

## **Il Ghiacciaio del Miage: cartografia geomorfologica e studio della copertura detritica attraverso tecniche di fotogrammetria digitale e telerilevamento**

Luigi Perotti, Marco Bacenetti, Paolo Zamparutti, Marco Giardino

Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Torino  
Via Valperga Caluso 35, Torino, (luigi.perotti, marco.giardino)@unito.it

### **Riassunto**

Scopo di questo lavoro è stato lo studio geomorfologico s.l. del Ghiacciaio del Miage (Valle d'Aosta), attraverso rilievi di terreno e tecniche di fotogrammetria digitale e di telerilevamento. Una campagna di rilievi di terreno, svolta nelle estati 2008 e 2009 con l'impiego di un pocket-PC con GPS integrato, di un DEM LiDAR e l'utilizzo di ortofoto hanno permesso di ottenere una carta geomorfologica aggiornata dell'intero bacino e una carta dell'assetto della copertura detritica aggiornata al 2008, alla scala 1:10000. I processi fotogrammetrici, eseguiti sul volo RAVA del 1997 e sul volo Ghiacciai 2003, hanno consentito di costruire modelli stereoscopici con una precisione al di sotto dei 4 m. L'analisi di tali modelli ha consentito di valutare gli spostamenti di 18 blocchi rocciosi nelle annate 1997-2003-2006-2008, impiegando per le annate 2006 e 2008 rispettivamente le ortofoto del Ministero dell'Ambiente e il DEM LiDAR. È stata stimata anche una velocità media della massa di ghiaccio per l'intervallo '97-'06 di ~50m/a nel settore alto e ~10m/a nei settori frontali. Si sono inoltre valutate le variazioni areali degli accumuli detritici causate dal flusso di ghiaccio e le variazioni di ice-cliff e bédère a seguito di variazioni climatiche brevi ed intense (estate 2003). L'analisi delle immagini telerilevate MIVIS'99 ha permesso, attraverso la Principal Component Analysis (PCA), di effettuare una classificazione della copertura detritica e produrre una cartografia interpretativa del bacino, confrontabile con quella di terreno già esistente (Deline, 2002), ma arealmente più estesa di questa. L'integrazione dei dati ottenuti all'interno di un sistema informativo ha infine consentito di comprendere come la copertura detritica abbia origine, in particolare, da settori localizzati dove l'interazione tra dinamica glaciale, tettonica, esposizione geografica e microclima giocano un ruolo fondamentale per la produzione di materiale litoide. Il detrito supraglaciale subisce importanti processi traslativi longitudinali, laterali e verticali dovuti alla dinamica del ghiacciaio. L'applicazione di metodologie innovative ha favorito l'integrazione dei dati e la loro interpretazione ai fini geomorfologici.

### **Abstract**

The aim of this work is the geomorphological study of the Miage Glacier (Aosta Valley, NW-Italy) by means of fieldwork, photogrammetric and remote sensing techniques. Fieldwork activities were performed during 2008 and 2009 summers, by using a pocket-PC with GPS and Mobile-GIS software. Using orthophotos and LIDAR DEM as a support to the cartography, a geomorphological map of the whole Miage basin and a glacier-cover map, both at the scale 1:10000, were created. The photogrammetric analysis was conducted on two flight series of the Regione Autonoma Valle d'Aosta: RAVA 1997 and Ghiacciai 2003, stereoscopic models were build with a 4m precision. The displacements of 18 large rock-blocks were evaluated for years 1997-2003-2006-2008 intervals, data for 2006 and 2008 were taken respectively from orthophotos of the Italian Ministry of Environment and Regione Autonoma Valle d'Aosta LIDAR DEM. An estimation of the velocities for the glacial mass was performed for the interval '97-'06, resulting in ~50m/y for the upper part and ~10m/y close to the glacial fronts. The areal size deformation of the debris-cover units due to

the ice mass flow has been evaluated. Short and strong climatic-induced variations on bédère and ice-cliff were also noticed. MIVIS images analysis allowed to classify the debris cover of Miage Glacier using the Principal Component Analysis (PCA). An interpretative map of the whole basin, comparable with that by Deline (2002), but larger, was then created. Integration of all collected data inside a geographic information system allowed to understand that the origin of the debris cover is localized where glacial dynamic, tectonics, geographical settings and local climate strongly interact each others for producing rock material. While on the glacier surface, the material is subjected to extensive translational, longitudinal, lateral and vertical processes due to the ice mass dynamics. The use of new technologies supported the integration of the data collected and their geomorphologic interpretation.

### **Introduzione**

Il presente lavoro si inserisce all'interno di uno studio complessivo dell'assetto morfo-strutturale della Val Veny, della quale il bacino del Miage è il più sviluppato in estensione, 11 km<sup>2</sup>. Il Ghiacciaio del Miage è situato sul versante meridionale del Massiccio del Monte Bianco, in prossimità del confine Nord-Occidentale dell'Italia; amministrativamente ricade all'interno del comune di Courmayeur e si sviluppa tra quota 4810 m, sommità del Monte Bianco, e i 1700 raggiunti dalla fronte del ghiacciaio; si caratterizza per la totale copertura detritica del settore di ablazione, caratteristica che lo classifica come ghiacciaio nero: la lingua che scorre all'interno della valle del Miage presenta infatti, uno strato continuo di detrito che scherma il sottostante ghiaccio dalle radiazioni solari. Le oggettive difficoltà logistiche di accesso e le condizioni climatiche spesso sfavorevoli hanno portato alla scelta di integrare in modo significativo i dati di terreno con tecniche geomatiche di remote sensing e fotogrammetria digitale. L'obiettivo del presente lavoro è stato la ricostruzione geomorfologica s.l. dell'intero bacino glaciale; inoltre, particolare attenzione è stata data alla copertura detritica del settore di ablazione che contraddistingue questo ghiacciaio, valutandone le differenze composizionali e le dinamiche. L'integrazione di diverse tecniche geomatiche: GIS, GPS, telerilevamento e fotogrammetria hanno consentito di costruire un quadro conoscitivo dell'area e di valutarne gli sviluppi dovuti al forcing climatico attuale. La produzione diretta di dati digitali ha consentito la loro integrazione con gli studi in atto nei settori di valle adiacenti in modo da poter contribuire alla creazione di un unico modello evolutivo morfo-strutturale del settore indagato.



*Figura 1 – Visione simulata, ortofoto spalmata su DTM Lidar, del settore di valle indagato. Sullo sfondo il Ghiacciaio del Miage trilobato, in primo piano a destra il Ghiacciaio della Brenva.*

### Metodi di indagine

Tre sono le tipologie di tecniche adottate durante questa indagine: 1) rilievo di terreno attraverso l'impiego di Pocket-PC con GPS integrato, 2) analisi multitemporale attraverso tecniche di fotogrammetria digitale aerea (A. Kaab & A. Funk, 1999) e 3) analisi della copertura detritica attraverso tecniche di telerilevamento iperspettrale. Il lavoro ha previsto due fasi successive: una prima fase di raccolta dei dati ed una seconda parte di interpretazione di essi in chiave geomorfologica integrando i dati provenienti da tutte le tecniche applicate.

La scelta di effettuare la campagna di terreno con l'impiego di un Pocket PC con GPS integrato ha permesso di raccogliere i dati di terreno già in formato digitale e di integrarli direttamente all'interno di un sistema GIS (Perotti, 2007).

La raccolta dati avviene tramite l'applicativo ESRI ArcPad e la toolbar appositamente creata SRG<sup>2</sup> (Supporto al Rilievo Geologico e Geomorfologico); l'accuratezza del posizionamento delle forme riportate in scala 1:10000 è stata possibile grazie al GPS di codice integrato all'interno del palmare. A supporto del rilievo e dell'interpretazione ortofoto e CTR (Carta Tecnica Regionale) in formato raster .ecw sono state caricate sul palmare per facilitare l'editing di terreno. I dati sono quindi stati inseriti all'interno di un GIS, capace di ottimizzare la sovrapposizione di numerose sorgenti di dati e di integrarle anche con i dati provenienti da altri lavori svolti nei settori di valle adiacenti. La scelta dell'impiego del palmare si caratterizza per la notevole maneggevolezza dello strumento, necessaria in un contesto di alta quota e l'economicità della parte hardware necessaria, soprattutto se paragonata ad altre strumentazioni che svolgono la stessa funzione (tablet PC).

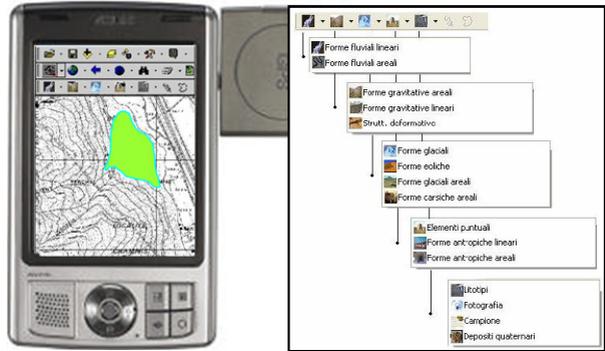


Figura 2 – Esempio di pocket-PC e di toolbar SRG<sup>2</sup> (Supporto al rilievo Geologico e Geomorfologico) per il lavoro sul terreno.

L'analisi della dinamica del Ghiacciaio del Miage è stata possibile attraverso la fotogrammetria digitale aerea. Sono stati scannerizzati con scanner fotogrammetrico i voli del 1997 RAVA e 2003 Ghiacciai ad una risoluzione di 700 DPI con deformazione nell'ordine degli 80-120 micron, corrispondenti a circa 1 metro sul terreno. Attraverso la suite LPS (Leica Photogrammetry Suite) sono quindi stati costruiti i modelli stereoscopici effettuando per ogni fotogramma prima l'orientamento interno e in seguito quello esterno. L'orientamento interno prevede utilizzo dei dati di costruzione e presa della fotocamera contenuti nel certificato di calibrazione precedentemente reperito ed il riconoscimento delle marche fiduciali direttamente sul fotogramma. Questa operazione è stata svolta mantenendo un errore RMSE (Root Mean Square Error) massimo al di sotto dei 4 pixel e medio al di sotto di 1 pixel, corrispondente a 20 cm sul terreno (fig.3). Dopo aver ricreato il fascio proiettivo con l'orientamento interno è stato necessario orientare i fotogrammi nello spazio reale attraverso l'orientamento esterno. Per la creazione del modello e l'orientazione planimetrica sono stati riconosciuti su cartografia CTR ufficiale 70 GCPs (Ground Control Points), i valori di quota sono invece stati ottenuti dal DTM della Regione Valle d'Aosta con passo 10 m. Per verificare la qualità del modello prodotto sono stati aggiunti dei Check Points (12): il risultato dell'operazione è riportato in tabella 1. Considerata la bontà della georeferenziazione ottenuta, la scala di lavoro media è stata 1:7500. Dai modelli così ottenuti sono state prodotte carte di spostamento della copertura del ghiacciaio (grandi blocchi di roccia, accumuli di crollo, ...) e di variazione delle forme glaciali (*Ice-cliff*, *bédière*, ...).

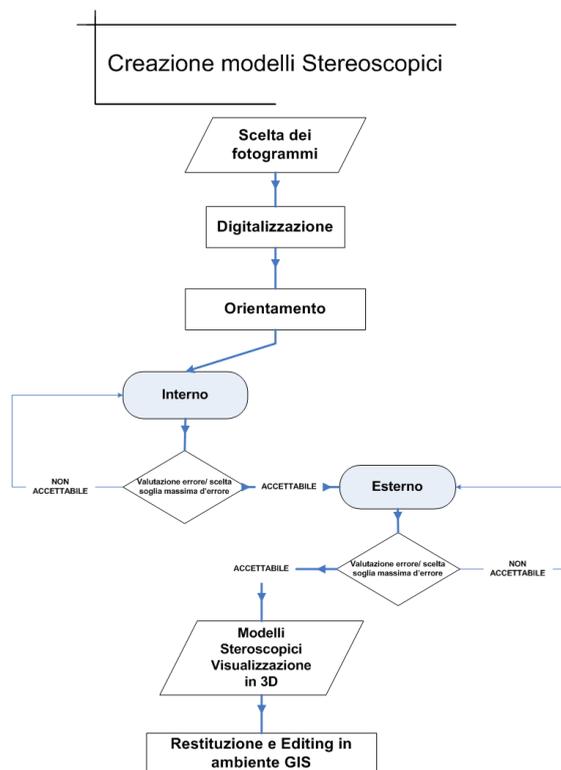


Figura 3 – Flow Chart impiegato durante i processi fotogrammetrici.

Tabella 1 – Valori di RMSE per le strisciate analizzate.

SPETTROMETRO	REGIONE DELLO SPETTRO	NUMERO	INTERVALLO SPETTRALE ( $\mu\text{m}$ )	AMPIEZZA BANDE* ( $\mu\text{m}$ )
1	Visibile	20	0.431÷0.833	0.020
2	infrarosso vicino	8	1.15÷1.55	0.05
3	infrarosso medio	64	1.985÷2.479	0.009
4	infrarosso termico	10	8.21÷12.70	0.35

La copertura detritica del ghiacciaio presenta una variabilità litologica spaziale elevata. Si è deciso di indagare in *primis* la diposizione delle varie unità di copertura del ghiacciaio e secondariamente cercare di individuare i settori di origine sui versanti. Questo è stato effettuato impiegando le immagini del volo MIVIS della Regione effettuato nel 1999. Il sensore MIVIS è un sensore avio trasportato di tipo whiskbroom costituito da 4 spettrometri: 1 nel visibile con 20 bande, 1 nell'infrarosso vicino con 8 bande, 1 nell'infrarosso medio con 64 bande e 1 nel infrarosso termico con 10 bande. Le caratteristiche sono riportate in tabella 2. L'IFOV (*Istantaneous Field Of View*) di 2 mrad consente una buona risoluzione geometrica del pixel a terra (5metri). I dati MIVIS sono stati forniti con un processamento di livello 1: calibrati radiometricamente al sensore utilizzando le sorgenti di riferimento interne allo strumento. Le immagini sono state prima ortoproiettate eliminando le deformazioni interne indotte, in particolare, dal modello di sensore.

Tabella 2 – Proprietà degli spettrometri del sensore MIVIS.

ANNO di VOLO	STRISCIATA	FOTOGRAMMI	ERRORE PLANIMETRICO (m)	ERRORE ALTIMETRICO (m)	SCALA NOMINALE
1997	A17	1-13	0,9	2,7	1: 5000
1997	A18	1-11	1,7	1,7	1:8500
1997	A19	1-11	1,4	0,65	1:7000
2003	1	9040-9042	1,3	5	1:6500
2003	2	9074-9078	1,3	5	1:6500

L'elaborazione ha previsto la correzione atmosferica e topografica delle stesse. Non avendo a disposizione dati di calibrazione a terra al momento dell'acquisizione si è proceduto con una Dark Subtraction. La topografia particolarmente accidentata del terreno ha fatto propendere per l'applicazione di una metodologia che correggesse la differente rifrazione dei versanti rispetto alla superficie sub pianeggiante della lingua glaciale. Sono stati testati 2 metodi: metodo del C-Factor e metodo del Coseno. Il primo restituiva però numerosi artefatti nei settori ad elevata pendenza. Si è quindi scelto di processare le immagini con il metodo del Coseno che, seppur meno accurato, consentiva di correggere la radianza senza introdurre artefatti alle immagini. I settori di nostro interesse nelle immagini erano rappresentati solamente dalle porzioni di roccia/ suolo nudo: sono quindi stati impiegati appositi indici NDVI (C.J. Tucker, 1979) e NDSI (Dozier, 1989) per l'eliminazione dal processamento dei pixel riferibili a vegetazione o a neve/ghiaccio, allo stesso modo sono stati eliminati i pixel in ombra che per definizione non contengono informazioni dirette di riflettenza, ma solamente dovute a backscattering delle superfici adiacenti, ricreando le condizioni di illuminazione presenti attraverso l'impiego del DTM Lidar (Fig. 4).

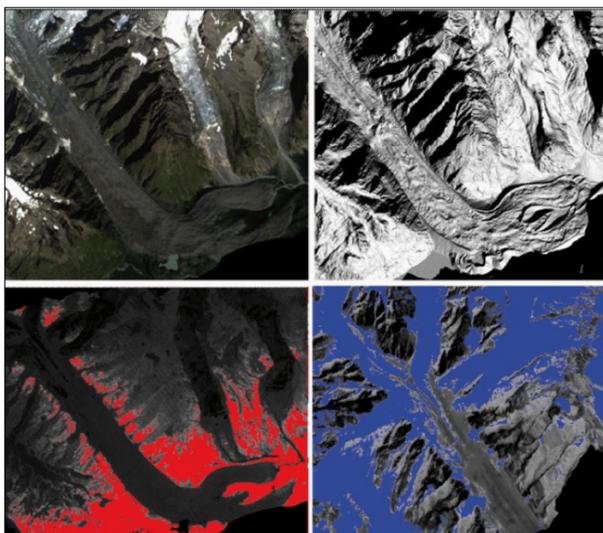
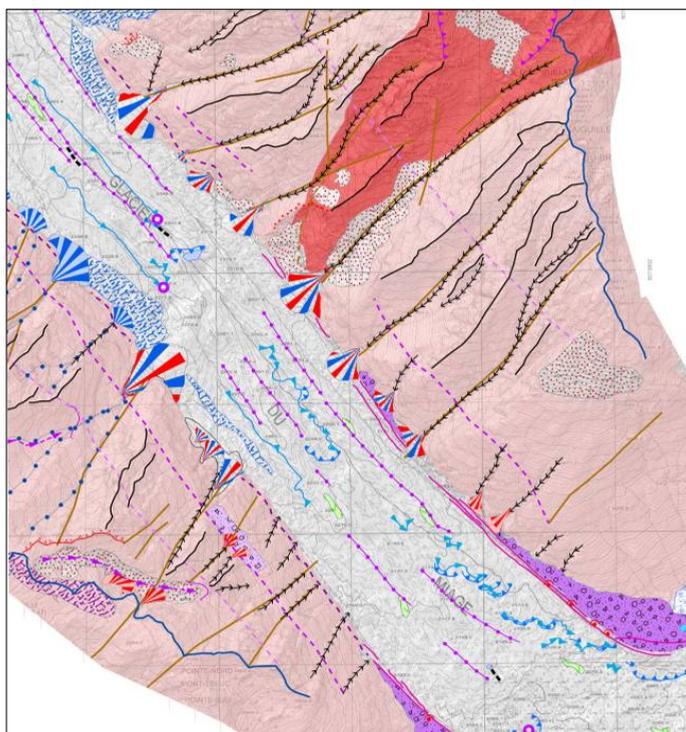


Figura 4 – Da in alto a sinistra in senso orario: immagine MIVIS ortorettificata, simulazione delle ombre con DTM Lidar, indice NDSI e indice NDVI.

Le immagini sono quindi state processate con il metodo delle PCA (Principal Component Analysis). Infatti, tale metodologia consente di enfatizzare la variabilità dei dati per meglio visualizzarne le componenti con maggior riflettenza. La procedura trasforma un set di variabili correlate in un nuovo set di variabili non correlate, ordinate in ordine decrescente di varianza (Marcus & ali, 2003). Un numero di variabili viene quindi trascurato a favore di una riduzione della mole di dati e una maggiore variabilità del dato stesso. Le bande sono passate da 89 (102 originali meno quelle danneggiate) a 15.

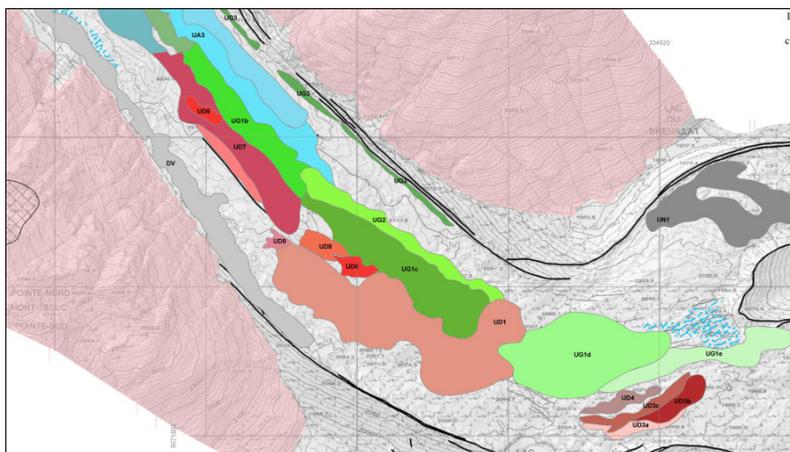
### Risultati ottenuti

Il rilievo di terreno attraverso Pocket PC e la successiva integrazione dei dati attraverso le carte derivate dal DTM Lidar (hillshade, slope, aspect...) e le ortofoto del Ministero dell'Ambiente hanno portato alla produzione di una carta geomorfologica aggiornata dell'intero bacino del Ghiacciaio del Miage alla scala 1:10000 (Fig. 5). Sono state riconosciute e cartografate tutte le forme tipiche dell'ambiente glaciale: moulins, bédiers, laghi supraglaciali, relitti di cavità endoglaciali, morene viaggianti, accumuli di crollo, debris cones, con valanghivi e valanghivo-detritici. Inoltre, sono stati cartografati gli elementi utili alla ricostruzione dell'evoluzione recente del ghiacciaio: terrazzi glaciali sospesi, valli tributarie relitte, circhi glaciali attivi e non, trimlines, incisioni di rotte glaciali e cordoni morenici sottoposti a fenomeni di erosione e traslazione.



*Figura 5 – Estratto dalla Carta geomorfologica  
in scala 1:10000.*

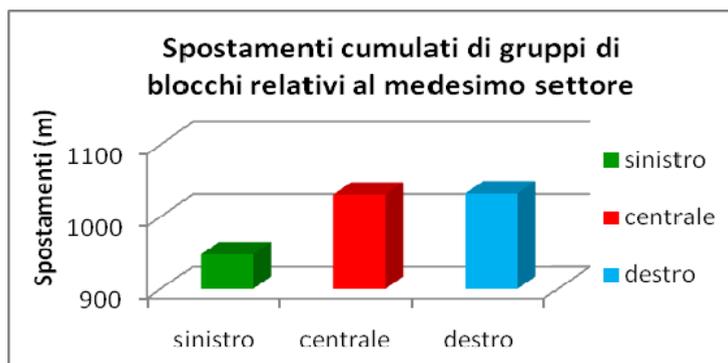
L'impiego dei dati Lidar ha consentito l'individuazione delle principali discontinuità presenti sui versanti della valle; queste rappresentano un fattore predisponente per la produzione e successiva mobilitazione del materiale che si deposita sulla lingua glaciale sottostante sotto forma di accumuli di crollo principalmente. Durante il rilevamento di terreno sono state cartografate le unità che compongono la copertura distiguendole su base litologica e granlumetrica; questo lavoro ha consentito di produrre una cartografia aggiornata della copertura detritica nonché di individuare e classificare le principali zone di origine del detrito (Fig. 6).



*Figura 6 – Estratto dalla carta delle coperture detritica in scala 1:10000. Ciascuna unità è rappresentata con un colore diverso ed un codice identificativo.*

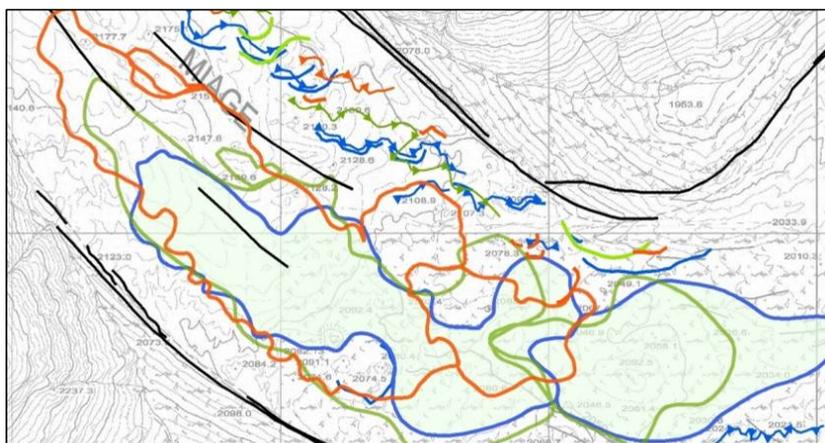
L'utilizzo del GPS in fase di rilievo ha consentito di posizionare correttamente le unità, operazione altresì difficilmente effettuabile vista la mancanza di punti di riferimento.

L'analisi dei modelli stereoscopici, ottenuti a seguito del processo fotogrammetrico, in un'ottica multi temporale, ha permesso di individuare alcuni valori della dinamica glaciale del ghiacciaio quali i tassi di spostamento e la velocità media per l'intervallo '97-'06. I risultati sono stati ottenuti valutando gli spostamenti di 18 grandi blocchi rocciosi presenti sulla superficie per le annate 1997-2003-2006-2008, mentre i dati per le annate 2006 e 2008 sono stati ottenuti dalle ortofoto del Min.Amb. e dal Lidar. L'analisi dei vettori di spostamento ha messo in evidenza come i valori di spostamento siano influenzati dalla posizione dei blocchi sulla lingua glaciale. I blocchi che subiscono una maggiore traslazione longitudinale sono quelli posizionati nella parte mediana del ghiacciaio mentre quelli più vicini al margine presentano spostamenti minori. Questo fatto è probabilmente dovuto all'attrito che la massa di ghiaccio sviluppa con le pareti della morena (vedi fig. 7).



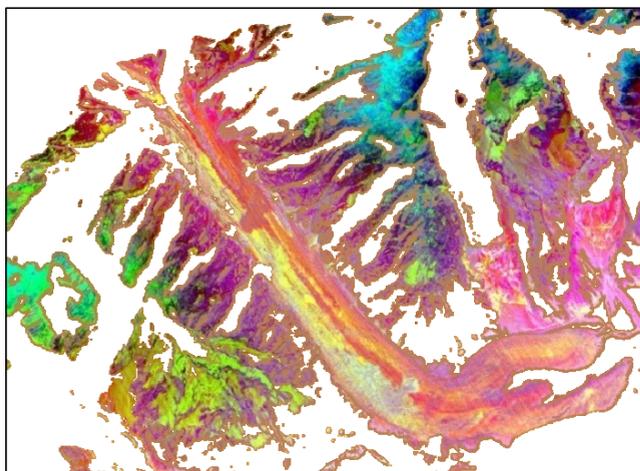
*Figura 7 – Grafico degli spostamenti cumulati di gruppi di 2 blocchi localizzati rispettivamente nel settore sinistro, nel settore centrale e nel settore destro.*

I valori indicano anche una forte asimmetria tra il settore sinistro e quello destro questo fenomeno potrebbe essere dovuto ad una differente alimentazione di monte del flusso. Le velocità medie per l'intervallo considerato sono di 50 m/a nel settore a monte e circa 10 m/a per il settore frontale. L'analisi quantitativa degli elementi geomorfologici estratti dai modelli ha consentito di rilevare come il numero degli ice cliff diminuisca drasticamente per l'anno 2003 per poi tornare a salire nel 2008, le bédère, invece, si presentavano maggiormente frammentate nel loro corso per il 1997 e il 2008 e più continue ed incise per l'anno 2003: questo potrebbe essere spiegato considerando l'eccezionale caldo dell'estate 2003 che ha portato alla fusione di tutte le porzioni di ghiaccio (ice cliff) non schermate con conseguente aumento delle acque ruscellanti e approfondimento dei corsi d'acqua supragliaciali, bédère appunto. Nel 2008 la situazione si presenta ristabilita: le bédère parzialmente frammentate e gli ice-cliff sviluppati. Dal punto di vista geomorfologico, sono state analizzate le deformazioni subite dagli accumuli detritici: a monte, infatti, i depositi subiscono uno stiramento verso valle dovuto alle alte velocità di flusso, mentre più a valle l'aumento del tasso di ablazione e una minore velocità portano ad un'espansione areale delle unità (fig.8).



*Figura 8 – Stralcio della carte delle deformazioni degli accumuli e delle bédère e ice cliff.*

Le immagini MIVIS, ottenute a seguito del processamento precedentemente descritto, sono state analizzate impiegando un approccio di tipo qualitativo. Attraverso la sintesi di numerose triplette RGB con le nuove bande ottenute e applicando un algoritmo di stretching sono state prodotte delle immagini colorimetriche (fig. 9) dalle quali venivano di volta in volta estratte il maggior numero di informazioni attraverso fotointerpretazione. Il risultato è una cartografia della copertura detritica del ghiacciaio del 1999, confrontabile con quella proposta da Deline (2002), ma arealmente più estesa. Le unità, la cui differenza composizionale, rispetto a quelle adiacenti, era minore, sono risultate indistinguibili. Per quanto riguarda i versanti, nonostante la forte acclività abbia condizionato in modo significativo i risultati, restituendo valori anomali di radianza, è stato possibile riconoscere le falde detritiche presenti ed un importante lineamento sul versante sinistro. La differente natura litologica del versante destro da quello sinistro è stata evidenziata dalle sintesi applicate. Per quanto riguarda le aree sorgenti dei grandi accumuli, la loro individuazione è stata difficoltosa poiché: 1) ricadevano all'interno di aree al di fuori dell'immagine impiegata o in settori in ombra al momento della presa 2) ricadevano in settori sub verticali e 3) la sostanziale differenza tra detrito e roccia litoide restituisce firme spettrali molto differenti e quindi difficilmente paragonabili.



*Figura 9 – Esempio di tripletta RGB ottenuta attraverso la sintesi delle bande ottenute con la tecnica delle PCA.*

## **Conclusioni**

Il filo conduttore del lavoro è stata l'integrazione dei dati provenienti da diverse sorgenti all'interno di un unico sistema informativo geografico. Questo ha permesso una dettagliata analisi dei processi geomorfologici caratteristici del Ghiacciaio del Miage. E' stato possibile comprendere come la copertura detritica abbia origine, in particolare, da settori localizzati dove l'interazione tra dinamica glaciale, tettonica, esposizione geografica e microclima gioca un ruolo fondamentale nella produzione di materiale litoide. L'azione della gravità lo fa giungere sulla superficie del ghiacciaio dove subisce importanti processi traslativi longitudinali, trasversali e verticali. Le metodologie scelte si sono rivelate adeguate all'ambiente di lavoro consentendo di integrare il lavoro di campagna con le analisi di laboratorio dei dati Lidar e dei modelli stereo. L'impiego della tecnica della PCA si è dimostrato valido nell'analisi delle immagini MIVIS fornendo risultati incoraggianti e decisamente migliori rispetto all'impiego dei classificatori automatici. Sono comunque stati evidenziati problemi tipici dell'ambiente montano che hanno limitato i risultati a determinati settori non affetti da shadowing o backscattering. Dal punto di vista geomorfologico, è stato evidenziato come il forcing climatico recente abbia effetti non solo sul lungo periodo, ma anche su periodi limitati nel caso di variazione brevi ed intense. L'integrazione di tecniche geomatiche a livello di studi di bacino è sicuramente uno strumento fondamentale per poter indagare settori difficilmente accessibili come quelli del Miage.

### **Bibliografia**

- Andrew M.W., Logleiter C.J., Aspinall R.J., Boardman J.W., Crabtree R.L. (2003) "Highspatial resolution hyperspectral mapping of in-stream habitats, depths, and woody debris in mountain streams" *Geomorphology*, Volume 55, Issues 1-4, Pages 363-380.
- Deline P. (2002) *Etude géomorphologique des interactions entre écroulements rocheux et glaciers dans la haute montagne alpine : le versant sud-est du massif du Mont Blanc (Vallée d'Aoste, Italie)*. Phd thesis, Université de Savoie.
- Dozier J. (1989) "Spectral Signature of Alpine Snow Cover from Landsat Thematic Mapper", *Remote Sensing of Environment*, 28, pp. 9-22.
- Kaab A. & Funk A. (1999) "Modelling mass balance using photogrammetric and geophysical data: a pilot study at Griesgletscher, Swiss Alps", *Journal of Glaciology*, 45, 151, 575-583.
- Perotti L. (2007) *Geomorfologia e Geomatica: nuovi strumenti e metodi per il rilevamento e la cartografia tematica*, Phd thesis, Università degli Studi di Torino, Facoltà di Scienze Matematiche Fisiche e Naturali, Dipartimento di Scienze della Terra.
- Tucker C.J. (1979) "Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation", *Remote Sensing Environ*, 8: 127-150.