

# EVOLUZIONE DEL MANTO NEVOSO SU GHIACCIAIO in differenti condizioni meteorologiche

L'esempio del Ghiacciaio di Indren nelle stagioni invernali 2002-03 e 2005-06

**Margherita Maggioni  
e Michele Freppaz**

Università degli Studi di Torino,  
Di.Va.P.R.A.  
Laboratorio Neve e Suoli Alpini

**Paolo Piccini,  
Emil Squinobal  
e Hervé Jaccond**

Università degli Studi di Torino,  
Di.Va.P.R.A.  
Laboratorio Neve e Suoli Alpini

**Silvano Gandino**  
Comando Truppe Alpine  
Servizio Meteomont

L'evoluzione del manto nevoso è stata studiata sul ghiacciaio di Indren, localizzato nelle Alpi Nord-occidentali, in stagioni caratterizzate da differenti condizioni meteorologiche: nell'inverno 2002-2003, ricco di neve da inizio stagione, e nell'inverno 2005-2006, povero di neve fino a Febbraio. Periodicamente sono stati eseguiti profili nivologici per la valutazione delle caratteristiche fisiche della neve, mentre con l'impiego di data-loggers è stata misurata in continuo la temperatura all'interfaccia neve/ghiaccio. Inoltre, nell'inverno 2002-2003, è stata valutata l'influenza di un incremento di densità del manto nevoso (prodotto mediante battitura meccanica) sulla sua evoluzione.

Dalle due stagioni analizzate, è emerso che un manto nevoso di sufficiente spessore è in grado di mantenere la temperatura all'interfaccia neve/ghiaccio intorno a - 5 °C fino a quando il manto nevoso raggiunge condizioni di isotermità, mentre, durante l'inverno 2005-2006, la minor quantità di neve non ha permesso alla temperatura basale di raggiungere condizioni di equilibrio, che ha invece oscillato tra valori di - 2 e - 8 °C.

La maggior densità non ha prodotto effetti sulla temperatura all'interfaccia neve/ghiaccio, mentre ha causato un ritardo nel raggiungimento dell'isotermità, permettendo quindi al manto nevoso battuto di resistere più a lungo alla fusione.



Fig. 1a - Localizzazione del ghiacciaio di Indren nelle Alpi Nord-occidentali.

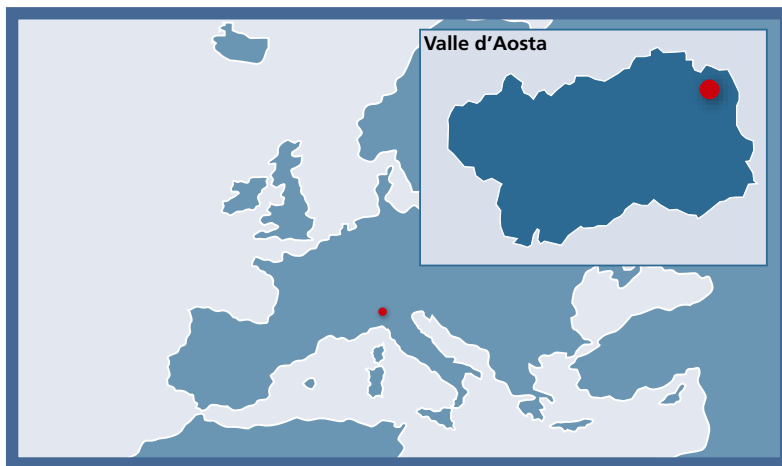
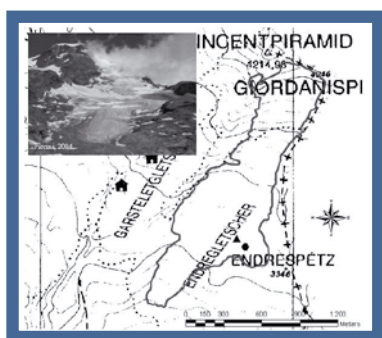


Fig. 1b - Localizzazione del sito di studio. Il triangolo indica la posizione dei siti sperimentali dell'inverno 2002-2003, il cerchio la posizione di quello dell'inverno 2005-2006. Elemento della CTRN ceduto in data 05.12.2006 n. 1072.



## INTRODUZIONE

Nell'ambito della Convenzione della Regione Autonoma Valle d'Aosta, Assessorato Territorio, Ambiente e Opere Pubbliche con il Laboratorio Neve e Suoli Alpini dell'Università di Torino per la "Consulenza e supervisione scientifica in materia di prevenzione dei rischi pedo-ambientali e valanghivi nel territorio della Valle d'Aosta", in Valle d'Aosta è stato condotto uno studio sull'evoluzione del manto nevoso su substrato glaciale. Quando la neve si deposita al suolo, comincia a trasformarsi in modo differente a seconda delle condizioni di temperatura ed umidità. Una variabile fondamentale per l'evoluzione del manto nevoso è il gradiente termico, che è legato alla temperatura basale. La temperatura all'interfaccia neve/substrato (o temperatura basale) è determinata da diverse variabili nivometeorologiche, come l'altezza e la densità del manto nevoso e la temperatura dell'aria, ma anche dal tipo di substrato, che nelle Alpi può essere suolo non gelato, suolo a permafrost o ghiacciaio (Philips e Schweizer, 2007).

In genere, suoli non gelati presentano temperature intorno agli 0 °C, anche in inverni rigidi, se il manto nevoso è abba-

stanza spesso da isolare il suolo dalle rigide temperature dell'aria esterne (Edwards et al, 2007). I suoli a permafrost, sotto una consistente coltre nevosa, sono caratterizzati da temperature più basse, variabili tra - 3 e - 5 °C.

Il metodo BTS (bottom temperature of the winter snow cover) è una tecnica consolidata per l'individuazione delle aree a permafrost (Haeberli, 1973).

Le temperature basali, sia in caso di suoli non gelati che gelati (permafrost), sono state misurate in diversi lavori (Brooks et al., 1995; Stadler et al., 1996; Brooks e Williams, 1999; Shanley e Chalmers, 1999), mentre non esiste molta letteratura relativa alle condizioni termiche all'interfaccia tra neve e ghiacciaio. Kuhn et al. (1998), nello studio relativo allo sviluppo stagionale della concentrazione degli ioni all'interno del manto nevoso in un ghiacciaio del Tirolo, hanno trovato che neviccate precoci sono in grado di mantenere la temperatura all'interfaccia neve/ghiacciaio tra - 5 e 0 °C durante tutta la stagione invernale. Kojima et al. (2004), nello studio sul manto nevoso al di sopra del ghiaccio marino in Barrow, Alaska, hanno determinato una relazione tra la temperatura basale, l'altezza del manto nevoso e la temperatura dell'aria.

Lo scopo del presente lavoro è l'analisi delle caratteristiche del manto nevoso su un ghiacciaio italiano, con particolare attenzione all'evoluzione delle temperature all'interfaccia neve/ghiacciaio durante due stagioni caratterizzate da condizioni meteorologiche differenti: l'inverno 2002-2003, con importanti neviccate già

ad inizio stagione, e l'inverno 2005-2006, con scarso innevamento fino alla fine di Febbraio. Questa ricerca è volta in particolare ad evidenziare l'influenza di differenti quantità di neve sull'evoluzione del manto nevoso e sul regime termico degli strati superficiali del ghiacciaio.

Inoltre, nella stagione 2002-2003, in un plot è stata aumentata la densità del manto nevoso tramite battitura meccanica, per ricreare un manto nevoso che in realtà potrebbe generarsi da neviccate più umide. L'ulteriore incremento delle temperature dell'aria atteso nei prossimi anni (IPCC, 2007) potrebbe infatti determinare una maggiore frequenza di precipitazioni di neve umida, così come di episodi di pioggia su neve, determinando un generale incremento dei valori di densità del manto nevoso.

Le caratteristiche del manto nevoso in inverno influenzano la "resistenza" della neve alla fusione primaverile, ma non esistono relazioni certe tra le caratteristiche del manto nevoso invernale su ghiacciaio ed il bilancio di massa del ghiacciaio stimato alla fine della stagione di ablazione. Il lavoro dell'IAHS(CSII)/UNEP/UNESCO (1996) ha mostrato che sul ghiacciaio Maliy Aktru in Russia la temperatura dell'aria durante la stagione di ablazione ha maggior influenza della neve fresca cumulata durante la stagione di accumulo sul bilancio di massa. Anche Zempt et al. (2006) hanno verificato che la linea di equilibrio di un ghiacciaio è molto più sensibile ad un cambiamento della temperatura che ad un cambiamento nel regime delle precipitazioni.

Il presente lavoro non mira a trovare una relazione diretta tra le caratteristiche della neve invernale e l'evoluzione del ghiacciaio, ma permette di trarre alcune conclusioni generali sull'influenza delle condizioni nivo-meteorologiche invernali sull'evoluzione del manto nevoso su un substrato glaciale.

## MATERIALI E METODI

### Area di studio

L'area di studio è situata sul ghiacciaio di Indren, un ghiacciaio temperato di circa



100 ha situato in Valle d'Aosta sulle Alpi Nord-Occidentali. L'altitudine varia tra 3000 e 4100 m s.l.m., l'esposizione è Sud-Ovest e l'alimentazione prevalente è da nevicate, ma anche da trasporto eolico e valanghe. L'accesso avveniva tramite una funivia da Alagna Valsesia (VC) fino all'inverno 2006-2007 (Figura 1a e 1b). Agli inizi degli anni '70 il ghiacciaio ha cominciato ad essere utilizzato per scopi turistici in estate ed inverno: nel 1965 venne costruita una funivia da Alagna Valsesia fino a Punta Indren (3260 m s.l.m.) e nel 1966 il primo ski-lift, seguito da un secondo nel 1982. A causa della consistente riduzione di superficie glaciale, la pratica dello sci estivo fu interrotta nel 1997.

### Dati nivo-meteorologici

L'evoluzione del manto nevoso è stata monitorata da misure automatiche in continuo e da rilievi manuali periodici, al fine di determinare le caratteristiche fisiche del manto nevoso.

Nell'inverno 2002-2003, sono stati individuati due siti sperimentali, uno in cui il manto nevoso è stato mantenuto indisturbato (SI), uno invece in cui è stata aumentata la densità del manto nevoso mediante battitura meccanica (SB). Nell'inverno 2005-2006 la sperimentazione è stata condotta soltanto nel sito indisturbato.

In entrambe le stagioni, data-loggers UTL-1 sono stati posizionati all'interfaccia neve/ghiaccio per misurare in modo continuo la temperatura alla base del manto nevoso: gli strumenti sono stati programmati per registrare la temperatura con frequenza oraria. Il periodo di registrazione è stato di 175 giorni (17.01 – 12.07.2003) nell'inverno 2002-2003 e di 264 giorni (18.11.2005 – 8.07.2006) nell'inverno 2005-2006. La temperatura dell'aria, lo spessore del manto nevoso e altri parametri nivo-meteorologici sono stati misurati in entrambe le stagioni dalla stazione automatica della Regione Autonoma Valle d'Aosta localizzata presso il Lago Gabiet a 2379 m s.l.m., circa 1 km a Sud del ghiacciaio di Indren.

Durante l'inverno 2005-2006, è stato

possibile registrare i parametri nivo-meteorologici anche grazie alla stazione automatica del Comando Truppe Alpine – Servizio Meteomont, localizzata al Col d'Olen a 2901 m s.l.m., circa 1 km a Sud del sito in esame. In ogni caso, in questa ricerca, abbiamo considerato i dati della stazione del Lago Gabiet per entrambe le stagioni, seppur posta ad una quota inferiore; la stazione Meteomont del Col d'Olen è stata utilizzata per controllare i parametri su un gradiente altitudinale. Per quanto riguarda i dati sulle caratteristiche della neve, sono stati eseguiti

periodicamente dei profili nivologici per determinare la struttura del manto nevoso ed il gradiente termico al suo interno, in accordo alle procedure standardizzate dell'AINEVA.

## RISULTATI

La peculiarità di questo studio è quella di aver avuto l'opportunità di confrontare l'evoluzione del manto nevoso su ghiacciaio in due stagioni caratterizzate da condizioni meteorologiche differenti. L'inverno 2002-2003 ha visto nevicate già ad inizio stagione, mentre l'inverno

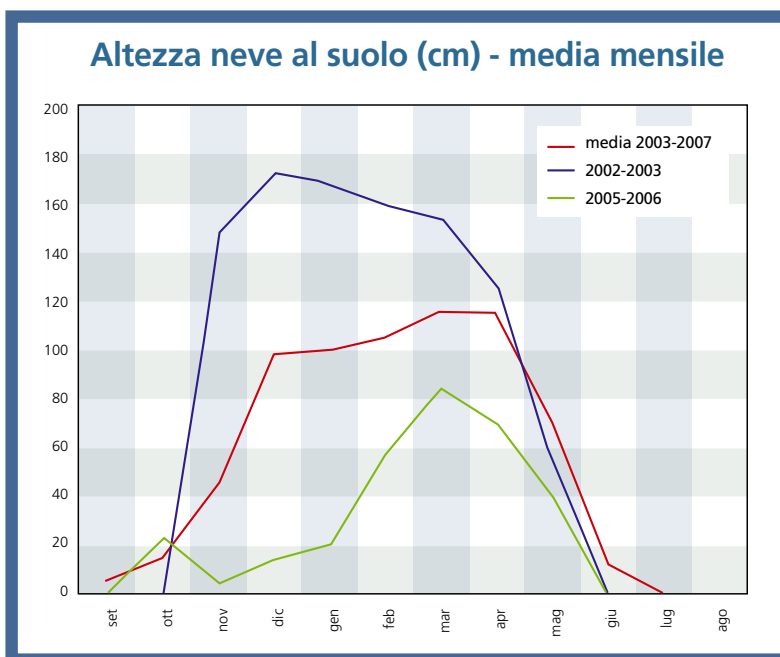


Fig. 2 - Altezza neve misurata dalla stazione nivometeorologica automatica del Gabiet (2379 m s.l.m.).

Ghiacciaio di Indren. Sullo sfondo la stazione di arrivo della funivia che collegava Alagna Valsesia con il ghiacciaio



2005-2006 è stato avaro di nevicate fino a Febbraio 2006 (Figura 2). In termini di temperatura, la prima stagione è stata di 1 °C più calda della seconda, con una temperatura media dell'aria a 2379 m s.l.m. di - 2.4 °C nel periodo Novembre-Giugno. Questa ricerca è un progetto ancora in atto, quindi si spera di arricchirlo con dati da stagioni future caratterizzate da condizioni meteorologiche ancora differenti. Le proprietà fisiche del manto nevoso nelle due stagioni considerate sono mostrate in modo comparato nella tabella di figura 3 e descritte nelle sezioni seguenti

### Caratteristiche del manto nevoso per le stagioni 2002-2003 e 2005-2006

A parte per l'altezza massima, tutti sono valori medi.

Parametro	2002-2003 SI	2002-2003 SB	2005-2006
max altezza neve (cm)	324	315	200
tipo di cristallo nello strato basale	6b	6b	4a, 5a
max dimensione dei cristalli nello strato basale (mm)	-	-	3
durezza nello strato basale	6	6	4
T all'interfaccia neve/ghiaccio (°C)*	-4.8	-4.9	-6.8
gradiente termico su tutto il manto (°C/m)	-0.80	-0.83	-2.81
T neve a 50 cm (°C)	-3.73	-3.83	-5.2
gradiente termico nei 50 cm basali (°C/cm)	-0.04	-0.6	-2.29
densità (Mg/m <sup>3</sup> )	0.531	0.563	0.341
conducibilità termica (W m <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	0.525	0.598	0.186

\* valori calcolati dai dati registrati dai data-logger nel periodo 18 gennaio - 28 aprile.

Fig. 3

Area di studio nel Ghiacciaio di Indren



(a) e (b). La conducibilità termica effettiva del manto nevoso viene descritta da  $k = 0.138 - 1.01 \rho + 3.233 \rho^2$ , dove  $\rho$  rappresenta la densità della neve (Strum et al., 1997).

### (a) Evoluzione del manto nevoso nell'inverno 2002-2003, ricco di neve

Nella stagione invernale 2002-2003, la precipitazione nevosa cumulata è stata consistente, in particolare ad inizio stagione, quando, in Novembre, si è verificata la nevicata più importante, apportando 90 cm di neve fresca in 2 giorni ad una quota di 2379 m s.l.m.. Il 17 Gennaio lo spessore del manto nevoso era 324 cm a 3350 m: 77 cm di firn della stagione precedente e 247 cm dalle nevicate della stagione corrente. Nel periodo di apertura degli impianti del Comprensorio sciistico MonterosaSki (22.12.2002 - 4.05.2003) la neve fresca cumulata misurata a Punta Indren è stata di 211 cm.

Lo spessore del manto nevoso è diminuito costantemente sia nel sito indisturbato (PI) che in quello battuto (PB). Tra il 25 Aprile e il 12 Luglio, ad una quota di circa 3400 m s.l.m., lo spessore del manto è diminuito di circa 205-250 cm, pari in media a 2.6-3.1 cm al giorno.

### Sito indisturbato (SI)

Nel sito indisturbato, durante i mesi di Gennaio e Febbraio è stato rilevato nel manto nevoso esclusivamente un debole gradiente termico. In tutti i profili nivologici, i cristalli arrotondati di tipo 3 sono

stati il tipo prevalente. In Febbraio, è stata individuata una crosta da vento sulla superficie del manto, mentre, a fine Marzo, una crosta da fusione e rigelo, a seguito dell'instaurarsi di un metamorfismo da fusione e rigelo; solo in questo profilo sono stati trovati anche cristalli di tipo 4, in uno strato sottile sotto la crosta superficiale. Il 25 Aprile il manto nevoso si presentava in isoterma con presenza di cristalli di tipo 6 (3 mm) e alcune lenti di ghiaccio. Il 12 Luglio è stato trovato, alla base del manto nevoso, uno strato di ghiaccio di sovrapposizione spesso 10 cm.

### Sito battuto (SB)

Nel sito battuto meccanicamente, al fine di aumentare la densità del manto nevoso, la maggior densità ha influenzato la temperatura all'interno del manto. In Febbraio, lo strato superficiale era molto compatto ( $\rho = 470 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ ), mentre nel SI la neve nei primi 80 cm superficiali presentava una densità di  $280 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ . Gli strati sottostanti avevano densità paragonabili, mentre la temperatura della neve era molto differente: - 7.7 °C per il SI e - 12.5 °C per il SB. In Marzo, si sono rilevate densità simili al mese precedente. La temperatura dell'aria è stata positiva (+ 5 °C) e ha avuto un'influenza sugli strati superficiali, dove sono stati osservati grani arrotondati. Comunque, ad 1 metro di profondità è stata riscontrata una differenza di temperatura di circa 3 °C (- 5.5 °C per il SI e - 8.3 per il SB). In Aprile, abbiamo riscontrato una differenza significativa tra i due plot: il PI aveva i primi 150 cm già in uno stato di isoterma, mentre la temperatura nel SB, a parte i primi 10 cm, era intorno a -1, -2 °C. Il grafico in Figura 4 mostra l'andamento della temperatura all'interfaccia neve/ghiaccio per i due siti nell'inverno 2002-2003. La temperatura è rimasta costante intorno ad un valore di circa - 5 °C fino al 18 Aprile, quando è aumentata di 2 °C in 24 ore. Il 24 Marzo lo spessore del manto nevoso era di 300 cm, uno spessore ancora capace di isolare la superficie del ghiacciaio e mantenere costante la temperatura di interfaccia. Ad inizio Aprile la temperatura dell'aria è salita rapidamente da - 20 a - 6 °C a causa

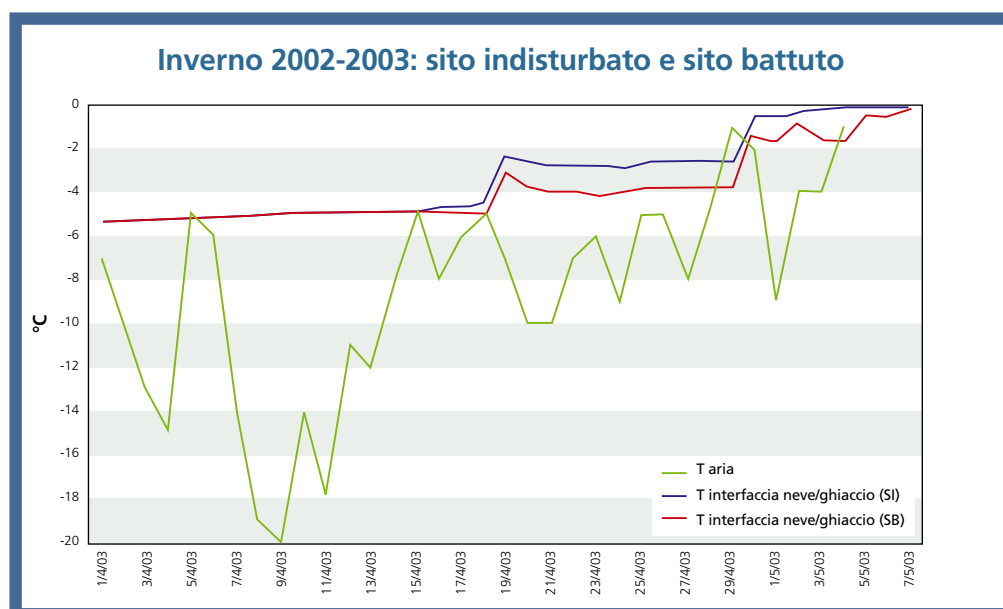
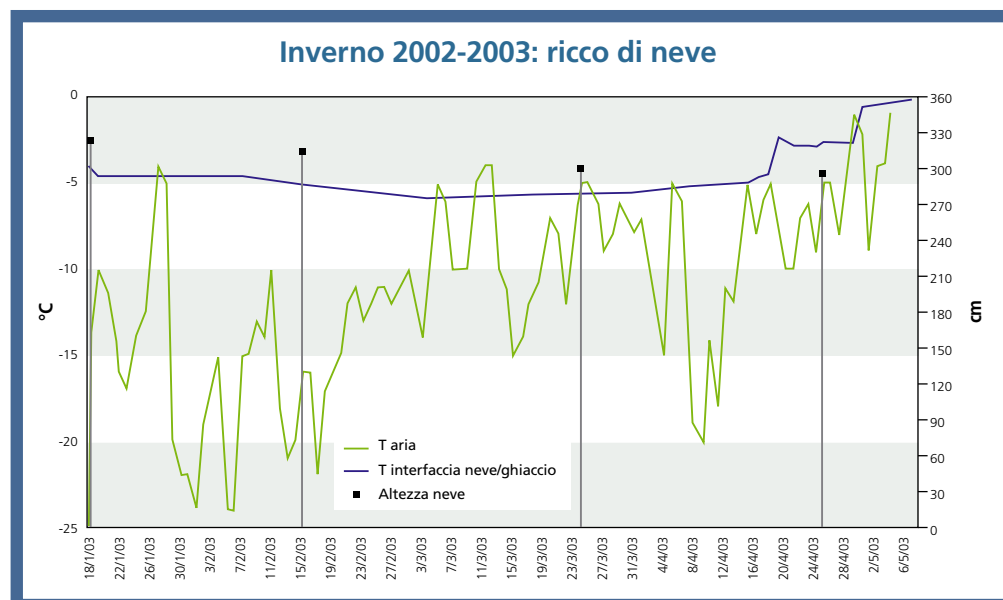
di un'irruzione sulle Alpi di aria calda da Sud-Ovest. La reazione della temperatura basale a tale variazione è cominciata una settimana dopo, il 18 Aprile, quando essa raggiunge un valore di  $-3\text{ }^{\circ}\text{C}$  per il SI e di  $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$  per il SB, mantenuta costante fino al 1 Maggio. Tra il 29 Aprile ed il 1 Maggio, un aumento di temperatura dell'aria di  $2\text{ }^{\circ}\text{C}$  ha portato il SI a condizioni di completa isotermia, mentre ci sono voluti ancora 7 giorni prima che anche il SB raggiungesse gli  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$  (Figura 5). Il 12 Luglio, è stato trovato alla base del manto nevoso uno strato di ghiaccio di sovrapposizione spesso  $20\text{ cm}$ .

### (b) Evoluzione del manto nevoso nell'inverno 2005-2006, povero di neve

L'inverno 2005-2006 è stato molto secco nell'area del Monte Rosa. Per questo motivo, la funivia Alagna – Punta Indren è rimasta chiusa tutta la stagione, rendendo difficoltoso il raggiungimento dell'area di studio per l'esecuzione dei profili nivologici. Lo spessore del manto nevoso misurato il 18 Novembre era solo di  $90\text{ cm}$  a  $3400\text{ m s.l.m.}$  e così è rimasto fino a fine Gennaio. Non ci è stato possibile raggiungere il sito fino all'inizio di Aprile, quando lo spessore del manto era aumentato fino a  $180\text{ cm}$ , spessore comunque esiguo per la quota.

L'evoluzione del manto nevoso è stata monitorata in modo continuo dalla stazione automatica del Comando Truppe Alpine – Servizio Meteomont del Col d'Olen ( $2901\text{ m s.l.m.}$ ). Durante la stagione invernale, sono state registrate due importanti nevicate: il 27 Gennaio con  $70\text{ cm}$  di neve fresca e temperatura minima e massima dell'aria rispettivamente di  $-23$  e  $-15\text{ }^{\circ}\text{C}$ , il periodo 16-18 Febbraio con nevicate irregolari per un totale di  $80\text{ cm}$  di neve fresca, che portano il manto nevoso a  $170\text{ cm}$  di spessore.

Riguardo l'evoluzione del manto nevoso, nei mesi di Gennaio e Febbraio, si è instaurato un regime di elevato gradiente con la formazione di cristalli sfaccettati di tipo 4, ritrovati poi in tutti i rilievi fino a Maggio. Sebbene già in Febbraio le condizioni termiche avessero portato



all'instaurarsi di un debole gradiente, le forme sfaccettate sono rimaste nel manto nevoso fino a quando non è stata raggiunta l'isotermia e quindi hanno subito processi di fusione-rigelo.

Il grafico di Figura 6 mostra l'andamento delle temperature all'interfaccia neve/ghiaccio. La temperatura è diminuita regolarmente fino ad un valore di  $-8\text{ }^{\circ}\text{C}$  registrato a metà Gennaio; non è rimasta stabile intorno al valore  $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ , come nell'inverno 2002-2003, ma ha sempre oscillato di alcuni gradi fino alla fine di Febbraio, quando il manto nevoso ha raggiunto uno spessore sufficiente da isolare la superficie del ghiacciaio dalle fluttuazioni della temperatura esterna.

Solo dal 17 Febbraio, lo spessore del man-

to nevoso ha superato i  $100\text{ cm}$  e la temperatura basale ha cominciato ad essere più costante intorno ad un valore di circa  $-5.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ . La nevicata di fine Gennaio ha portato il manto nevoso da  $82$  a  $142\text{ cm}$ , che poi è diminuito di nuovo a  $92\text{ cm}$  in 13 giorni (probabilmente a causa dell'azione di erosione del vento).

Perciò, in quei giorni, la temperatura basale è stata ancora influenzata dalle oscillazioni della temperatura dell'aria.

La condizione di isotermia completa è stata raggiunta il 14 Maggio.

È interessante notare come la reazione della temperatura all'interfaccia neve/ghiaccio alla temperatura dell'aria avvenga sempre con uno shift temporale di 5-6 giorni.

Fig. 4 - Evoluzione della temperatura all'interfaccia neve/ghiaccio nel 2002-2003 per il sito indisturbato, SI, (linea nera). La linea verde mostra la temperatura dell'aria registrata alla stazione del Gabet ( $2379\text{ m s.l.m.}$ ) nello stesso periodo ed i quadratini neri indicano l'altezza neve misurata in occasione dei rilievi nivologici.

Fig. 5 - Evoluzione della temperatura all'interfaccia neve/ghiaccio nel 2002-2003 per il sito indisturbato, (linea blu continua) e per il sito battuto, (linea rossa), quando il manto nevoso ha raggiunto condizioni di isotermia (1 aprile – 7 maggio).

## Inverno 2005-2006: povero di neve

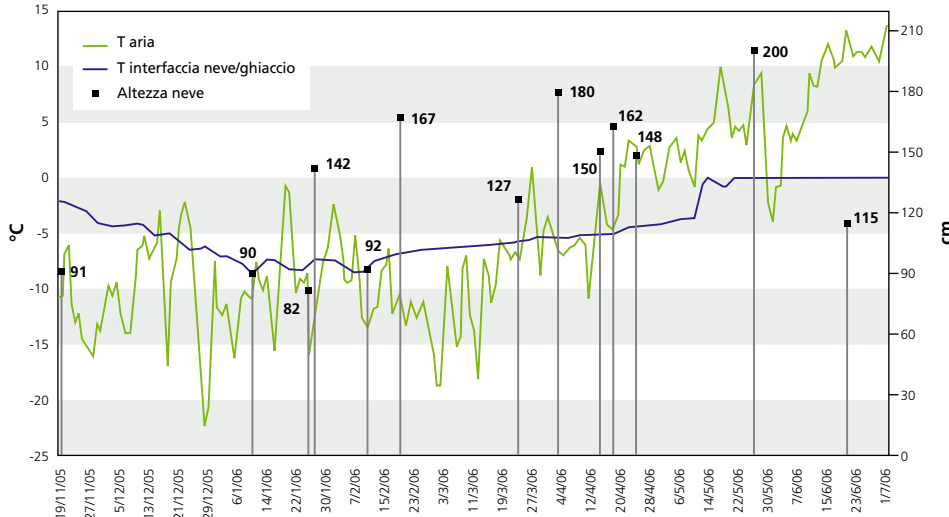


Fig. 6 - Evoluzione della temperatura all'interfaccia neve/ghiaccio nel 2005-2006 (linea blu). La linea verde mostra la temperatura dell'aria registrata alla stazione del Gabiet (2379 m s.l.m.) nello stesso periodo ed i quadratini neri indicano l'altezza neve misurata in occasione dei rilievi nivologici.

Foto a lato: installazione data loggers.



## DISCUSSIONE

Il monitoraggio dell'evoluzione del manto nevoso sul ghiacciaio di Indren in presenza di condizioni meteorologiche differenti ha permesso di comprendere le relazioni tra alcuni parametri nivologici e le variabili meteorologiche. In particolare, la temperatura all'interfaccia neve/ghiaccio è risultata molto sensibile alle oscillazioni della temperatura dell'aria, quando il manto nevoso non aveva uno spessore sufficiente ad isolare la superficie del ghiacciaio. In entrambe le stagioni considerate, uno spessore di almeno 100 cm è risultato necessario per mantenere la temperatura basale costante intorno al valore di  $-5^{\circ}\text{C}$ . Questo valore è stato trovato anche da Kuhn et al. (1998), ma non esistono in letteratura altri studi in

grado di approfondire tale caratteristica. Occorre capire se tale temperatura sia legata al flusso di calore nel ghiacciaio o alla temperatura dell'aria al momento del primo accumulo consistente di neve stagionale, o ad entrambi. L'andamento della temperatura dell'aria in entrambe le stagioni è stata analizzata per controllare che le condizioni termiche atmosferiche fossero simili, in modo da stabilire i principali fattori che influenzano la temperatura all'interfaccia neve/ghiaccio. Nell'inverno 2002-2003, Dicembre e Marzo mostrano una temperatura media dell'aria di  $3^{\circ}\text{C}$  più fredda rispetto agli stessi mesi dell'inverno 2005-2006; Febbraio 2003 è stato di  $3^{\circ}\text{C}$  più freddo di Febbraio 2006; in Gennaio le temperature medie sono state simili ( $-8.2^{\circ}\text{C}$ ) così come in Aprile

( $0^{\circ}\text{C}$ ) e Maggio ( $4^{\circ}\text{C}$ ), quando il manto nevoso ha raggiunto condizioni isotermitiche. Perciò, per l'inverno 2002-2003, non possiamo escludere l'influenza delle temperature più elevate sulla riduzione del metamorfismo da elevato gradiente, ma riteniamo che la temperatura dell'aria abbia avuto una minore influenza rispetto allo spessore della neve sull'andamento della temperatura all'interfaccia neve/ghiaccio. Un altro parametro importante quando si parla di proprietà termiche del manto nevoso è la densità, che ne determina la conducibilità termica: maggiore è la densità, maggiore è la conducibilità termica (Sturm et al., 1997).

Per il plot indisturbato, nell'inverno 2002-2003, l'effettiva conducibilità termica media  $k$  è risultata pari a  $0.531\text{ W m}^{-1}\text{ K}^{-1}$ , mentre per il plot battuto è stata di  $0.598\text{ W m}^{-1}\text{ K}^{-1}$ ; nell'inverno 2005-2006,  $k$  è stata pari a  $0.186\text{ W m}^{-1}\text{ K}^{-1}$ .

Si può calcolare il flusso di calore attraverso il manto nevoso attraverso la seguente relazione:  $q = k\Delta T/\Delta Z$ , dove  $\Delta T/\Delta Z$  rappresenta il gradiente termico (Rixen et al., 2007). Per entrambe le stagioni, il flusso di calore è risultato positivo fino alla fine di Aprile, quando ha cambiato segno; ciò indica che durante i mesi invernali il flusso di calore prevalente è stato dalla base alla superficie del manto nevoso, mentre nei mesi primaverili, in condizioni di isotermitia, il flusso si è invertito, andando dalla superficie del manto alla superficie del ghiacciaio. Le minori temperature misurate negli strati interni del manto nevoso del sito battuto potrebbero essere attribuite al minor fattore di isolamento della neve a causa della sua maggiore densità. Inoltre, si può ritenere che l'incremento di densità, nel sito battuto, possa aver rallentato il processo di percolazione dell'acqua dagli strati superficiali, mentre la maggior porosità della neve nel plot indisturbato ha permesso all'acqua di fusione di percolare più facilmente dagli strati superficiali alla base del manto. La velocità di percolazione è stata calcolata, con riferimento al momento in cui la temperatura di interfaccia ha raggiunto gli  $0^{\circ}\text{C}$  ed a quello in cui tutto il manto



nevoso ha raggiunto l'isoterma. Nel sito indisturbato tale velocità è pari a 1.02 cm h<sup>-1</sup>, mentre per il sito battuto SB essa è pari a 0.7 cm h<sup>-1</sup>. In un clima più caldo, è plausibile che la densità della neve tenda ad aumentare, poiché temperature maggiori possono causare neve più umida ed aumentare la frequenza degli episodi di pioggia sulla neve. In questo lavoro, il sito battuto, potrebbe quindi simulare manti nevosi più densi generati da nevicate più umide. Ciò sembrerebbe tradursi in un effetto positivo sulle unità glaciali. A causa del riscaldamento globale vi è un crescente interesse nello studio degli effetti del cambiamento climatico sugli ecosistemi naturali. I ghiacciai sono molto sensibili a tali cambiamenti, perdendo una grossa quantità di massa ogni anno a causa dell'aumento della temperatura e del minor accumulo nevoso. Esistono diverse esperienze pratiche e studi di settore che cercano di fronteggiare tale perdita di massa; per esempio, Olefs et al. (in press) hanno analizzato la reazione di un ghiacciaio a differenti trattamenti, in modo da trovare il metodo migliore per raggiungere un bilancio di massa positivo.

## CONCLUSIONI

Il presente studio aveva lo scopo di analizzare le caratteristiche del manto nevoso su di un ghiacciaio alpino, con particolare attenzione all'influenza dello spessore e della densità del manto nevoso, variabili che possono mutare in relazione ai cambiamenti climatici, sull'evoluzione della temperatura all'interfaccia neve/ghiaccio. I risultati ottenuti sembrano evidenziare come un manto nevoso di sufficiente spessore (100 cm), accumulatosi presto nella stagione invernale, sia capace di isolare la superficie del ghiacciaio e mantenere la temperatura all'interfaccia neve/ghiaccio intorno al valore di - 5 °C fino al raggiungimento dell'isoterma. Al contrario, uno spessore esiguo di neve, non permette di raggiungere condizioni di equilibrio, facendo quindi oscillare la temperatura basale fra - 2 e - 8 °C, in relazione alle variazioni della temperatura dell'aria. L'incremento di densità non ha avuto effetti sulla temperatura all'interfaccia neve/ghiaccio, ma ha generato un ritardo nel raggiungimento delle condizioni di isoterma, permettendo quindi al manto nevoso di permanere più a lungo sulla superficie del ghiacciaio.



Plot sperimentali sul ghiacciaio di Indren.

## Ringraziamenti

Questo lavoro è stato realizzato nell'ambito della Convenzione tra l'Università degli Studi di Torino, DIVAPRA – LNSA, e la Regione Autonoma Valle d'Aosta – Assessorato Territorio, Ambiente e Opere Pubbliche per la "Consulenza e supervisione scientifica in materia di prevenzione dei rischi pedo-ambientali e valanghivi nel territorio della Valle d'Aosta". Si ringraziano la MonterosaSki e le Guide Alpine Arnoldo Welf, Matteo Giglio, Marco Zaninetti, Michele Cucchi e Renzo Squinobal per il supporto logistico nella strumentazione del sito e nell'esecuzione dei rilievi nivologici e Antoine Brulport per l'aiuto nella fase di elaborazione dati.

## Bibliografia

- Brooks, P.D., Williams, M.W. e Schmidt, S.K., 1995: Snowpack controls on nitrogen dynamics in the Colorado alpine. In: Tonnessen K., Williams M., Tranter M., (eds.): Biogeochemistry of snow-covered catchments, 283-292. International Association of Hydrological Sciences Publication 228, Wallingford, UK.
- Brooks, P.D. e Williams, M.W., 1999: Snowpack controls on nitrogen cycling and export in seasonally snow-covered catchments. Hydrological Processes, 13: 2177-2190.
- Edwards, A.C., Scalenghe, R. e Freppaz, M. (2007). Changes in the seasonal snow cover of alpine regions and its effect on soil processes: a review. Quaternary International, 162-163: 172-181.
- Freppaz, M., Williams, B.L., Edwards, A.C., Scalenghe, R. e Zanini, E., 2007: Labile nitrogen, carbon and phosphorus dynamics at low temperatures in seasonally snow covered soils (NW Italy). Biology and Fertility of Soils, 43: 519-529.
- Haeberli, W., 1973: Die Basis-Temperatur der Winterlichen Schneedecken als möglicher Indikator fuer die Verbreitung von Permafrost in den Alpen. Zeitschrift fuer Gletscherkunde und Glazialgeologie, 9:221-227.
- IPCC, 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of the Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Cambridge: Cambridge University Press. 1009 pp.
- Kojima, S., Saito, Y. e Enomoto, H., 2004: Thermal dependence of brine salinity in the surface layer of snow-covered sea ice under the variable conditions. Proceeding of the American Geophysical Union, San Francisco, California, 13-17 December 2004.
- Kuhn, M., Haslhofer, J., Nickus, U. e Schellander, H., 1998: Seasonal development of ion concentration in a high alpine snow pack. Atmospheric Environment, 32 (23): 4041-4051.
- Olefs, M., Fischer, A. e Lang, J., 2007: The role of artificial accumulation increase within glacier skiing resorts. A feasibility study. Proceedings of the European Geoscience Union, Wien, 15-20 April 2007.
- Phillips, M. e Schweizer, J., 2007: Effect of mountain permafrost on snowpack stability. Cold Regions Science and Technology, 47: 43-49.
- Rasmus, S., Räisänen, J. e Lehning, M., 2004: Estimating snow conditions in Finland in the late 21st century using the SNOWPACK model with regional climate scenario data as input. Annals of Glaciology, 38: 238-244.
- Rixen, C., Haeberli, W. e Stoeckli, V., 2004: Ground Temperatures under Ski Pistes with Artificial and Natural Snow. Artic, Antarctic and Alpine Research, 36 (4): 419-427.
- Sturm, M., Holmgren, J., König, M., e Morris, K., 1997: The thermal conductivity of seasonal snow. Journal of Glaciology, 43: 26-41.
- Taylor, B.R. e Jones, H.G., 1990: Litter decomposition under snow cover in a balsam fir forest. Canadian Journal of Botany, 68: 112-120.
- Shanley, J.B. e Chalmers, A., 1999: The effect of frozen soil on snowmelt runoff at Sleepers River, Vermont. Hydrological Processes, 13: 1843-1858.
- Stadler, D., Wunderli, H., Auckenthaler, A. e Fluhler, H., 1996: Measurement of frost-induced snowmelt runoff in a forest soil. Hydrological Processes, 10: 1293-1304.
- IAHS(ICSU)/UNEP/UNESCO, 1996: Glacier Mass Balance Bulletin No. 4. Eds: Haeberli, W., Hoelzle, M. and Suter, S. World Glacier Monitoring Service, Zurich.
- Zemp, M., Hoelze, M. e Haeberli, W., 2007: Distributed modelling of the regional climatic equilibrium line altitude of glaciers in the European Alps. Global and Planetary Change, 56: 83-100.