

Nell'estate del 2001 sono iniziate le attività di campo per l'acquisizione di dati a terra su alcune proprietà fisiche della neve e del ghiaccio contemporaneamente ai passaggi del sensore ASTER-TERRA sulla verticale di alcuni ghiacciai italiani.

**Roberto Ranzi
e Stefan Taschner,**

Università di Brescia,
Dipartimento di Ingegneria Civile,
Via Branze 38, 25123 Brescia

**Anselmo Cagnati,
Mauro Valt e Renato Zasso,**

ARPAV - Centro Valanghe,
32020 Arabba (BL)



Monitoraggio

Nel dicembre 1995 il servizio geologico statunitense (USGS) ha posto le basi di un progetto di ricerca internazionale finalizzato alla definizione di un archivio globale dei ghiacciai utilizzando sistemi di monitoraggio e riconoscimento omogenei, basati principalmente su sensori satellitari. Il progetto, denominato con l'acronimo GLIMS (Global Land Ice Monitoring from Space), prevede di fare affidamento principalmente sulle immagini rilevate dal sensore ASTER, installato sul satellite TERRA, per il riconoscimento dell'estensione, del tipo di copertura e dell'evoluzione dinamica dei principali ghiacciai terrestri. Le attività sperimentali relative ai ghiacciai italiani sono iniziate nell'estate del 2001, quando sono state effettuate delle campagne di rilievo, su tre ghiacciai campione, di alcune proprietà fisiche delle coperture superficiali (detrito, ghiaccio, firn, neve) in contemporanea con la prevista acquisizione delle immagini rilevate dal sensore ASTER-TERRA. Le condizioni meteorologiche hanno consentito di acquisire dati sulla copertura detritica del ghiacciaio del Belvedere, risultate utili per il riconoscimento delle sue proprietà termiche, grazie all'elaborazione dell'immagine del 24.08.2001. Sul ghiacciaio della Marmolada e dell'Adamello sono stati raccolti dati sullo stato della neve, correlati alle misure di due stazioni meteorologiche d'alta quota.



da satellite dei GHIACCIAI

La campagna GLIMS 2001

IL PROGETTO GLIMS

Il monitoraggio dei ghiacciai del globo nell'attuale fase di contrazione della superficie della criosfera, successiva al periodo freddo della 'Piccola Età Glaciale', ha il significato di documentare, a beneficio delle future generazioni, lo stato del clima terrestre all'inizio del terzo millennio.

E' con questo principale obiettivo che nel 1995 l'U.S. Geological Survey ha proposto alla comunità scientifica internazionale di coordinare il progetto GLIMS, una ricerca finalizzata alla creazione di un archivio d'immagini, e di dati ad esse correlati, dei

principali ghiacciai della Terra (Kargel e Kieffer, 1995).

La catalogazione dei ghiacciai del globo è già oggetto delle attività del World Glacier Monitoring Service (1989) che ha realizzato il World Glacier Inventory, ma i metodi di rilievo (topografico, aerofotogrammetrico, satellitare) adottati per la sua redazione non sono del tutto omogenei e la copertura della superficie terrestre non è completa.

Oggi la tecnologia degli scanner satellitari e dei sistemi di trasmissione ed elaborazione dei dati da essi rilevati si è sviluppata ad un livello tale da rendere concorrenziale, rispetto ad altri metodi

di rilievo dei ghiacciai, il telerilevamento da satellite.

La risoluzione geometrica, spettrale e radiometrica delle immagini acquisite da diversi sensori installati su piattaforme satellitari progettate per il monitoraggio ambientale (LANDSAT, SPOT, TERRA,...) consente oggi di riconoscere oggetti con dimensioni inferiori a 10 m, discriminando la loro risposta spettrale in diverse bande dello spettro elettromagnetico e riconoscendo differenze di temperatura superficiale inferiori a 0.3 °C. Queste prestazioni sono compatibili con molte delle applicazioni d'interesse della glaciologia,

Caratteristiche del sensore ASTER e dei tre sottosistemi del radiometro

Sottosistema	Banda	Risoluzione spaziale (m)	Limiti spettrali (m)
VNIR	1	15	0.52 - 0.60
VNIR	2	15	0.63 - 0.69
VNIR	3 stereo	15	0.76 - 0.86
SWIR	4	30	1.600 - 1.700
SWIR	5	30	2.145 - 2.185
SWIR	6	30	2.185 - 2.225
SWIR	7	30	2.235 - 2.285
SWIR	8	30	2.295 - 2.365
SWIR	9	30	2.360 - 2.430
TIR	10	90	8.125 - 8.475
TIR	11	90	8.475 - 8.825
TIR	12	90	8.925 - 9.275
TIR	13	90	10.25 - 10.95
TIR	14	90	10.95 - 11.65

Fig.1

come il riconoscimento dei limiti del ghiacciaio, della linea delle nevi, del movimento stagionale o la stima di parametri di una certa rilevanza, come l'albedo superficiale. E' anche per le applicazioni glaciologiche che la NASA, in collaborazione con il Governo del Giappone, ha sviluppato il sensore di nuova generazione ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection radiometer), installato sul satelli-

te TERRA, lanciato nello spazio il 18 Dicembre 1999.

L'orbita di TERRA, eliosincrona, è a 705 km di altezza ed il passaggio sulla verticale italiana avviene, attualmente, verso le ore 10:20 UTC antimeridiane. L'ampiezza di ciascuna striscia (swath) di rilevamento a terra è di 60 km ed il periodo dei passaggi sul medesimo luogo è di 16 giorni; tuttavia la possibilità di modificare l'assetto del radio-

metro consente di monitorare il medesimo luogo con maggiore frequenza.

Le caratteristiche spettrali del sensore ASTER, e la risoluzione spaziale delle immagini, lo rendono particolarmente adatto, tra l'altro, al monitoraggio della criosfera terrestre.

Il sensore è costituito da tre sistemi, operanti, rispettivamente, nelle bande del visibile-infrarosso vicino (VNIR), dell'infrarosso medio (SWIR) e dell'infrarosso termico (TIR).

Le caratteristiche spettrali dei tre sistemi di acquisizione, con i rispettivi limiti di banda e le risoluzioni geometriche delle immagini sono riportate nella Figura 1.

In particolare la risoluzione geometrica del sensore VNIR, di soli 15 metri nelle sue tre bande, costituisce un progresso, agli scopi glaciologici, rispetto alle potenzialità del sensore TM (con risoluzione di 30 m) della serie LANDSAT, utilizzata sinora in diverse applicazioni anche relative ai ghiacciai italiani (Serandrei-Barbero e Zanon, 1993; Binaghi et al., 1997).



Anche il sensore termico fornisce immagini più dettagliate rispetto a quelle, omologhe, di altri satelliti ambientali.

E' per questi principali motivi che ASTER è il sensore privilegiato per il progetto GLIMS.

Per raggiungere l'ambizioso obiettivo di monitorare tutti i principali ghiacciai della Terra entro il prossimo quinquennio, il centro di coordinamento, con base a Flagstaff, in Arizona, ha promosso la creazione di centri regionali che, in base alla conoscenza dei ghiacciai della regione, si sono assunti l'onere dell'elaborazione delle immagini inviate dal satellite, derivandone delle informazioni confermate anche da rilievi glaciologici in situ e da esperimenti progettati ad hoc.

Il gruppo italiano, formatosi fin dal 1996 e strutturato in diverse unità operative (vedi <http://civserv.ing.unibs.it/utenti/ranzi/glimsit/index.htm>), aderisce al centro regionale delle Alpi Europee, con sede al Politecnico di Zurigo.

L'Agenzia Spaziale Italiana dal 2002 finanzia, in parte, le attività

del progetto, tramite un contratto stipulato con il CNR-IREA di Milano.

LA CAMPAGNA SPERIMENTALE 2001

La prima stagione glaciologica in cui, dopo la fase di messa a punto dell'orbita e dei sistemi di acquisizione del satellite, il sensore ASTER è stato operativo per il monitoraggio dei ghiacciai italiani è stata l'estate 2001.

Per fornire un supporto di verifica a terra dello stato della superficie del ghiacciaio sono stati selezionati tre apparati glaciali: quello della Marmolada, del Belvedere e dell'Adamello.

I primi due erano già stati selezionati dal Comitato Glaciologico Italiano (1959-1962) per l'approfondimento dei rilievi di superficie e di profondità in occasione dell'Anno Geofisico Internazionale (1957-1958). Quello dell'Adamello fu oggetto, nel medesimo periodo, di un rilievo fotogrammetrico di dettaglio (Astori e Togliatti, 1964) ed in tempi recenti è stato al centro di diverse ricerche (v. ad es. Baroni e Carton, 1996) ed attività di catalogazione glaciologica (v. Servizio Glaciologico Lombardo, 1992 e Comitato Glaciologico Trentino, 1994).

Le tre campagne sperimentali per il progetto GLIMS, di cui si rende conto brevemente nel seguito, sono state finalizzate all'acquisizione di alcuni parametri fisici degli strati superficiali dei ghiacciai.

E' noto, infatti, come il grado di metamorfismo della neve e del firn (Casacchia et al., 2000), la densità ed il diametro dei cristalli (Bergen, 1975), la rugosità superficiale del ghiaccio e l'eventuale copertura detritica, assieme ad altri fattori, modificano in modo sensibile la riflettanza della superficie e, di conseguenza, il segnale radiometrico rifles-



Fig.2

so verso il sensore satellitare. Per consentire, quindi, di interpretare in modo corretto le immagini telerilevate e stimare, ad esempio, l'albedo della superficie (Lechi e Ranzi, 1990), è opportuno conoscere alcune proprietà fisiche della superficie del ghiacciaio.

Le misure sul ghiacciaio della Marmolada e dell'Adamello sono state finalizzate alla caratterizzazione della superficie della neve stagionale e del firn, in relazione all'evoluzione delle condizioni meteorologiche precedenti i giorni del passaggio del satellite.

Sul ghiacciaio del Belvedere, coperto da uno strato di detrito spesso, mediamente, un paio di decimetri, ci si è concentrati sulla misura delle proprietà termiche superficiali della copertura detritica, studiate in relazione all'immagine rilevata dal sensore ASTER il 24.08.2001, la prima utile agli scopi glaciologici rilevata sulle Alpi Italiane.

I RILIEVI AL GHIACCIAIO DELLA MARMOLADA

I rilievi del manto nevoso sul ghiacciaio della Marmolada, così come quelli sull'Adamello, sono stati eseguiti secondo la



MISURE DELLE PROPRIETÀ TERMICHE AL GHIACCIAIO DEL BELVEDERE

Situato nel Gruppo del Monte Rosa, in valle Anzasca, in destra orografica della Val d'Ossola, il Ghiacciaio del Belvedere è uno dei più interessanti ghiacciai italiani, per diversi motivi.

Studiato già in passato, tra gli altri, da Monterin (1926) e Gili Borghet (1962), il Belvedere può venire considerato come un "debris covered glacier" dato che la sua lingua è ricoperta da uno strato di detrito spesso fino ad alcune decine di centimetri. La sua fronte raggiunge la quota di 1785 m, caso affatto anomalo nelle Alpi meridionali.

Anche il suo regresso è meno accentuato rispetto alla media dei ghiacciai italiani e di quelli del settore Monte Rosa-Cervino (Santilli et al., 2002).

Negli ultimi anni esso è stato oggetto di particolare attenzione da parte di tecnici della protezione civile e studiosi a causa dell'accelerazione della sua dinamica (Mazza, 2000; Haeberli et al., 2002), dell'intensificarsi di fenomeni di crollo di ghiaccio misto a roccia lungo i canali valanghivi che, in parte, lo alimentano (Figura 4) e della spettacolare formazione del Lago Effimero (Figura 5) che ha raggiunto proporzioni ragguardevoli, destan-

do anche preoccupazione per la sicurezza dell'abitato di Macugnaga, nell'estate del 2002.

Durante la campagna sperimentale 2001 del progetto GLIMS sono state effettuate diverse misure di campo per studiare le proprietà termiche di varie superfici ad esso correlabili.

In diverse ore della giornata del 15 agosto sono stati misurati i profili di temperatura ed il flusso termico nello strato di detrito (v. Figura 7) e le temperature di superfici non ricoprenti il ghiacciaio (detrito, roccia, erba).

Le misure hanno marcato una significativa differenza di temperatura tra il detrito sovrapposto al ghiaccio e le altre superfici con temperature, mediamente, più elevate.

Ciò è evidente anche dall'analisi dell'immagine nella banda termica del sensore ASTER, rilevata il 24.08.2001 e illustrata nella Figura 6. La lingua del ghiacciaio (il cui margine, derivato dalla ripresa aerea del 1991 riportata sulla Carta Tecnica Regionale del 1994, è stato sovrapposto in colore grigio) è in parte più fredda dell'area circostante.

Due regioni, evidenziate dalle ellissi, sono particolarmente significative: una, a sud, vicino al Rifugio Zamboni e l'altra, più a nord, in prossimità della biforcazione della lingua del ghiacciaio.



Fig.4

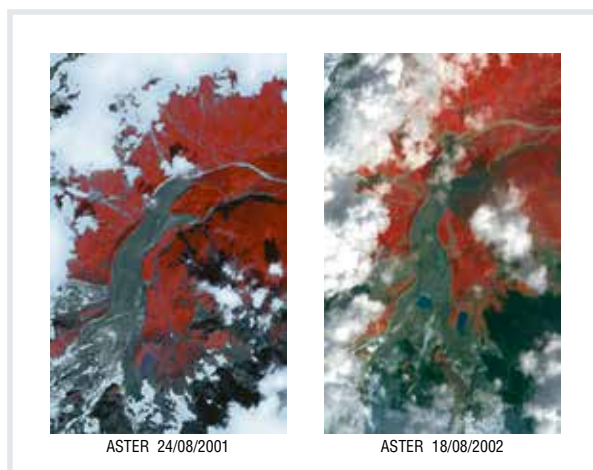
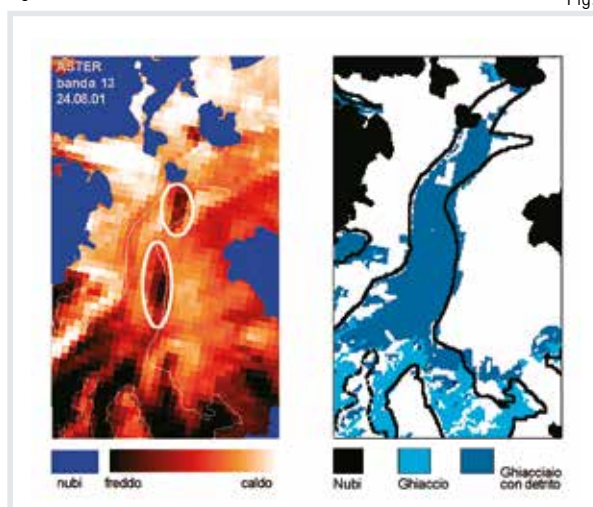


Fig.5

Fig.6



Il confronto con le misure di spessore di detrito effettuate da Diolaiuti et al. (in stampa) mostra come queste aree possano essere correlate con una copertura detritica di limitato spessore, mentre aree meno fredde possono essere, invece, associate a coperture più spesse. Il maggiore spessore dello strato di detrito potrebbe avere un effetto di isolamento termico del ghiaccio sottostante, raggiungendo maggiori temperature superficiali, in modo che il radiometro a infrarossi potrebbe non cogliere lo sbalzo termico tra detrito "puro" e detrito sovrapposto a ghiaccio.

Le immagini da satellite possono quindi diventare un utile strumento per stimare lo spessore della copertura detritica.

Le zone più fredde, ricoperte da un minor spessore di detrito, coincidono con le zone di

Fig. 4: La foto, ripresa nell'agosto 2000 dal Lago delle Locce, inquadra il tratto iniziale del Ghiacciaio del Belvedere, dove nel 2002 si è formato il Lago Effimero. Qui confluiscono il Ghiacciaio del Rosa e quello delle Locce. Al centro, sullo sfondo, le colate di ghiaccio misto a roccia presso il Canalone Marinelli, particolarmente attive dalla primavera del 2000.

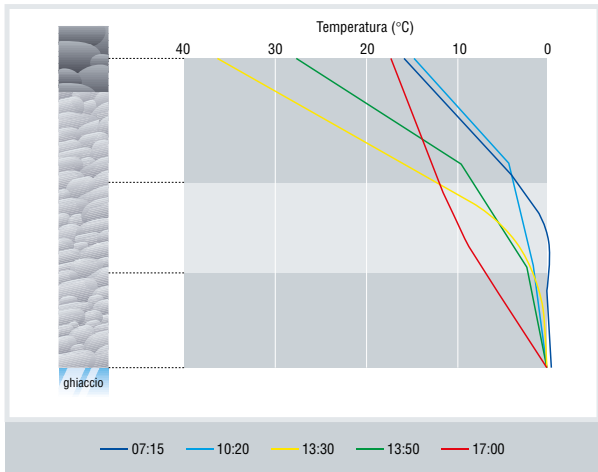


Fig.7

Fig. 8: Temperatura superficiale simulata dal modello di bilancio energetico per due maglie (roccia nuda e detrito sopra il ghiaccio) situate alla medesima quota (2000m).

maggior attività recente del ghiacciaio, cioè con il ramo del ghiacciaio del Belvedere alimentato da quello delle Locce, in destra idrografica, e con la biforcazione del ghiacciaio nelle sue due lingue frontali.

L'uso della banda termica può migliorare anche i risultati delle classificazioni.

L'immagine ASTER è stata classificata utilizzando un approccio basato sull'utilizzo delle bande dell'infrarosso vicino, perfezionato per tenere conto anche dell'informazione termica (Taschner e Ranzi, 2002).

Come mostrato nella Figura 6 a destra, i limiti della lingua del ghiacciaio ricoperta da detrito, ottenuti dalla classificazione dell'immagine telerilevata sono in buon accordo con i confini del ghiacciaio desunti dal rilievo aerofotogrammetrico.

Per verificare che la temperatura superficiale della copertura detritica sovrapposta al ghiaccio si mantenga, a parità di quota, significativamente inferiore a quella della roccia nuda, sono state simulate le stagioni di ablazione dell'anno 1997 e 2000, per il Belvedere, mediante un modello di bilancio energetico spazialmente distribuito (Ranzi e Rosso, 1991; Grossi et al. 2000).

Il modello, strutturato per l'acquisizione dell'informazione meteorologica e geomorfologica su una griglia regolare, fornisce

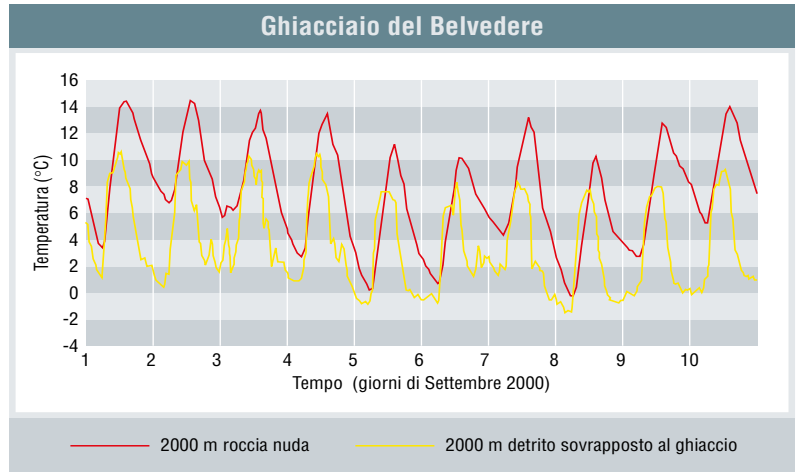


Fig.8

una stima del bilancio energetico bidimensionale e del bilancio di massa per ogni maglia, tenendo conto dei processi di accumulo, fusione e rigelo. Il bilancio energetico dello strato superficiale di detrito di spessore z_s può essere scritto esplicitando la dipendenza dalla temperatura dell'aria, T_a , e del suolo, T_s :

$$C_v z_s \frac{dT_s}{dt} = S_{io} + L_{io}(T_a, T_s) + H_i(e_a, e_s(T_s)) + H_s(T_a, T_s) + H_p + H_g(z_s)$$

C_v è il calore specifico volumetrico dell'ammasso detritico, assunto pari a $2.16 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3/\text{°C}$. H_s , H_i , H_p , S_{io} e L_{io} sono, rispettivamente, i flussi netti del calore sensibile e latente, del calore advettivo, della radiazione ad onde corte e ad onde lunghe, positivi se entranti nello strato. Per il flusso di calore scambiato per conduzione H_g viene applicata la soluzione analitica per due strati a temperatura costante (il ghiacciaio temperato a 0 °C e il



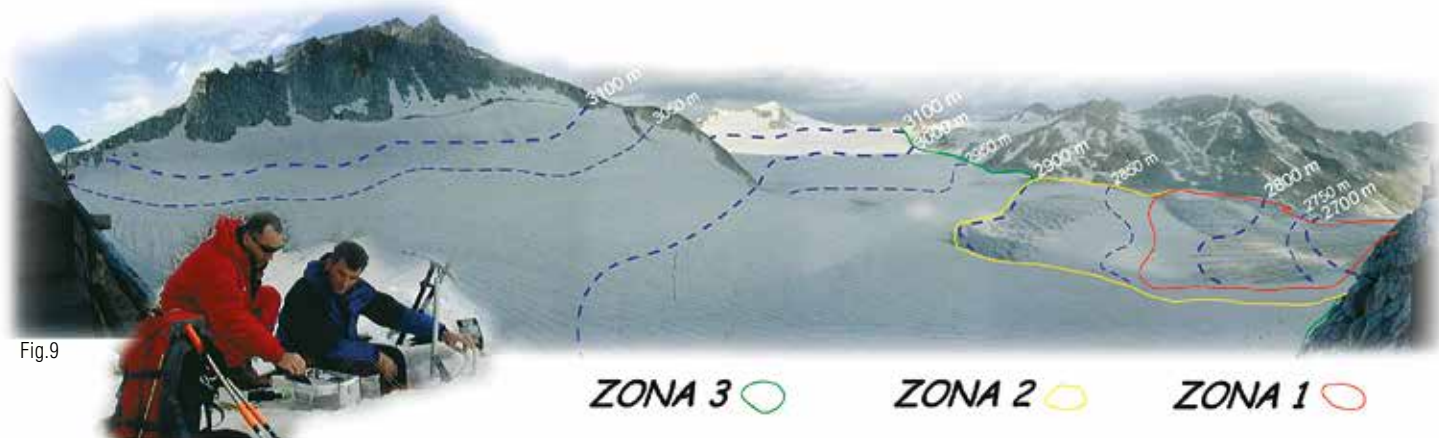


Fig.9

detrito sovrapposto a temperatura variabile) con una conduttività termica di 2 W/(m K) desunta dalla letteratura scientifica e sostanzialmente confermata dalle misure di campo.

Per la soluzione è stato scelto uno schema numerico esplicito alle differenze finite, in cui la temperatura superficiale, incognita, dello strato, $T_{s,t}$, viene calcolata in funzione della temperatura superficiale al passo precedente $T_{s,t-1}$.

Nella Figura 8 viene riportato, per i primi 10 giorni di settembre 2000, l'andamento della temperatura superficiale simulato per due celle vicine situate entrambe a 2000 m di quota, una esterna al ghiacciaio, l'altra con ghiaccio coperto da detrito.

Per la maglia esterna al ghiacciaio la temperatura si mantiene sensibilmente più alta e con maggiori fluttuazioni.

L'effetto di isolamento termico operato dalla copertura detritica sul bilancio energetico risulta evidente anche in termini di produzione di deflusso, riducendone la quantità.

Le precipitazioni ed i tassi di fusione di neve e ghiaccio sono risultati in buon accordo qualitativo con le misure di deflusso medio decadico effettuate, a titolo di verifica, all'invaso di Ceppo Morelli, a valle del ghiacciaio del Belvedere.

I RILIEVI AL GHIACCIAIO DELL'ADAMELLO

Le giornate di mercoledì 15 e giovedì 16 agosto sono state caratterizzate da ottime condizioni meteorologiche con tempo molto soleggiato e cielo terso salvo qualche modesta attività cumuliforme ma senza precipitazioni.

Lo zero termico era attorno ai 4500 m di quota ed è diminuito nella giornata di venerdì 17 agosto quando il passaggio

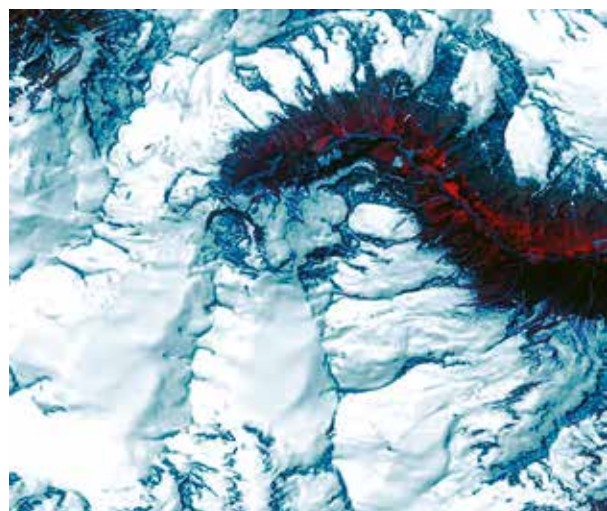


Fig.10

di una saccatura atlantica ha determinato tempo instabile con temporali che localmente sono stati forti con grandinate. Il 17 agosto la catena montuosa dell'Adamello è stata interessata da addensamenti cumuliformi già dal primo mattino e verso le ore 12.00-12.30 si sono verificate le prime precipitazioni temporalesche che hanno continuato fino a sera.

E' stato comunque possibile effettuare un rilievo nivologico completo e diverse osservazioni sulle proprietà della superficie del manto nevoso.

Una prima zona (v. Figura 9) dal fronte basale del ghiacciaio fino a 2800-2850 m di quota presentava copertura nevosa a chiazze (rapporto area innevata/area totale da 0/10 a 4/10) di spessore variabile dai 10 ai 40 cm, con crepacci quasi completamente aperti.





Fig.11



Fig.13

La superficie si presentava prevalentemente formata da grani bagnati (6c) con umidità bagnata (3-8% di acqua liquida).

Nella seconda zona, dai 2800-2850 m ai 2900 m di quota, la copertura nevosa era continua in area pianeggiante (rapporto area innevata/area totale 10/10) con spessore della neve variabile dai 20 ai 80 cm e presente a chiazze sul cambio di pendenza in concomitanza dei crepacci (rapporto area innevata/area totale 4/10).

La superficie si presentava prevalentemente formata da grani bagnati (6b, 6c) con umidità variabile da umida (< 3% di acqua liquida) a bagnata (3-8% di acqua liquida);

La terza zona, oltre i 2900 m fino al Rifugio ai Caduti dell'Adamello (3040 m) presentava copertura nevosa continua (rapporto area innevata/area totale 10/10) e spessore della neve variabile dai 60 ai 250 cm.

Rilievo nivologico al Passo della Lobbia Alta

Data / Ora	Sito	Coordinate	Quota (m)	Altre misure
17.08.2001 / 08.45	Adamello Rifugio Lobbia Alta	46° 09' 81" N 010° 34' 10" E	3000	Stratigrafia 0.50m Penetrometrica 0.50m
Temperatura dell'aria:		-2 °C		
Stato del cielo:		da nuvoloso a coperto		
Vento:		assente in rinforzo da SW a partire dalle ore 09.30		
Altezza neve nell'area:		2.50 m		
Strato superficiale:		strato compatto di 10 mm di spessore costituito da grani da fusione e rigelo (6b E=1.0 mm)		
Durezza strato superficiale:		molto alta pari a lama o coltello (> 10° Pa)		
Temperatura neve:		- 0.8 °C		
Umidità strato superficiale:		asciutta (0%)		
Densità:		530 kgm ³		
Rugosità sup. microscala:		superficie concava (Sc)		
Dimensioni delle irregolarità:		profondità 60 mm, lunghezza 400 mm, larghezza 300 mm		
Rugosità macroscala:		neve da sublimazione in evoluzione verso il firn		
Dimensioni delle irregolarità:		--		
Estensione areale omogenea:		> 1 km ²		

Fig.12

La superficie si presentava prevalentemente formata da grani bagnati (6b) con umidità variabile da asciutta (0% di acqua liquida) a umida (< 3% di acqua liquida).

In questa zona (Figure 10 e 11) è stato effettuato il rilievo nivologico i cui risultati sono riassunti nella Figura 12.

Da rimarcare la presenza di uno spessore di neve stagionale di ben 2.5 metri di altezza, in una zona dove spesso, negli anni recenti, il ghiacciaio e' scoperto già nel mese di agosto.

I grani da fusione e rigelo risentono dell'andamento delle temperature nei giorni precedenti il rilievo.

Le temperature rilevate presso la stazione nivometeorologica del Passo della Lobbia Alta

(Figura 13), la cui installazione è stata completata, a seguito della stipula di una convenzione tra l'Università di Brescia ed il parco Adamello-Brenta, nel corso del 2002, marcano un abbassamento delle temperature nel giorno 11 agosto (Figura 14).

La densità della neve è elevata, così come la sua durezza, mentre le irregolarità superficiali hanno dimensioni significative, sia in profondità sia in lunghezza.

CONCLUSIONI

Nell'articolo si sono illustrati sinteticamente i risultati della campagna di misure condotta nell'estate del 2001 contemporaneamente al passaggio del satellite TERRA su alcuni ghiacciai scelti come campione per il progetto GLIMS di monitoraggio

Stazione Meteorologica Adamello Passo della Lobbia (3015 m s.l.m.) Temperatura minima oraria dell'aria

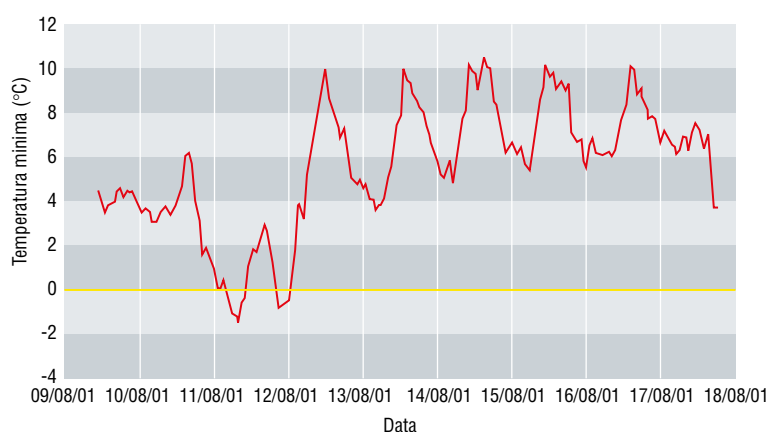


Fig.14

dei ghiacciai del globo.

Sui ghiacciai della Marmolada e dell'Adamello le condizioni meteorologiche non hanno consentito l'acquisizione di immagini telerilevate utili a scopi glaciologici, ma hanno comunque permesso di raccogliere informazioni sullo stato fisico del manto nevoso in un periodo generalmente favorevole per il riconoscimento dei limiti dei ghiacciai, della linea delle nevi e la stima di parametri di interesse idrologico, come l'albedo, che condiziona in modo determinante la fusione dei ghiacciai. Sul ghiacciaio del Belvedere è stato invece possibile misurare i profili di temperatura, i flussi di conduzione e la conduttività termica dello strato di detrito sovrapposto al ghiaccio.

Questi dati sono stati utilizzati per interpretare l'immagine rilevata dal sensore ASTER il 24 agosto 2001, la prima utile a scopi glaciologici acquisita sul territorio italiano: essa ha posto in evidenza la minore temperatura del detrito sovrapposto al ghiaccio, rispetto alla roccia nuda, e di correlare le variazioni termiche con lo spessore della copertura.

La simulazione numerica del regime termico del detrito sovrapposto al ghiaccio sembra indicare che sul ghiacciaio del Belvedere la copertura detritica, mediamente, preserva il ghiacciaio dalla fusione, riducendone l'intensità.

Le immagini acquisite hanno mostrato interessanti potenzialità in virtù della versatilità dell'informazione multispettrale che le caratterizza.

La frequente presenza di nubi in quota limita, tuttavia, il numero di immagini utili alla glaciologia, in modo che il previsto monitoraggio sistematico dei ghiacciai italiani richiederà un rinnovato impegno nei prossimi anni.

BIBLIOGRAFIA

B. Astori e G. Togliatti - Il rilievo fotogrammetrico del ghiacciaio Pian di Neve (Adamello), *Boll. Com. Glac. It.*, ser. 2, 11 (1), 33-50, 1964.

C. Baroni e A. Carton - Geomorfologia dell'alta Val di Genova (Gruppo dell'Adamello, Alpi Centrali), *Geogr. Fis. Dinam. Quat.*, 19, 3-17, 1996.

J. D. Bergen - A possible relation of Albedo to the Density and Grain Size of Natural Snow Cover, *Water Resources Research*, 11(5), 745-746, 1975.

E. Binaghi, P. Madella, M.G. Montesano, e A. Rampini - Fuzzy contextual classification of Multisource Remote sensing Images, *IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sensing*, 35, 2, 326-340, 1997.

R. Casacchia, F. Lauta, R. Salvadori, A. Cagnati e M. Valt - Riflettanze di neve e ghiaccio in Artico, *Rivista italiana di telerilevamento*, Firenze, 17/18, 9-20, 2000.

Comitato Glaciologico Italiano - C.N.R. - Catasto dei ghiacciai italiani, 4 voll. Torino, 1959-1962.

Comitato Glaciologico Trentino - I ghiacciai del Parco Adamello-Brenta, Parco Adamello Brenta, Nuova Stampa Rapida, Trento, 1994.

G. Diolaiuti, C. D'Agata e C. Smiraglia, Variations in Belvedere Glacier (Monte Rosa, Italian Alps) tongue thickness and volume in the second half of the 20th century, *Artic, Antarctic and Alpine Research* (in stampa).

A. Gili-Borghet - Il ghiacciaio del Belvedere e gli studi compiuti sino all'anno 1957, *Bollettino del Comitato Glaciologico Italiano*, 10(II), 33-57, 1962.

B. G. Grossi, R. Ranzi and B. Bacchi, Distributed Snowmelt Simulation for the TT4 Event in the Toce River Watershed, *RAPHAEL Final Report*, Università di Brescia, 2000.

W. Haeberli, A. Käab, F. Paul, M. Chiarle, G. Mortara, A. Mazza and S. Richardson - A surge-type movement at Ghiacciaio del Belvedere and a developing slope instability in the east face of Monte Rosa, Macugnaga, Italian Alps - *Norsk Geografisk Tidsskrift - Norwegian Journal of Geography*, 56 (2), 104-111, 2002.

J.S Kargel e H.H. Kieffer - Opportunity for nearly comprehensive Global Glacier Monitoring with ASTER, *EOS Transactions, AGU*, 1995 Fall Meeting, vol. 76 (46), F91, 1995.

G. Lechi e R. Ranzi - Calcolo di riflettività lambertiana a partire da dati MSS e misure di radiazione solare al suolo, *Atti del IV Convegno dell'Associazione Italiana Telerilevamento*, Pisa, 25-29 Novembre, 307-315, 1990.

A. Mazza - Some results of recent investigations on ghiacciaio del Belvedere (Anzasca Valley, Western Alps) taking into account the glacier mechanics. *Geogr. Fis. Dinam. Quat.*, 23, 59-71, 2000.

U. Monterin - La fine della fase progressiva e l'inizio della nuova fase di ritiro dei ghiacciai italiani del Monte Rosa. *Sonderabdruck aus Zeitschrift für Gletscherkunde*, 1926, 25.

R. Ranzi e R. Rosso - A physically based approach to modelling distributed snowmelt in a small alpine catchment, *IAHS Publ.*, 205, 141-159, 1991.

M. Santilli, G. Orombelli e M. Pelfini - Variations of Italian glaciers between 1980 and 1999 inferred by the data supplied by the Italian Glaciological Committee, *Geogr. Fis. Dinam. Quat.*, 25, pp. 61-76, 2002.

R. Serandrei-Barbero e G. Zanon - The Italian Alps, in: *Satellite Image Atlas of Glaciers of the World - Europe*, edito da R.S. Williams e J. G. Ferrigno, USGS Professional Paper 1386-E, Washington D.C., 1993.

Servizio Glaciologico Lombardo - Ghiacciai in Lombardia, Ed. Bolis, Milano, 1992.

S. Taschner e R. Ranzi - Comparing the Opportunities of LANDSAT-TM and ASTER Data for Monitoring a Debris Covered Glacier in the Italian Alps within the GLIMS Project, *Proc. IGARSS Symposium 2002*, Toronto, ISBN 0-7803-7537-8, IEEE, Piscataway, NJ, 3 pp., 2002.

World Glacier Monitoring Service - World Glacier Inventory. Status 1988, *IAHS-UNEP-UNESCO*, Teufen, Switzerland, 1989.

