nevosità per il periodo 1993-2004. In particolare le percentuali di territorio regionale interessate risultano essere:

- permafrost assente e superfici glacializzate: 92,0%
- permafrost probabile: 5,5%
- permafrost presente: 2,5%

Tali percentuali sono da considerare come rappresentative delle situazioni in cui le attuali condizioni climatiche consentono la formazione del permafrost e non includono il permafrost relitto che può essere presente anche in altre aree.

ARPA VdA ha intrapreso, al Colle Nord delle Cime Bianche (vedi approfondimento pag. 262), attività di studio per approfondire la conoscenza delle dinamiche che presiedono all'evoluzione del permafrost.

PROGETTO REPHLEX: impiego di immagini satellitari per l'analisi della variabilità interannuale del ciclo fenologico della vegetazione (nel periodo 2000-2005) come indicatore di risposta alle variazioni climatiche

Edoardo Cremonese

Presentazione e finalità del progetto

Il progetto, sviluppato da ARPA Valle d'Aosta e dal Laboratorio di Telerilevamento del Dipartimento di Scienze dell'Ambiente e del Territorio, dell'Università degli Studi di Milano Bicocca, è iniziato durante la primavera del 2005, ed è attualmente in corso. L'argomento del progetto è la fenologia vegetale, ossia lo studio del periodico verificarsi delle diverse fasi biologiche nelle piante e della relazione di tali cicli con le condizioni climatiche.

La fenologia è una variabile importante nelle dinamiche di cambiamento climatico. L'apertura delle gemme (*budburst*), che segna l'inizio della stagione vegetativa, dipende dalle condizioni climatiche locali. A sua volta essa determina l'inizio dei flussi di traspirazione, con un considerevole effetto sui bilanci di massa ed energia tra atmosfera e biosfera ed in particolare sul ciclo dell'acqua e del carbonio. L'importanza del ciclo fenologico si rispecchia anche sulla produttività netta dell'intero ecosistema: una differenza di pochi giorni nelle date di *budburst* può tradursi in una variazione interannuale della produttività netta maggiore del 20%.

Il progetto REPHLEX ha l'obiettivo di sviluppare un metodo integrato per lo studio della variabilità interannuale del ciclo fenologico della vegetazione forestale: tale metodo viene definito *integrato* perché vede la convergenza di tecniche di telerilevamento, di rilievi a terra e tecniche modellistiche. Le tipologie forestali che sono state oggetto d'indagine approfondita, al fine di permettere una validazione del metodo a scala regionale, sono i popolamenti di Larice (*Larix decidua*). Tale specie è stata scelta sia per le caratteristiche ecologiche che ne consentono un'ampia diffusione nel territorio valdostano, sia per le spiccate evidenze che ne caratterizzano il ciclo fenologico.

Selezione siti di misura

La realizzazione delle misure sul campo ha previsto la selezione di 8 siti di misura (corrispondenti a quadrati di 250 m di lato), su cui si è concentrata l'attività di studio. I criteri alla base di tale selezione sono legati alle esigenze specifiche dell'attività di campo e della fase di elaborazione delle immagini satellitari. Essi sono relativi ad aspetti stagionali ed ecologici e possono essere così schematizzati:

- assenza di esposizioni nord (al fine di evitare zone d'ombra e favorire l'analisi del dato telerilevato);
- morfologie omogenee;
- pendenza limitata;
- accessibilità favorevole;
- presenza di popolamenti puri di Larice, significativamente estesi;
- densità omogenea.

Tali criteri hanno richiesto un'attenta valutazione delle caratteristiche forestali e stagionali dei lariceti presenti sul territorio regionale e hanno considerevolmente ridotto la quantità di situazioni adatte. Al fine di includere nel campione considerato situazioni che si differenziassero sulla base di aspetti climatici e ecologici si è giunti all'individuazione dei seguenti siti:

ID sito	Comune	Quota (m slm)	Esposizione
ET	Etroubles	1375	290°
SB	Saint-Barthélemy	2125	110°
TO	Torgnon	2090	110°
AL	Etroubles	1850	240°
ME	Etroubles	1970	150°
LM	La Magdeleine	1980	270°
ST	Lillianes	1660	280°
LI	Lillianes	1405	230°

La figura 1 riporta la localizzazione degli 8 siti di indagine. Per la realizzazione della campagna di misure a terra, all'interno di ogni sito sono state individuate 3 aree di saggio (subplot) distribuite secondo un gradiente altitudinale.

Campagna a terra

La campagna a terra è stata condotta allo scopo di ottenere le seguenti informazioni:

1. rilievo dell'andamento fenologico stagionale (in particolare delle fasi di fogliazione e senescenza);
2. caratterizzazione forestale dei popolamenti;
3. caratterizzazione della variazione stagionale di parametri fisiologici correlabili all'efficienza fotosintetica, mediante misure di fluorescenza;
4. caratterizzazione della variazione stagionale dell'indice di area fogliare.

Tale campagna è stata condotta con intensità diversa negli 8 siti: i rilievi fenologici sono stati eseguiti con frequenza settimanale nel periodo primaverile e autunnale in ogni sito. Le misure forestali sono state effettuate nel periodo estivo, mentre le misure di LAI e di fluorescenza si sono protratte, con frequenza settimanale, in 3 degli otto siti (ET, SB, TO) per tutta la durata della stagione vegetativa.

1. Rilievo diretto dell'andamento fenologico stagionale

Il rilievo a terra dell'andamento fenologico consente di ottenere informazioni sulla fase in corso del ciclo vegetazionale, ad integrazione dei dati di indice di area fogliare e di efficienza fotosintetica, derivanti da misure di fluorescenza. L'acquisizione di tali informazioni è finalizzata alla validazione dei dati derivabili dall'interpretazione delle immagini satellitari e dei risultati dei modelli fenologici. Per il rilievo dell'andamento fenologico stagionale, in assenza di riferimenti bibliografici relativi al larice, è stato sviluppato un protocollo di osservazione specifico; esso ha permesso di individuare le date di *budburst*, di inizio dell'ingiallimento e di fine della stagione vegetativa, e quindi di definire la durata del periodo vegetativo. Tali parametri sono tra quelli maggiormente influenzati dalle variazioni di temperatura prevedibili in funzione dei cambiamenti climatici in atto. In figura 2 è riportato l'andamento del ciclo fenologico osservato nel sito di Torgnon: tale rappresentazione consente di evidenziare come le date di *budburst* (b1), di inizio ingiallimento (b2) e di fine stagione (b3) possano essere facilmente definite.



Figura 1 Localizzazione dei siti di misura e delle fasce altimetriche in cui si collocano

2. Caratterizzazione forestale dei popolamenti
 Il rilievo ha riguardato la misura dei principali parametri dendro-crono-auxometrici dei lariceti selezionati. Scopo di tale attività è la ricerca

di possibili correlazioni tra la variabilità dei fenomeni fenologici e parametri fisiologici e strutturali, come la densità dei popolamenti o l'età delle piante.

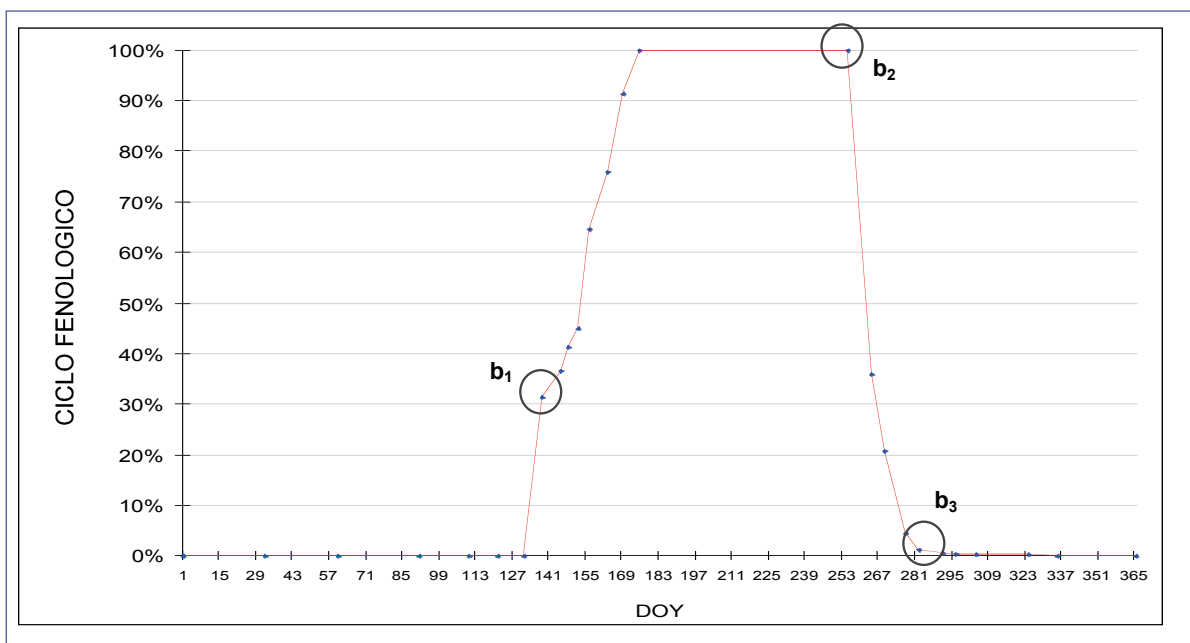


Figura 2 Ciclo fenologico osservato nel sito di Torgnon (2090 m s.l.m.). Sono evidenziate le date di budburst (b_1), di inizio ingiallimento (b_2) e di fine stagione vegetativa (b_3). (DOY = Day of Year)

3. Misure di fluorescenza
 Le misure di fluorescenza, eseguite con un fluorimetro attivo (Handy PEA) in laboratorio su campioni di aghi di larice prelevati da tre piante per ogni area di saggio, consentono di derivare informazioni correlabili all'efficienza fotosintetica. Scopo di tali misure è stato quel-

lo di disporre di un dato fisiologico rilevato a terra, legato all'andamento stagionale dell'attività vegetativa, confrontabile con il ciclo fenologico e con l'andamento temporale degli indici di vegetazione derivati dall'analisi delle immagini satellitari. In figura 3 è rappresentata la variazione stagionale di un indice sintetico (PI - Per-



approfondimento



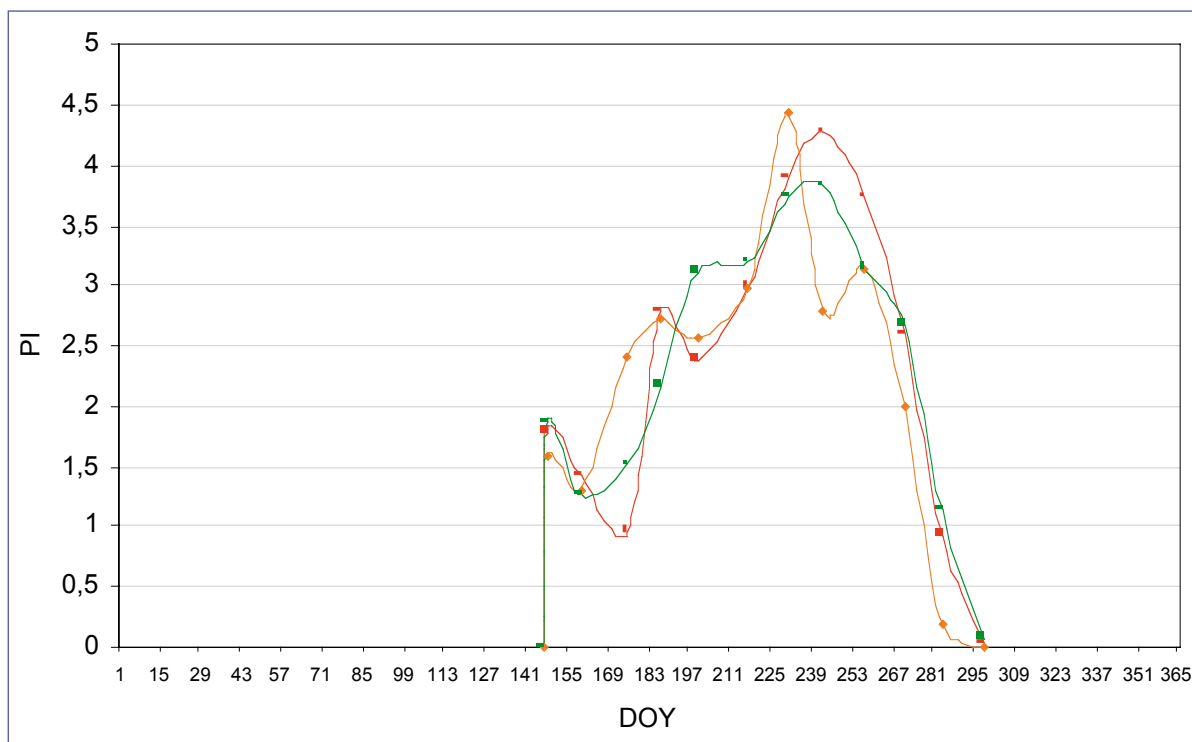


Figura 3 Andamento annuale dell'indice sintetico PI derivato dalle misure di fluorescenza, eseguite nel sito di Saint Barthelemy (DOY = Day of Year)

formance Index) derivato dall'elaborazione delle misure di fluorescenza, eseguite nel sito di Saint Barthelemy su tre differenti piante. Gli andamenti riportati mostrano che tale indice presenta rapide variazioni nel periodo di inizio e di fine della stagione e che i valori massimi vengono raggiunti nella seconda metà di agosto; le ragioni delle oscillazioni che caratterizzano le variazioni dell'indice sono in corso di indagine, ma alcune prime evidenze e indicazioni bibliografiche suggeriscono che tali variazioni potrebbero essere dovute all'andamento locale della temperatura dell'aria nel corso della stagione.

4. Misure di Indice di Area Fogliare (LAI)

Il LAI (*Leaf Area Index*) è un parametro strutturale dei popolamenti arborei: è definito come l'area di inci-

denza fogliare per unità di superficie (superficie di foglia rispetto alla superficie di terreno). Tale parametro varia durante la stagione anche in funzione del ciclo fenologico della vegetazione. Le misure di LAI sono state eseguite mediante l'utilizzo di un obiettivo *fish-eye* da 8mm montato su una camera digitale. Le immagini emisferiche, acquisite con frequenza settimanale e successivamente elaborate mediante software specifico (*Can-eye Ver. 4.1*), consentiranno di quantificare l'andamento stagionale di tale parametro e di correlarlo con i rilievi fenologici e con l'andamento degli indici di vegetazione derivati dai dati telerilevati. In figura 4 si riporta un esempio di immagine emisferica e della successiva fase di elaborazione.

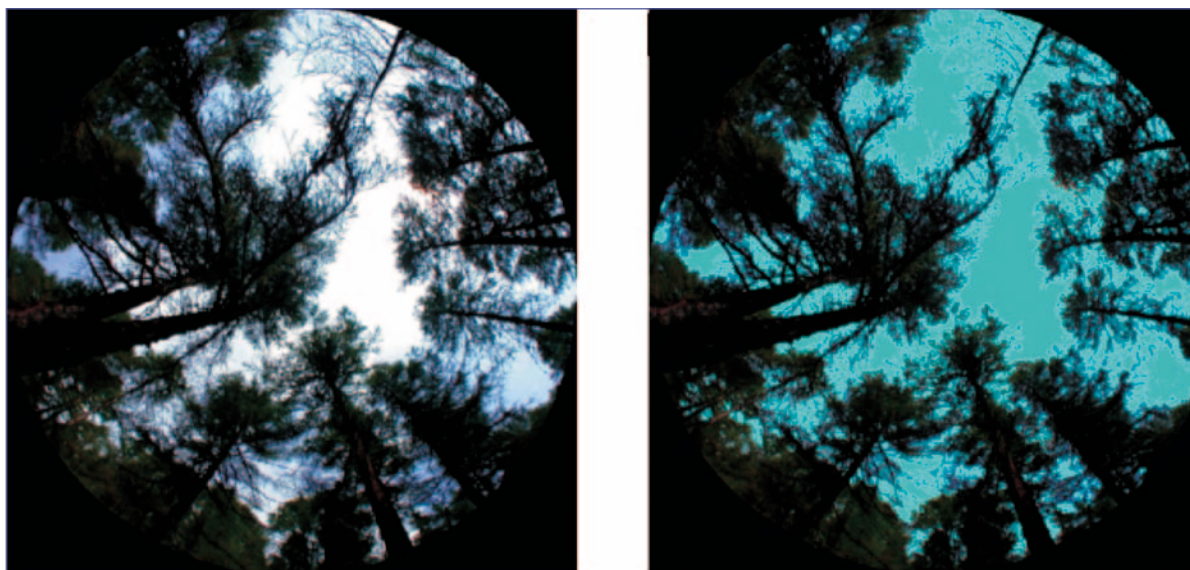


Figura 4 Immagine originale acquisita mediante camera emisferica il 24/06/05 nel sito di Torgnon; (sinistra) Immagine classificata mediante *Can-eye V 4.1* (destra). LAI effettivo calcolato = 2,1 [m²/m²]

Dati telerilevati

I dati satellitari utilizzati sono quelli acquisiti dal sensore MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectro-radiometer*) installato sul satellite TERRA, nel periodo 2000-2005. In particolare i prodotti scelti sono i dati di NDVI, giornalieri e composti a 16 giorni, con risoluzione spaziale di 250 m, calcolati a partire dalle immagini acquisite dal sensore. L'NDVI è un indice di vegetazione così definito:

$$NDVI = \frac{NIR-R}{NIR+R}$$

dove NIR e R sono i valori di riflettanza rispettivamente nel vicino infrarosso e nel rosso.

La risposta spettrale della vegetazione in tali bande determina che tale indice, compreso tra -1 e 1, as-

sume valori elevati (rappresentati in colori chiari in figura 5) all'aumentare della biomassa verde.

I profili temporali di NDVI, derivati da dati MODIS, possono essere affetti da errori derivanti dalla copertura nuvolosa o da altre fonti di disturbo: al fine di ridurre l'influenza di tali fattori interferenti e per ricostruire serie temporali di NDVI di qualità, le immagini devono essere corrette con tecniche in corso di sviluppo. Una volta ricostruiti i profili corretti, le serie temporali sono analizzate con appositi algoritmi allo scopo di individuare le date dei principali eventi fenologici (*budburst*, inizio ingiallimento e fine stagione vegetativa). L'accuratezza di questa tecnica verrà successivamente valutata attraverso il confronto con le date osservate durante il rilievo fenologico eseguito sul terreno. Tale attività è attualmente in corso.

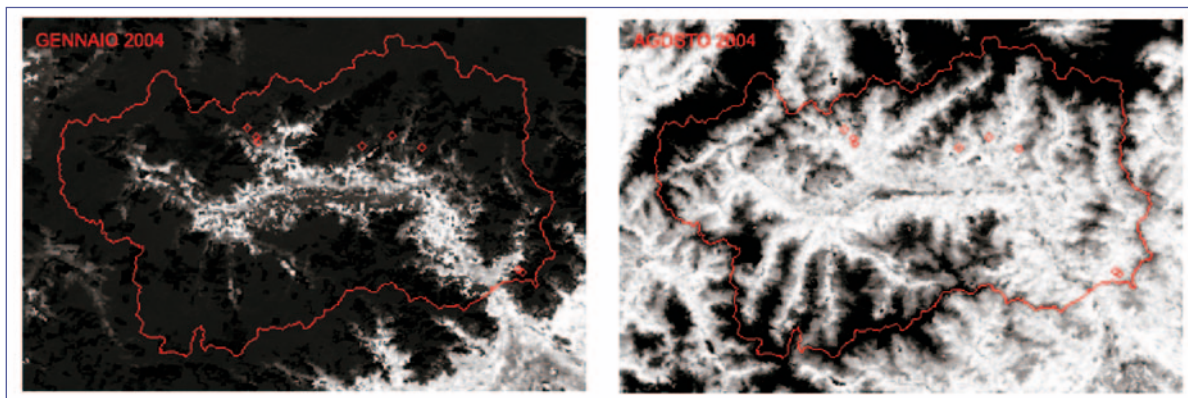


Figura 5 Confronto tra i valori assunti dall'NDVI nei periodi di riposo vegetativo (gennaio) e massima attività vegetativa (agosto)

Risultati attesi e prospettive d'indagine

I risultati che ci si propone di ottenere con l'attività presentata sono la validazione dei metodi di valutazione del ciclo fenologico attraverso l'analisi dei dati telerilevati (MODIS).

In prospettiva, si intende applicare la stessa metodologia di valutazione a modelli fenologici basati sui dati climatici rilevati a terra da strumentazione appositamente installata da ARPA VdA. Tali attività consentiranno, al termine del progetto, di arrivare ad un'analisi a ritroso da immagini MODIS della variabilità spaziale interannuale dei principali parametri fenologici considerati nel

corso del periodo compreso tra il 2000 e il 2005.

In questo modo sarà possibile definire un livello di riferimento della durata del ciclo fenologico, e della sua variabilità a breve termine, dei popolamenti forestali alpini e subalpini. Pur essendo gli ambienti d'alta quota considerati tra quelli che saranno maggiormente colpiti ed influenzati dagli effetti dei cambiamenti climatici, è importante sottolineare che tali potenziali modificazioni si potranno manifestare su scale temporali maggiori di cinque anni. Sarà dunque importante individuare strategie di monitoraggio sostenibili da protrarre nel corso del tempo.

Bibliografia

- Badeck F, Bondeau A, Bottcher K, (2004). Research review: Responses of spring phenology to climate change. *New Phytologist*, 162:295-309.
- Zhang X, Friedl MA, Schaaf CB, Strahler AH, Hodges JCF, Gao F, Bradley CR, Huete A, (2003). Monitoring vegetation phenology using MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 84:471-475.
- Rosenthal SI, Camm EL, (1997). Photosynthetic decline and pigment loss during autumn foliar senescence in western larch (*Larix occidentalis*). *Tree Physiology* 17: 767-775

- Nippert JB, Duursma RA, Marshall JD, (2004). Seasonal variation in photosynthetic capacity of montane conifer. *Functional Ecology*, 18:876-886
- Jolly WM, Nemani R, Running, SW (2005) A generalized, bioclimatic index to predict foliar phenology in response to climate change. *Global Change Biology*, 11:619-632
- Picard G, Quegan S, Delbart N, Lomas MR, Toan T, Woodward FI (2005) Budburst modelling in Siberia and its impact on quantifying the carbon budget. *Global Change Biology*, 11: 2164-2176

MONITORAGGIO DEL PERMAFROST: i siti di Cime Bianche e della parete sud del Cervino

Umberto Morra di Cella

approfondimento

Con il termine permafrost si indica la porzione di terreno che presenta per almeno due anni consecutivi una temperatura media annua inferiore a 0°C (Brown & Pewé, 1973). Si stima che la profondità massima del permafrost possa giungere ad oltre 1200 m in Antartide e in Siberia; la media sull'arco alpino varia tra i 50 e i 120 m. Lo strato superficiale del permafrost, che può variare da pochi centimetri sino a 5 - 6 metri, è soggetto a scioglimento stagionale, ed è chiamato strato attivo (*active layer*).

Il permafrost è dunque un elemento direttamente collegato alle condizioni climatiche che si presentano alle elevate latitudini e nelle regioni montagnose. Gli ambienti interessati dalla presenza del permafrost sono tra quelli in cui gli effetti del riscaldamento globale si manifesteranno probabilmente in modo più intenso: moderati incrementi della temperatura media annua, in queste regioni, possono causare cambiamenti di stato di ampie regioni attualmente occupate da permafrost. Tali alterazioni possono avere significativi impatti sia sugli equilibri naturali (modificazioni nel ciclo del carbonio e nel ciclo dell'acqua indotti da un aumento dello spessore dello strato stagionalmente sottoposto a scioglimento) sia sulle attività umane in ambiente montano (modificazioni della stabilità dei versanti

e relativo danneggiamento delle infrastrutture, crolli in roccia, ...).

L'ARPA della Valle d'Aosta ha avviato nel corso del 2004 un insieme di attività volte ad affrontare ed indagare il tema permafrost nel territorio regionale. Attraverso una collaborazione con l'Università degli Studi dell'Insubria, si è provveduto alla realizzazione di un sito per il monitoraggio del permafrost presso il Colle Nord di Cime Bianche, nella conca di Cervinia (Valtournenche). Contemporaneamente, in collaborazione con la Direzione Tutela del Territorio della Regione Autonoma Valle d'Aosta, è stata intrapresa la caratterizzazione dei regimi termici di alcune porzioni della parete sud del Cervino.

Il sito di monitoraggio del Colle Nord di Cime Bianche (Valtournenche)

La zona del Colle Nord di Cime Bianche ha caratteristiche di altopiano in quota, intorno a 3100 m, con terreno a morbide ondulazioni e pendii debolmente acclivi, ricoperti da estese coperture detritiche e rada vegetazione alpina. La località è facilmente accessibile attraverso piste interpoderali con mezzi fuoristrada e, nella stagione invernale, utilizzando gli impianti di risalita della Cervino SpA. Il sito di monitoraggio del permafrost, realizzato in collaborazione con l'Università degli Studi dell'Insubria e la Cervino SpA, ha lo scopo di valutare, a lungo termine, l'andamento delle caratteristiche termiche del permafrost e dello strato attivo, in rapporto con i principali parametri climatici d'interesse. La scelta di questa località giunge a seguito sia di un'attività di modellizzazione della presenza potenziale del permafrost nella conca di Cervinia (vedi scheda indicatore pag. 256), sia di rilievi eseguiti sul campo, nella stagione estiva ed invernale. Nell'area da sottoporre ad indagine si è provveduto, grazie alla collaborazione del CNR-IDPA (Istituto per la Dinamica dei Processi Ambientali - Milano) e DST (Dipartimento di Scienze della Terra - Università di Milano), all'esecuzione di alcune linee di tomografia elettrica (figura 1). Esse hanno permesso di rilevare che, nonostante la quota rilevante e le condizioni

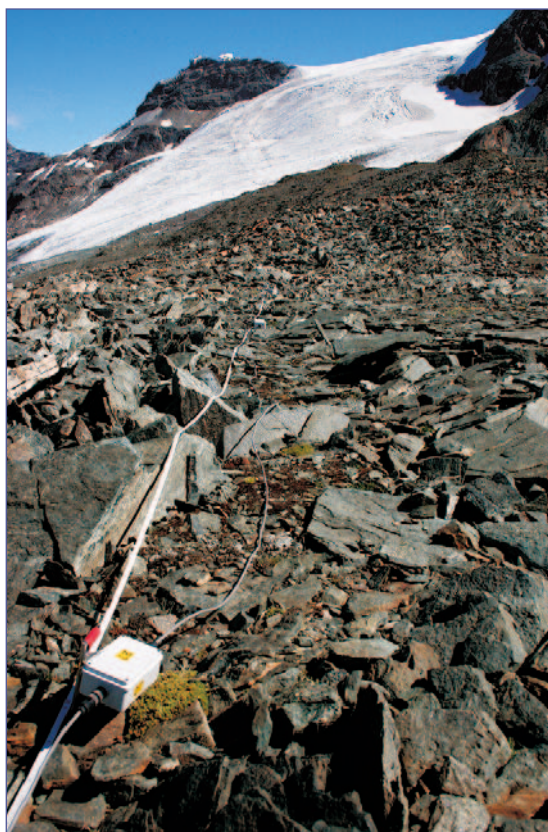


Figura 1 Stendimento trasversale (NE-SW) per la realizzazione delle tomografie elettriche



Figura 2 Realizzazione dei fori per il monitoraggio termico

morfologiche potenzialmente adatte a bilanci energetici negativi, l'area indagata è caratterizzata dalla presenza di permafrost discontinuo. In questo modo si sono potute individuare le posizioni ottimali per la realizzazione dei fori per il monitoraggio delle condizioni termiche del permafrost.

Le perforazioni, eseguite nell'autunno 2004, hanno portato alla realizzazione un foro profondo 41 m, attualmente utilizzato per misure stagionali, e un foro di 6 m equipaggiato per misure in conti-

nuo, adatto al monitoraggio dello strato attivo (fig. 2). Le misure hanno avuto inizio nel gennaio 2005, ma problemi di alimentazione e guasti elettrici non hanno consentito di ottenere un anno completo di dati, e la serie temporale presenta numerose interruzioni. In figura 3 sono riportati gli andamenti della temperatura dell'aria e del suolo nel primo metro di profondità. In figura 4 si possono osservare gli andamenti di temperatura dei sensori più profondi.

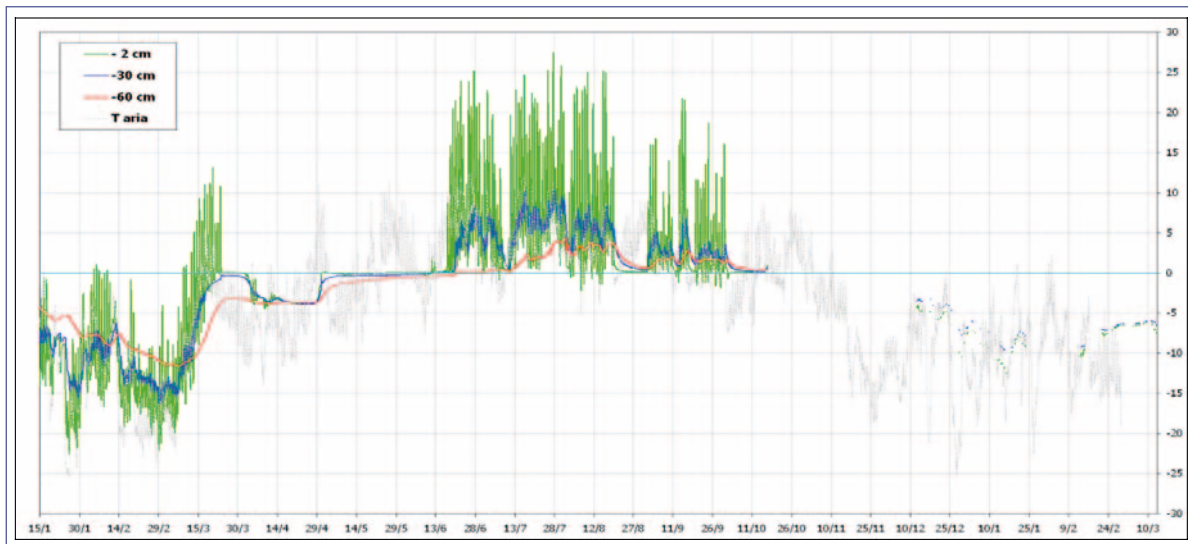


Figura 3 Temperatura (°C) dell'aria (misurata a 6m di altezza) e temperatura del suolo nel primo metro di profondità

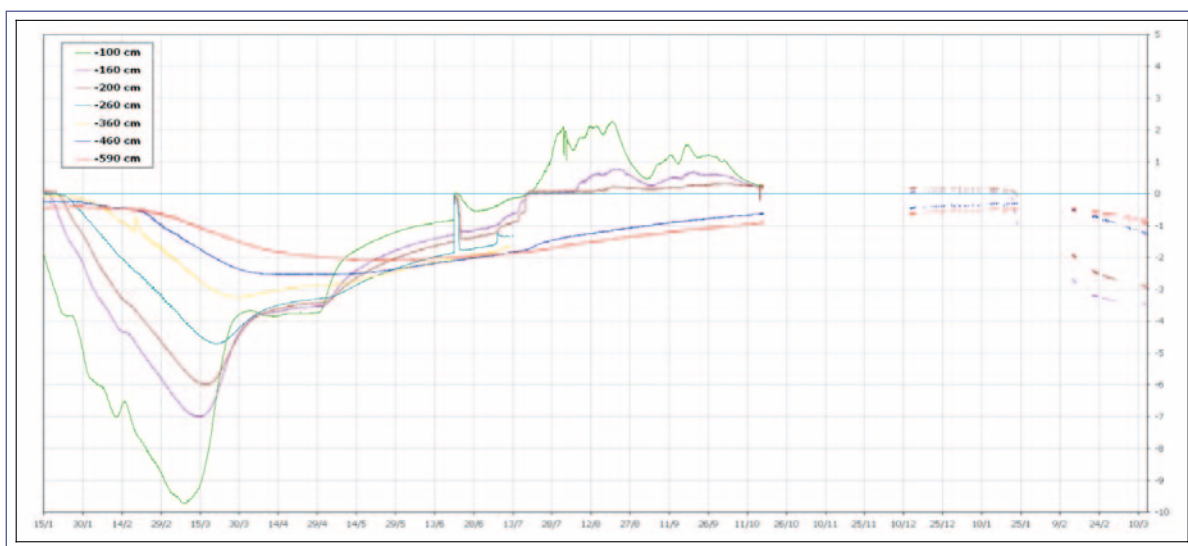


Figura 4 Temperatura (°C) del suolo registrata nel foro di 6 metri di profondità

Le misure eseguite nei fori sono accompagnate da rilievi eseguiti dal personale ARPA, in punti individuati da una griglia permanente di 40x10m (CALM GRID – *Circumpolar Active Layer Monitoring Grid*) finalizzati alla valutazione della distribuzione spaziale dello spessore del manto nevoso e della variabilità dei valori di temperatura superficiale del suolo. Vengono inoltre svolte misure dei profili termici del manto nevoso per valutare le relazioni tra gli andamenti della temperatura ed altre proprietà fisiche della neve (densità, stratigrafia, ...) (Fig. 5).

La dotazione strumentale del sito di monitoraggio è stata completa nel corso dell'inverno 2005/2006, dall'installazione di una stazione automatica di misura dei parametri meteorologici maggiormente collegati alle dinamiche evolutive del permafrost (Fig. 6). I parametri ottenuti consentiranno, per esempio, valutazioni relative all'effetto della copertura del manto nevoso sul regime termico del suolo e l'analisi del bilancio energetico all'interfaccia suolo-neve-atmosfera. La dotazione strumentale della stazione è riportata nella seguente tabella.

Sensori	Parametri misurati
Anemometro sonico	Intensità e direzione del vento
Radiometro netto	Radiazione incidente e riflessa (onde corte e onde lunghe)
Termometro (a due altezze: 0.50 e 2m)	Temperatura aria
Igrometro (a due altezze: 0.50 e 2m)	Umidità aria
Nivometro	Altezza manto nevoso



Figura 5 Misure di spessore e densità del manto nevoso e installazione dei sensori di temperatura

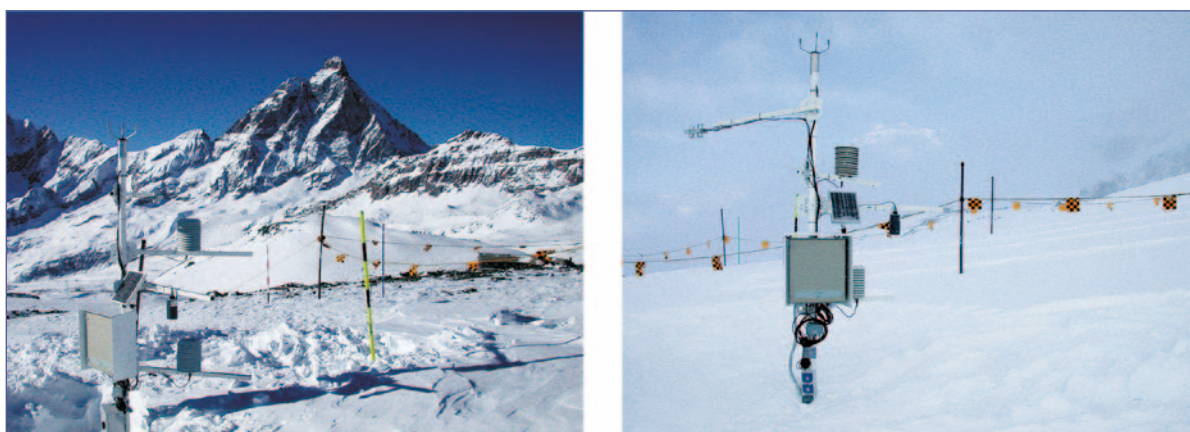


Figura 6 La stazione automatica per la misura dei parametri meteo-climatici installata a Cime Bianche

Le caratteristiche logistiche del sito e la tipologia di misure eseguite ne consentiranno l'ingresso nella rete internazionale GTN-P (Global Terrestrial Network-Permafrost proposto da GCOS – Global Climate Observing System).

L'attività di monitoraggio del regime termico della parete sud del Cervino

L'aumento delle temperature e lo scioglimento del permafrost possono influenzare la stabilità delle pareti e dei versanti rocciosi. Il cambiamento climatico in atto rende dunque importante la conoscenza della distribuzione spaziale e della evoluzione temporale dei regimi termici di tali ambienti. Tali considerazioni, insieme ai numerosi eventi di crollo in roccia accaduti nell'arco alpino nel corso dell'estate del 2003, hanno portato all'avvio, nel 2004, di un'attività finalizzata al monitoraggio del regime termico di alcune porzioni della parete sud del Cervino. L'attività, condotta con la collaborazione della Direzione Tutela del Territorio della Regione Autonoma Valle d'Aosta, rappresenta la fase preliminare del progetto INTER-

REG III A PERMADATAROC, svolto in partenariato con il CNR-IRPI (Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica) di Torino e l'Università della Savoia (Laboratoire EDYTEM) e coordinato da Fondazione Montagna Sicura, di recente approvazione.

Le prime installazioni strumentali sono avvenute nel corso dell'estate 2004 in un sito posto nelle immediate vicinanze della Capanna Carrel: sono stati installati termometri a differenti profondità nella roccia, in un'esposizione sud e un'esposizione nord, per valutare l'effetto della radiazione solare sui regimi termici osservati. La strumentazione utilizzata si è purtroppo rilevata inadatta alle condizioni climatiche di esposizione e si è danneggiata in pochi mesi. Nel corso dell'estate 2005, si è dunque provveduto ad installare sensori più robusti e adatti ad operare in condizioni di temperatura estreme, adottando alcuni accorgimenti volti a renderli più protetti ed isolati nelle porzioni fragili (fig. 7). Nel corso del 2005 si è inoltre provveduto ad aumentare le porzioni della parete sud sottoposte ad indagine. Attualmente 3 siti sono oggetto di monitoraggio: Capanna Carrel, Oriondè,



Figura 7 Sensori attualmente installati presso il sito della Capanna Carrel (a sinistra temperatura roccia, a destra temperatura aria)

ai piedi della parete sud e Cheminée, in un'area interessata da un importante crollo nell'estate del 2003 che ha imposto una modifica del tracciato della via normale italiana di salita al Cervino (fig. 8). L'obiettivo è di arrivare a fine 2006 con un totale di 6 punti distribuiti secondo un gradiente altitudinale, dalla base alle porzioni sommitali del Cervino.

Nei siti evidenziati sono eseguite misure di temperatura della roccia a differenti profondità (2, 30 e 60 cm) e misure di temperatura e umidità dell'aria. Nel sito della Capanna Carrel vengono inoltre realizzate misure finalizzate all'analisi del bilancio radiativo e della relazione con le dinamiche di conduzione del calore all'interno dell'ammasso roccioso (fig. 9).



Fig. 8 Siti attualmente attrezzati con sensori per la misura del regime termico degli ammassi rocciosi (le quote si riferiscono al sito di misura)

I grafici riportati in fig. 10 consentono di confrontare i valori di temperatura dell'aria e della roccia rilevati nei pressi della Capanna Carrel in due differenti esposizioni (sud e nord) e consentono dunque di evidenziare il ruolo rilevante della radiazione solare sui regimi termici delle pareti rocciose. L'attività svolta è da considerarsi fondamentale sia dal punto di vista della sperimentazione stru-

mentale e logistica, che per gli aspetti metodologici: l'esperienza maturata consentirà di sviluppare un protocollo di misura dei parametri in oggetto, esportabile in altri contesti. Nonostante i numerosi problemi incontrati, i primi risultati forniscono informazioni importanti per le successive fasi di spazializzazione e modellizzazione dei regimi termici delle pareti e dei versanti rocciosi.





Figura 9
Strumentazione utilizzata per la quantificazione del bilancio radiativo presso il sito della Capanna Carrel (Parete sud del Cervino)

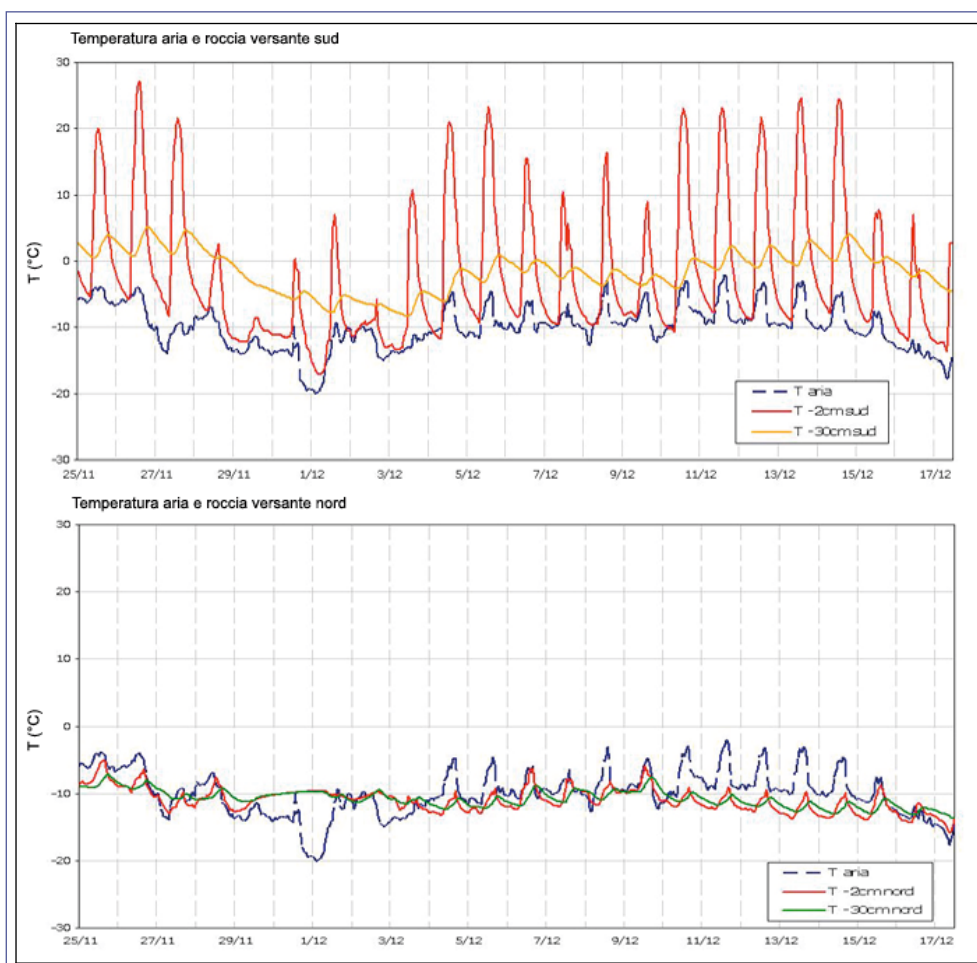


Figura 10
Temperatura di aria e roccia nei pressi della Capanna Carrel (esposizione nord e sud)

Bibliografia

Brown RJE, Pewe TL, (1973). Distribution of permafrost in North America and its relationship to the environment: a review. In Proceedings, Second International Conference on Permafrost, North American Contribution. National Academy of Sciences: Washington DC; (Science Reports, Tohoku University, Series 5), 71-100.

Smith MW, Riseborough DW. (2002). Climate and limits of permafrost: a zonal analysis. Permafrost and Periglacial Processes, 13: 1-15.

Romanovsky VE, Osterkamp TE, (1995). Inter-annual variations of the thermal regime of the active layer and near-surface permafrost in northern Alaska. Permafrost and Periglacial Processes, 6: 313-335.

Brown J, Hinkel KM, Nelson FE, (2000). The Circumpolar Active Layer Monitoring (CALM) program: research designs and initial results. Polar Geography, 24(3): 165-258.

Hinkel KM, Nelson FE, (2003). Spatial and temporal patterns of active-layer thickness at Circumpolar Active-Layer Monitoring (CALM) sites in Northern Alaska, 1995-2000. Journal of Geophysical Research, 102(D2): 8168.

