

# VARIABILITA' SPAZIALE DELL'ALBEDO

## SULLE AREE GLACIALI DELL'ALTA VAL DE LA MARE (Gruppo Ortles-Cevedale)

**Luca Carturan e  
Giancarlo Dalla Fontana**  
Dipartimento Territorio e Sistemi  
Agro-Forestali, Università di Padova

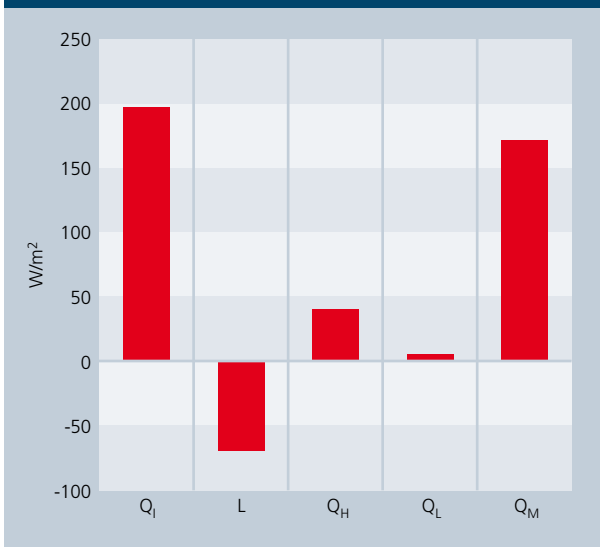
**Francesco Cossi**  
Via S. Marta 2, 23035, Sondalo (SO)  
email:francesco\_cossi@libero.it

Nell'ambito di un progetto di ricerca sulla criosfera e sugli effetti idrologici delle variazioni climatiche nei bacini di alta quota, è stato eseguito uno studio sulla variabilità spaziale dell'albedo in ghiacciaio. La campagna di rilievi è stata condotta nelle estati del 2007 e del 2008 sui ghiacciai dell'alta Val de La Mare (Gruppo Ortles-Cevedale, Trentino).

L'albedo regola la quantità di radiazione ad onde corte assorbita dalla superficie ed è quindi determinante nel modulare il bilancio energetico e il bilancio di massa glaciale. Le parametrizzazioni comunemente riportate nella letteratura scientifica sono generalmente orientate alla descrizione della variabilità spazio-temporale dell'albedo della neve, mentre l'albedo del ghiaccio è spesso assunto costante o parametrizzato in modo molto più semplice, ad esempio in funzione della quota. I rilievi eseguiti in alta Val de La Mare evidenziano un'elevata variabilità dell'albedo del ghiaccio di ghiacciaio, che è funzione soprattutto della copertura detritica superficiale. Sulla base di queste osservazioni, si è cercato di mettere a punto un metodo speditivo che consente una valutazione semplice ed affidabile dell'albedo, basato su rilievi fotografici da terra. I risultati ottenuti confermano che il metodo proposto consente di cogliere in modo adeguato la variabilità spaziale dell'albedo sul ghiaccio di ghiacciaio.



## COMPONENTI BILANCIO ENERGETICO MEDIE GHIACCIAIO DE LA MARE



## IMPORTANZA DELL'ALBEDO IN GHIACCIAIO E VALORI TIPICI

L'attuale fase di riscaldamento climatico sta producendo effetti tangibili sulle riserve idriche accumulate sotto forma di neve e ghiaccio del nostro pianeta.

Anche sulle Alpi europee il processo di deglaciazione ha assunto caratteristiche di notevole intensità negli ultimi 20-30 anni.

Soprattutto a partire degli anni '90 si è assistito al moltiplicarsi degli studi che riguardano la meteorologia e il bilancio energetico e di massa sui ghiacciai (Hock, 2005; Oerlemans, 2000).

Queste indagini hanno messo in eviden-

za come, tra le componenti del bilancio energetico, la radiazione ad onda corta sia la più importante nelle fasi in cui avviene l'ablazione (Figura 1)

L'equazione del bilancio energetico riferita alla superficie di un ghiacciaio riporta, in  $Wm^{-2}$ , la somma algebrica delle diverse componenti:

$$Q_M = Q_I + L + Q_H + Q_L + Q_S$$

dove  $Q_M$  è l'energia disponibile per la fusione,  $Q_I$  è il flusso netto di radiazione ad onda corta,  $L$  è il flusso netto di radiazione ad onda lunga,  $Q_H$  e  $Q_L$  sono i flussi turbolenti di calore sensibile e latente, e  $Q_S$  è il flusso energetico sotto-superficiale, per conduzione attraverso la neve e/o il ghiaccio.

Il flusso netto di radiazione ad onda corta è dato dall'equazione:

$$Q_I = Q(1 - \alpha)$$

Dove  $Q$  è la radiazione globale incidente e  $\alpha$  è l'albedo, definito come rapporto tra radiazione riflessa e radiazione globale incidente.

L'albedo della superficie è quindi determinante perché da un lato regola l'effettiva quantità di radiazione solare che viene assorbita e si rende disponibile per la fusione, dall'altro rappresenta uno dei più importanti feedback che regolano la sensibilità climatica glaciale.

Gran parte della riflessione può essere attribuita alle differenze di grandezza tra grani, all'angolarità e ai legami tra i vari cristalli.

Numerose variabili influiscono sul valore di albedo superficiale, che è inversamente proporzionale all'angolo di incidenza dei raggi solari, dimensione dei grani, accumulo di impurità e detrito in superficie (e quindi età della superficie), quantità di acqua liquida, mentre è direttamente proporzionale allo spessore del manto nevoso e alla copertura nuvolosa (Male e Gray, 1981). In ghiacciaio la variabilità spaziale e temporale dell'albedo è attribuibile anche alla presenza di superfici di diversa natura.

## ALBEDO MEDIO GIORNALIERO GHIACCIAIO DE LA MARE

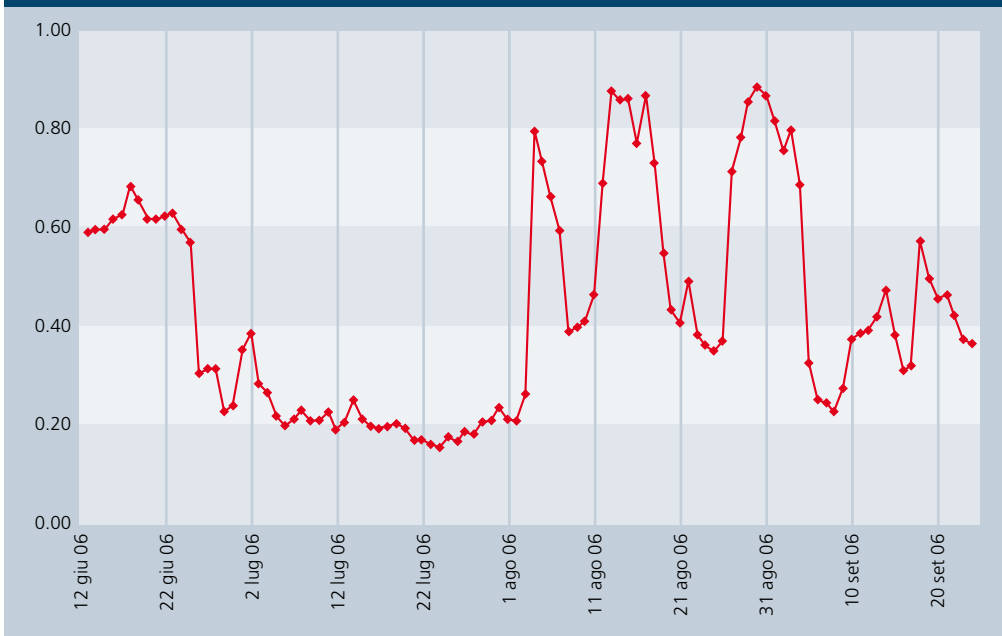
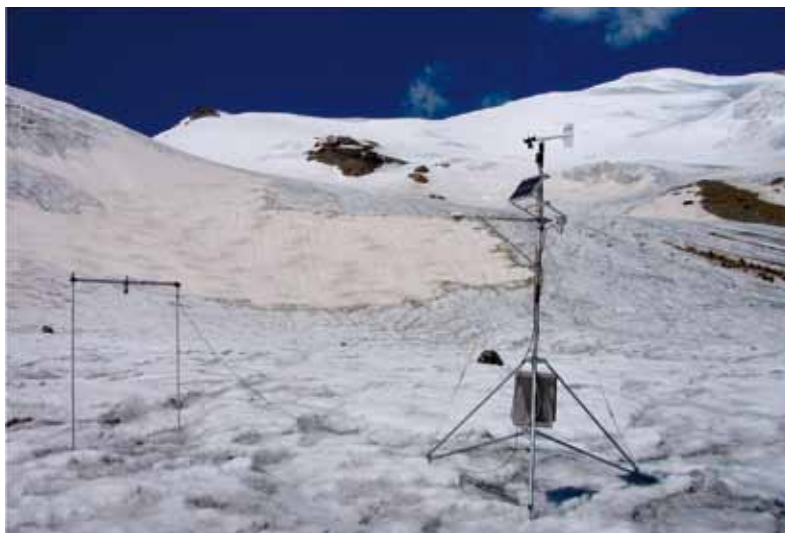


Fig. 1 Componenti del bilancio energetico mediate in condizione di fusione sul ghiacciaio de La Mare, tra il 5 giugno e il 24 settembre 2005, alla stazione automatica di quota 2980 m s.l.m. (Carturan, 2007).

Fig. 2 Andamento dell'albedo medio giornaliero alla stazione meteorologica automatica del ghiacciaio de La Mare nell'estate 2006.





Si passa infatti dalla neve fresca, con valori di albedo molto elevati, alla neve residua, la cui superficie va gradualmente perdendo di riflettività durante la stagione di ablazione, soprattutto a causa del progressivo accumulo di polveri e dell'aumentare della dimensione dei grani, oltre che per la presenza di acqua liquida nelle fasi di fusione.

Successivamente durante l'estate emergono il ghiaccio di ghiacciaio e localmente anche il firn, che presentano in superficie polveri e detrito accumulatisi nel corso di più anni.

La progressiva scoperta dei tre tipi di substrato porta ad un andamento dell'albedo abbastanza caratteristico durante la stagione di ablazione (Figura 2).

L'albedo decresce rapidamente nel momento in cui si esaurisce la copertura nevosa stagionale e affiora il ghiaccio sottostante; segue una fase con valori bassi e piuttosto stabili, cui possono alternarsi temporanei picchi di albedo in corrispondenza di eventuali nevicate estive, fino al momento in cui si riforma un manto nevoso stabile, al termine della stagione di ablazione.

Nella tabella (Figura 3) sono evidenziati i valori di albedo comunemente riportati in letteratura per i substrati rinvenibili in ghiacciaio.

## AREA DI STUDIO

Il bacino dell'alta Val de La Mare (36 km<sup>2</sup>), è collocato sul settore meridionale del Gruppo Ortles-Cevedale e si trova all'estremità nord-occidentale della provincia di Trento, all'interno del Parco Nazionale dello Stelvio, confinando a nord con la provincia di Bolzano e ad ovest con la provincia di Sondrio (Figura 4).

Il bacino presenta una quota massima di 3769 m (monte Cevedale) e la sezione di chiusura si trova in località malga Mare (2031 m s.l.m.).

Quest'area è stata scelta come sito sperimentale nell'ambito di un progetto di ricerca dell'Università di Padova sulla criosfera e sull'idrologia dei bacini alpini di alta quota (Carturan et al., 2009).

Il sito presenta una significativa copertura

glaciale (917 ha) e regime idrologico annuale dominato dai processi di accumulo e fusione nivo-glaciale. E' inoltre largamente interessato da permafrost alpino e si colloca quasi per intero al di sopra del limite della vegetazione arborea. La scelta del sito d'indagine è stata dettata da motivazioni di carattere pratico, logistico e di interesse scientifico.

La zona, infatti, si presta particolarmente ad essere studiata perché pur avendo un'altimetria considerevole (quota media 2903 m s.l.m.), è facilmente raggiungibile durante tutto l'anno, grazie alla presenza di una carrozzabile che viene utilizzata quotidianamente dal personale ENEL della diga del Careser. L'utilizzo per fini idroelettrici delle acque di fusione dei ghiacciai ha favorito un'attività di studio multidisciplinare che si è sviluppata nel tempo fin dal momento della costruzione della diga, negli anni '30 del secolo scorso.

Per il ghiacciaio del Careser, collocato sul settore nord-orientale del bacino, esiste la serie più lunga di misurazione del bilancio di massa sulle Alpi italiane (Carturan e Seppi, 2007); inoltre la serie di dati nivo-meteorologici della stazione di Careser diga è una delle più lunghe in Italia sopra i 2500 m (risale agli anni '30), ed è molto preziosa in virtù delle osservazioni dirette che tuttora vengono compiute quotidianamente dal personale ENEL. Le indagini sull'albedo hanno interessato i ghiacciai del Careser e de La Mare (Figura 4) che attualmente coprono una superficie pari a 283 e 401 ha, rispettivamente.

Questi ghiacciai sono attualmente sottoposti a misurazione del bilancio di massa e sul ghiacciaio de La Mare, a circa 3000 m di quota, è attiva dall'estate 2005 una stazione nivo-meteorologica automatica.

## MATERIALI E METODI

### Misure di campagna

Le misure di albedo sono state eseguite durante le stagioni di ablazione del 2007 e del 2008, tra fine luglio e metà settembre (Cossi, 2008).

Lo strumento utilizzato è un albedometro costituito da due piranometri a termopila di prima classe secondo la norma ISO

## RANGE DEI VALORI DI ALBEDO PER TIPO DI SUBSTRATO RIPORTATI PIU' COMUNEMENTE IN LETTERATURA

SUBSTRATO	ALBEDO
Neve fresca	0.90 - 0.98
Neve residua	0.20 - 0.72
Firn	0.30 - 0.53
Ghiaccio	< 0.10 - 0.65

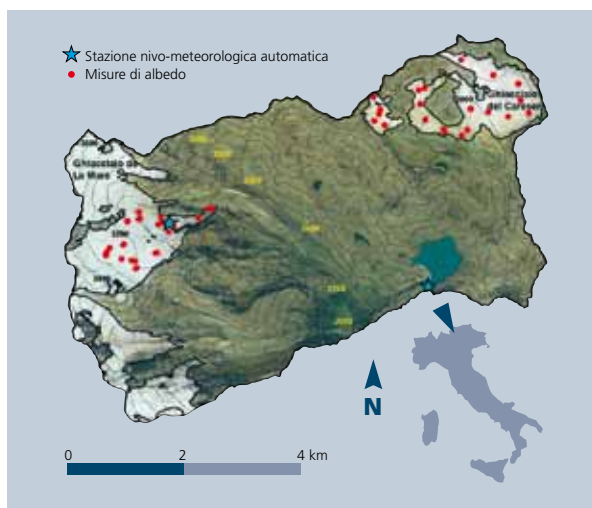


Fig. 3



Fig. 4  
Corografia dell'alta Val de La Mare, con la localizzazione dei siti di misura dell'albedo sui ghiacciai de La Mare e del Careser.

Fig. 5  
Operazioni di misurazione dell'albedo sul ghiacciaio de La Mare; nel riquadro a sinistra la visualizzazione dei valori di radiazione incidente e riflessa sul data-logger.

9060 e secondo la World Meteorological Organization (WMO, 2008). Il piranometro rivolto verso l'alto misura la radiazione globale incidente, quello rivolto verso il basso misura la radiazione riflessa. Lo strumento è sensibile alle lunghezze d'onda comprese tra 305 e 2800 nm. L'albedometro è stato montato su un treppiede e le misurazioni sono state eseguite mantenendolo a un metro di altezza dalla superficie, con asse perpendicolare al piano di campagna (Figura 5). In questo modo l'area interessata dalla misura è stata pari a circa 9 m<sup>2</sup>.

In otto giornate di rilievo sono stati eseguiti in totale 83 campionamenti (Figura 3), ciascuno della durata di cinque minuti.

Fig. 6  
Esempio di scheda  
riepilogativa compilata  
per l'archiviazione delle  
misure di albedo.

IDENTIFICATIVI DEL RILIEVO										
GHIACCIAIO DE LA MARE										
Data 20/08/2008										
Denominazione					Punto M10/08					
Posizione (coordinate Gauss Boaga)					E 1626113 N 5143429					
Quota (m s.l.m.)					2968					
Esposizione					NNE					
Pendenza					19,6°					
Note: corrispondente alla palina 2										
										
										
PARAMETRI RILEVATI										
Tipo di superficie					Ghiaccio biancastro con tracce di reticolo congelato					
Percentuale di detrito					0,40 %					
Età					-					
Condizioni					in fusione					
HS (m)					-					
Densità (kg/m³)					-					
Diametro medio cristalli (mm)					-					
Copertura nuvolosa (in ottavi)					4/8					
Tipo di nubi					Cumuli					
Altezza base nubi (m s.l.m.)					3400					
RILEVAZIONE DELL'ALBEDO										
		↓Rad. In (W/m²)			↑Rad. Out (W/m²)					
Orario legale inizio acquisizione	Durata acquisizione (sec)	Min	Max	Med	Min	Max	Med	Albedo radiazione min	Albedo radiazione max	Albedo radiazione media
10.49	285	273	787	554	95	272	190	0,35	0,35	<b>0,34</b>

I dati provenienti dall'albedometro venivano registrati e visualizzati da un apposito data-logger, che al termine della misurazione consentiva di annotare i valori minimi, massimi e medi di radiazione incidente e riflessa. Il sito dove effettuare la misurazione è stato scelto in corrispondenza di una

palina di ablazione (utilizzata per il calcolo del bilancio di massa) o di un punto rappresentativo di un'ampia porzione di ghiacciaio. Tutte le misurazioni sono state eseguite tra le ore 9.00 e le ore 16.00 (solari), in modo da evitare le ore in prossimità di alba e tramonto.

Si è cercato inoltre, nei limiti del possibile, di eseguire le misure in condizioni di cielo sereno o poco nuvoloso. Data la stagione, le condizioni di percorribilità e, non ultime, le condizioni di sicurezza, è stato possibile eseguire le misurazioni quasi esclusivamente su ghiaccio di ghiacciaio. Oltre ai valori di radiazione incidente e riflessa, per ogni punto di misura si è preso nota delle condizioni meteorologiche e del substrato al momento dell'acquisizione (stato del cielo, tipologia e altezza della base delle nubi, presenza o assenza di acqua in superficie, substrato congelato o in fusione, e nel caso di neve e firn anche età, profondità, densità e diametro medio dei cristalli). È stata inoltre rilevata la posizione di ciascun punto tramite GPS portatile e annotata l'ora di inizio misurazione. Al termine dell'acquisizione, infine, è stata scattata una fotografia del substrato ponendo una fotocamera digitale sulla stessa posizione dell'albedometro, in modo da poter fare ulteriori osservazioni al momento dell'elaborazione dei dati.

### Elaborazione dei dati

Per ogni misura di albedo è stata redatta una scheda riepilogativa, che contiene tutte le informazioni riguardanti il sito e le condizioni al contorno al momento del rilievo. Un esempio di scheda è riportato in Figura 6. Per ricavare la percentuale di copertura detritica si è proceduto alla classificazione automatica dei fotogrammi acquisiti al termine di ogni misura di albedo. La tecnica di classificazione è schematizzata in Figura 7, e consiste nella suddivisione del fotogramma originario in classi cromatiche con successiva identificazione del valore tonale "soglia" che consente di distinguere, fotogramma per fotogramma, il detrito dal substrato privo di copertura. È stata quindi eseguita un'analisi sui dati di campagna, con l'obiettivo di comprendere quali, tra le variabili rilevate, hanno la maggiore importanza nel determinare la variabilità spaziale dei valori di albedo. In particolare ci si è soffermati sulle misu-

re eseguite su ghiaccio di ghiacciaio, nettamente più abbondanti rispetto a quelle su neve e su firn, visto che i ghiacciai sono percorribili in condizioni di sicurezza solo a stagione avanzata. E' stata infine testata la possibilità di determinare, in modo sufficientemente affidabile, il valore di albedo superficiale su ghiaccio di ghiacciaio mediante semplici rilievi fotografici.

## RISULTATI

Nella tabella (Figura 8) sono riportati i valori medi di albedo misurati durante le due campagne estive 2007 e 2008 sui ghiacciai de La Mare e del Careser. Si osserva una numerosità di gran lunga superiore nel caso del ghiaccio, rispetto a neve e firn, per le ragioni di sicurezza di accesso già discusse in precedenza.

In Figura 9 sono riportati alcuni esempi di superfici rinvenute sui ghiacciai durante le misure di albedo.

Come si può osservare, esiste una marcata variabilità di substrati, che si riflette sull'ampio range di valori di albedo rilevati.

Per quanto riguarda il firn, sono stati misurati valori di albedo piuttosto bassi, generalmente inferiori al range proposto in letteratura (Figura 3).

Nel caso delle misure effettuate in Val de La Mare, si tratta di firn rinvenuto nell'area di accumulo del ghiacciaio de La Mare, oltre i 3200 m di quota, e riferibile alle annate 2001 (valore minimo di albedo pari a 0.14), 2004, 2005 e 2006.

Valori altrettanto bassi di albedo sono stati misurati sulla neve residua, di poco

superiori rispetto al firn delle annate più recenti, verosimilmente a causa del fatto che le misure sono state eseguite a stagione avanzata (neve molto trasformata in seguito a numerosi cicli di fusione e rigelo, e ricca di impurità in superficie) e in condizioni di fusione sostenuta.

L'albedo del ghiaccio esibisce una marcata variabilità, attestandosi su un valore medio pari a 0.24.

Sui ghiacciai investigati sono state rilevate diverse tipologie di ghiaccio, che vanno dal ghiaccio molto sporco, quasi completamente coperto di detrito e con abbondante acqua di fusione in superficie, al ghiaccio bianco, congelato in superficie, molto poroso e totalmente privo di copertura detritica (Figura 9).

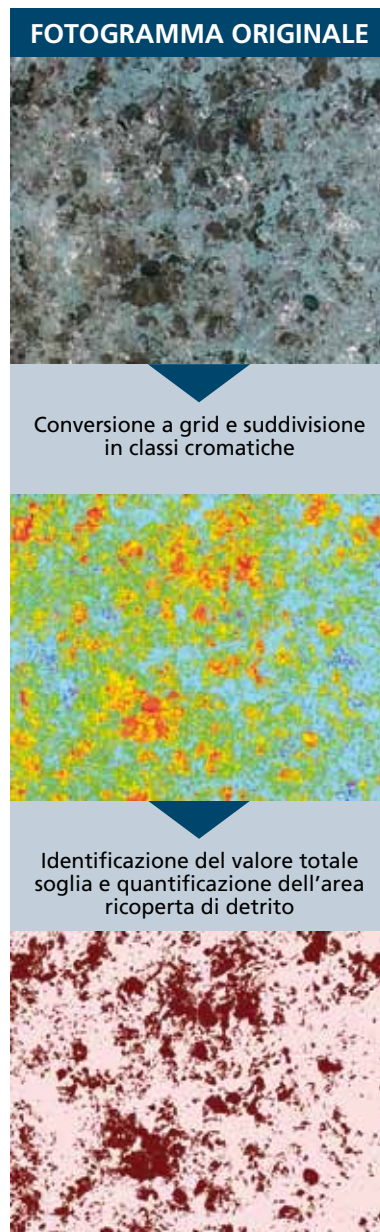


Fig. 7  
Schema della tecnica di classificazione usata per quantificare la percentuale di copertura detritica, a partire dai fotogrammi acquisiti durante le misurazioni di albedo.



**VALORI MEDI ED ESTREMI DELL'ALBEDO MISURATI SUI TRE SUBSTRATI RINVENUTI IN GHIACCIAIO NELLE ESTATI DEL 2007 E DEL 2008**

SUBSTRATO	NUMEROSITA'	MINIMO	MASSIMO	MEDIA
Ghiaccio	69	0.07	0.48	<b>0.24</b>
Firn	7	0.14	0.30	<b>0.19</b>
Neve residua	4	0.31	0.42	<b>0.36</b>

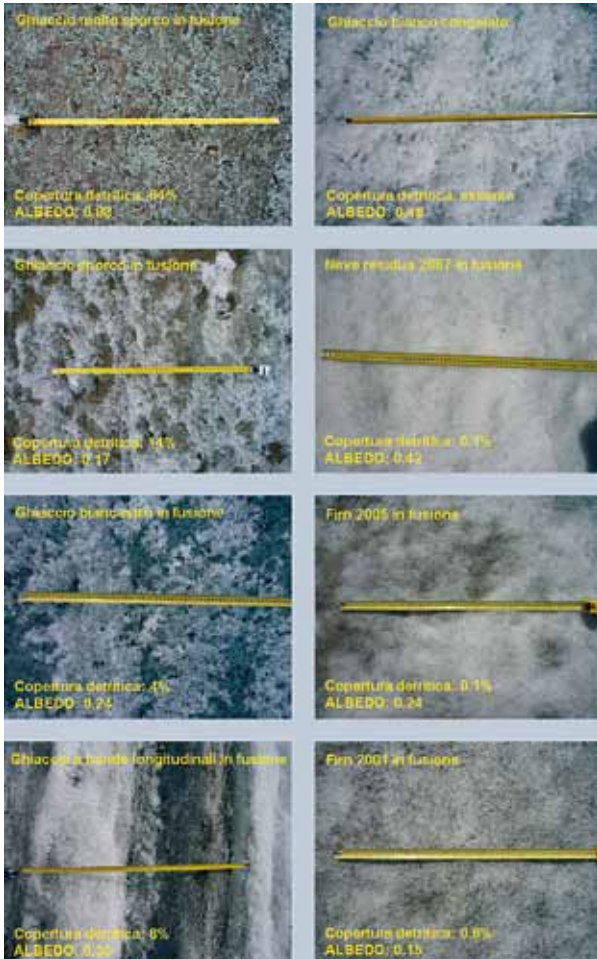


Fig. 8

Fig. 9  
Alcuni esempi di superfici rinvenute durante le misure di albedo in ghiacciaio.

In Figura 10 è riportata la variazione dell'albedo con la quota sui due ghiacciai investigati, a settembre 2007 e ad agosto 2008.

Si possono osservare sia un chiaro aumento dell'albedo con la quota, sia un valore di albedo mediamente più basso nell'agosto 2008, rispetto al settembre 2007.

La correlazione con la quota e la variazione tra le due date sono più evidenti sul ghiacciaio del Careser.

Sul ghiacciaio de La Mare, invece, esiste una maggior dispersione e a parità di quota si possono avere, nella stessa data, valori sensibilmente diversi di albedo.

Si osserva in particolare una scarsa variazione di albedo, tra le due date, sui



punti con ghiaccio più ricco di detrito in superficie (alla fronte e nei pressi di una morena mediana a 3000 m di quota).

La variazione di albedo tra le due date è verosimilmente attribuibile alle diverse condizioni di alterazione della superficie (cosiddetta "weathering crust"), legate alle condizioni meteorologiche verificatesi nei giorni precedenti ai rilievi (Jonsell et al., 2003).

E' stata successivamente verificata l'esistenza di un'eventuale correlazione positiva tra copertura nuvolosa e albedo.

Si è analizzata la casistica riguardante il solo albedo del ghiaccio, confrontando l'albedo da radiazione media (durante i 5' di acquisizione per ogni rilievo) e l'albedo da radiazione massima e minima nello

steso intervallo di tempo (corrispondenti rispettivamente al momento di minima e massima copertura nuvolosa).

Nel 69% dei casi non vi è aumento di albedo all'aumentare della nuvolosità, e nei casi in cui questo si verifica (31%), tale aumento è trascurabile (<2%).

Si può quindi concludere che il ruolo della copertura nuvolosa non è così determinante nella variabilità spaziale e temporale dell'albedo del ghiaccio.

La copertura detritica si rivela invece decisiva, come si può osservare in Figura 11.

Esiste un'elevata sensibilità dell'albedo nei confronti della copertura detritica fino a circa il 5%; poi questa sensibilità decresce asintoticamente.

La relazione tra copertura detritica e





albedo è assimilabile ad una funzione logaritmica.

Sulla base di queste osservazioni, i dati di albedo sono stati suddivisi in classi in funzione della copertura detritica, con ampiezza pari ad un'unità percentuale fino al 10%, due unità dal 10% al 20%, cinque unità dal 20% al 40% e dieci unità dal 40% al 100% (per un totale di 25 classi). In figura 12 sono riportati i valori medi per i dati di albedo, raggruppati in classi di copertura detritica.

E' evidente un'aggregazione dei dati sperimentali in tre sottogruppi, con albedo piuttosto omogeneo al loro interno, separati da evidenti discontinuità in corrispondenza di ben definiti valori di copertura detritica.

E' quindi possibile suddividere le misure in tre classi di copertura detritica (evidenziate nel grafico con cerchi colorati):

- Classe 1 (CL1): copertura detritica da 0 a 3%
- Classe 2 (CL2): copertura detritica da 3 a 16%
- Classe 3 (CL3): copertura detritica > 16%

I valori "soglia" di copertura detritica (3% e 16%) che separano le tre classi consentono quindi di definire con sufficiente approssimazione il valore medio di albedo del ghiaccio. Considerando poi le osservazioni eseguite durante il rilievo e riguardanti le condizioni del substrato, si è valutata la possibilità di introdurre un'ulteriore articolazione della classificazione, prevedendo ulteriori 3 sottoclassi

per ciascuna classe di copertura detritica, in funzione di:

- Fusione lenta o assente (FL)
- Fusione attiva (FA)
- Fusione attiva con acqua in scorrimento superficiale (FH)

In totale si sono ottenute 9 classi, anche se una di esse non è rappresentata (classe 3FL, elevata copertura detritica con fusione lenta o assente). In Figura 13 i dati di albedo del ghiaccio sono stati raggruppati in funzione della copertura detritica e delle condizioni superficiali del substrato. Si nota come l'eterogeneità di albedo all'interno di ciascuna classe di copertura detritica cala progressivamente dalla prima classe verso la terza, e come la sovrapposizione dei valori di albedo tra prima



Fig. 10  
Variazione dell'albedo  
del ghiaccio con la quota  
sui ghiacciai  
A) del Careser,  
B) de La Mare,  
tra il 14-15 settembre  
2007 e tra il 20-21  
agosto 2008.

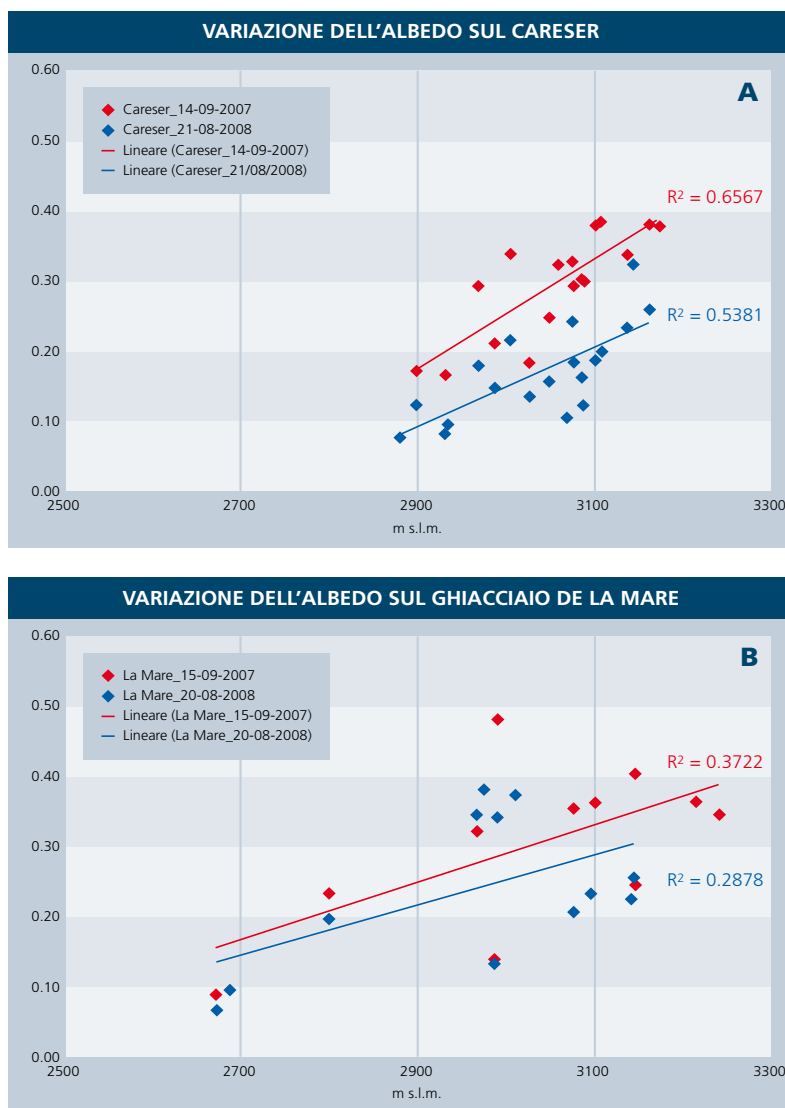
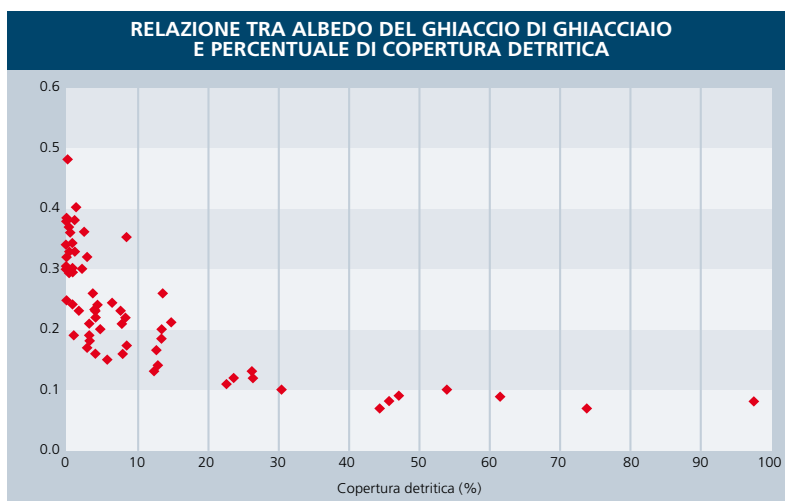


Fig. 11  
Relazione tra albedo del  
ghiaccio di ghiacciaio e  
percentuale di copertura  
detritica.



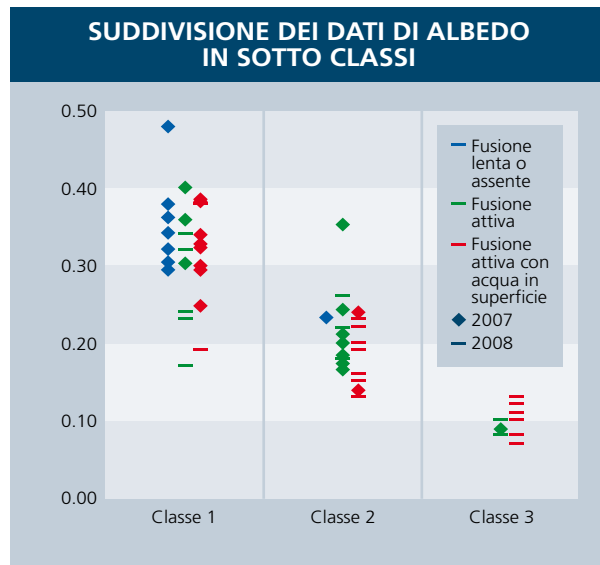
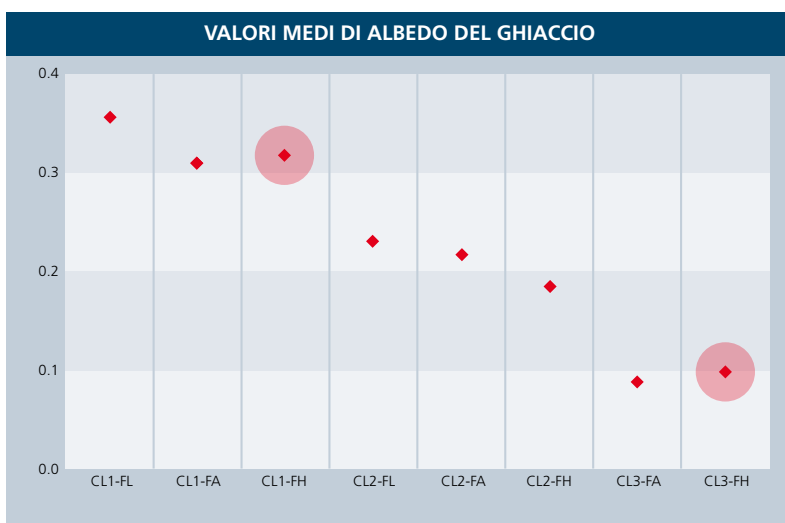
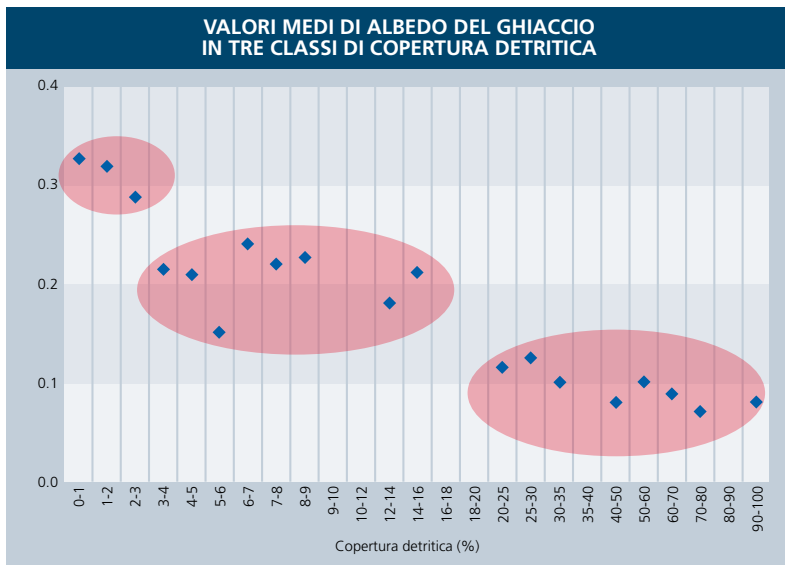
e seconda classe sia superiore rispetto a quella tra seconda e terza. La terza classe presenta una ridottissima variabilità di albedo, a dispetto dell'ampio range di copertura detritica (dal 16 a 97%). Per quanto riguarda invece sia la presenza/assenza di acqua di fusione in superficie, sia l'anno di esecuzione delle

misure, non si evidenziano particolari tendenze al raggruppamenti dei dati. Questi esiti indicano il ruolo di gran lunga predominante esercitato dalla copertura detritica nel determinare il valore di albedo superficiale del ghiaccio di ghiacciaio, che si dimostra invece molto meno sensibile alla presenza di fusione e acqua in su-

perficie. Nemmeno le diverse condizioni meteorologiche che hanno accompagnato e preceduto il momento delle misurazioni nel 2007 e nel 2008 sembrano influire più di tanto sul valore di albedo. Nel grafico di figura 14 si riportano i valori di albedo medi per ognuna delle 9 classi ottenute dalla combinazione di copertura detritica e presenza/assenza di fusione e acqua superficiale. L'andamento è generalmente in linea con quanto atteso, con valori medi di albedo decrescenti passando da fusione lenta a fusione attiva, e quindi a fusione attiva con scorrimento di acqua. Tuttavia neanche i valori medi paiono sufficientemente differenziati all'interno di ogni classe di copertura detritica. Anzi, in un paio di casi (valori cerchiati nel grafico) l'andamento è addirittura opposto a quanto atteso.

## CONCLUSIONI

Diversamente da quanto generalmente ipotizzato, l'albedo del ghiaccio di ghiacciaio presenta valori tutt'altro che omogenei. Le misure eseguite nel corso delle stagioni estive 2007 e 2008 sui ghiacciai della Val de La Mare forniscono valori compresi tra 0.48 e 0.07, a testimonianza di una variabilità spaziale di quasi un ordine di grandezza tra il valore massimo e minimo di albedo misurati sullo stesso substrato. La conseguenza è una forte differenziazione nell'assorbimento della radiazione ad onde corte che induce una variabilità a scala locale dell'intensità della fusione superficiale. Alla luce di tali indicazioni si sottolinea come l'assunzione di un unico valore costante di albedo del ghiaccio, comunemente adottata nell'ambito degli schemi di calcolo del bilancio, potrebbe risultare eccessivamente semplificativa. Per quanto riguarda il ruolo della copertura nuvolosa, i risultati dimostrano che non è un fattore tra i più determinanti, mentre si è osservata una certa correlazione tra l'albedo del ghiaccio e la quota, presumibilmente dovuta al progressivo accumulo di detrito e impurità verso la fronte dei ghiacciai. Tuttavia l'albedo può variare significativamente anche tra siti collocati alla stessa altitudine, a causa



della presenza di morene medie e/o bande longitudinali detrito, oppure per la diversa alterazione della superficie. Dai dati a disposizione (83 rilievi) è emerso come la quantificazione della copertura detritica sia in grado, da sola, di fornire utili ed esaustive indicazioni sulla variabilità dell'albedo del ghiaccio di ghiacciaio. E' infatti stato possibile raggruppare i dati di albedo in funzione di tre principali classi di copertura detritica, identificate ciascuna da valori medi di albedo pari a 0.32, 0.20 e 0.10. L'inclusione di informazioni accessorie quali la presenza di fusione o di acqua in superficie non ha consentito di affinare in modo significativo il processo di classificazione. L'estensione percentuale della copertura detritica è ricavabile in modo abbastanza agevole mediante l'elaborazione di riprese fotografiche ortogonali alla superficie. E' quindi confermata l'ipotesi formulata in partenza, relativa alla

possibilità di adottare un metodo rapido e speditivo, quale appunto quello fotografico, per cogliere in modo sufficientemente adeguato la variabilità spaziale dell'albedo del ghiaccio sui ghiacciai.

## RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia sentitamente il Prof. Federico Cazorzi, del Dipartimento di Scienze Agrarie e Ambientali dell'Università di Udine, che ha messo a disposizione la propria competenza tecnica e parte della strumentazione scientifica utilizzata per le ricerche. Una parte dei rilievi di campagna è stata eseguita avvalendosi dei mezzi logistici messi a disposizione dalla Provincia Autonoma di Trento per lo svolgimento dei rilievi annuali sui ghiacciai del Trentino, in collaborazione con il Comitato Glaciologico Trentino – SAT, Museo Tridentino di Scienze Naturali e Dipartimento di Ingegneria dell'Università di Trento.

Fig. 12 Valori medi per i dati di albedo del ghiaccio, raggruppati in classi di copertura detritica. Si nota l'aggregazione dei valori di albedo in tre "cluster" principali.

Fig. 13 Suddivisione dei dati di albedo del ghiaccio in sottoclassi, in funzione della copertura detritica (in ascissa le tre classi di copertura) e presenza di fusione lenta (in blu), attiva (in verde) e con acqua in superficie (in rosso). Anno di osservazione: rombo = 2007, trattino = 2008.

Fig. 14 Valori medi di albedo del ghiaccio calcolati per i dati classificati secondo copertura detritica e presenza di fusione lenta, attiva e con acqua in scorrimento superficiale.

## Bibliografia

- Carturan L., 2007. Effetti delle variazioni climatiche sulla criosfera e sull'idrologia dei bacini di alta quota. XXII Ciclo Scuola di Dottorato in Territorio, Ambiente, Risorse e Salute. Indirizzo in Idronomia Ambientale. Relazione del primo anno, 54 pp.
- Carturan L. e R. Seppi, 2007. Recent mass balance results and morphological evolution of Careser Glacier (Central Alps). *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 30 (1), 33-42.
- Carturan L., F. Cazorzi e G. Dalla Fontana, 2009. Enhanced estimation of glacier mass balance in unsampled areas by means of topographic data. *Annals of Glaciology*, 50, 37-46.
- Cossi F., 2008. Variabilità spazio temporale dell'albedo sulle aree glaciali dell'alta Val de La Mare, Val di Peio (TN). Tesi di Laurea Specialistica in Scienze Forestali e ambientali. Università di Padova.
- Hock R., 2005. Glacier melt: a review of processes and their modelling. *Progress in Physical Geography*, 29, 3, 362-391.
- Jonsell U., R. Hock e B. Holmgren, 2003. Spatial and temporal variations in albedo on storglaciären, Sweden. *Journal of Glaciology*, Vol.49 (164), 59-68.
- Klok E.J. e J. Oerlemans, 2004. Modelled climate sensitivity of the mass balance of Morteratschgletscher and its dependence on albedo parameterization. *International Journal of Climatology*, 24 (2), 231-245.
- Male D.H. e D.M. Gray, 1981. Snowcover ablation and runoff. In: *Handbook of snow*, D.M. Gray e D.H. Male, 338-358. Ontario, Pergamon Press.
- Oerlemans J., 2000. Analysis of a 3 years meteorological record from the ablation zone of Morteratschgletscher, Switzerland: energy and mass balance. *Journal of Glaciology*, Vol.46, 155, 571-579.
- W.M.O., 2008. Guide to meteorological instruments and methods of observation. WMO-No. 8 (Seventh edition).