

## **Impiego di tecniche geomatiche integrate per lo studio di aree glaciali e recentemente deglacializzate delle Alpi Occidentali piemontesi**

Perotti Luigi (\*), Bertotto Stefania (\*), Bacenetti Marco (\*), Damiano Elisa (\*\*), Chiarle Marta (\*\*), Giardino Marco (\*)

(\* ) Università degli Studi di Torino, GeoSITLab, Via Valperga Caluso 35, tel. 0116705168, [luigi.perotti@unito.it](mailto:luigi.perotti@unito.it)

(\*\* ) CNR-IRPI Torino, Strada delle Cacce 73, tel. 0113977836, [marta.chiarle@irpi.cnr.it](mailto:marta.chiarle@irpi.cnr.it)

### **Riassunto**

In questo lavoro si presenta un'analisi dell'applicabilità di alcune tecniche geomatiche per il monitoraggio di settori a marcata dinamicità geomorfologica. La finalità ultima è quella di riconoscere in modo tempestivo i segnali dell'insorgere di un'eventuale instabilità che possano evolvere in situazioni di rischio.

Il contributo specifico del gruppo di lavoro, composto da Università di Torino (GeoSITLab) e CNR-IRPI Torino, è stato finalizzato all'integrazione di una gamma di tecniche geomatiche ad alcuni settori dell'ambiente glacializzato piemontese, nell'ambito del progetto interreg alcotra n.56 GlaRiskAlp (Rischi Glaciali nelle Alpi Occidentali).

In questo articolo si intende approfondire una parte dei risultati relativi al progetto in riferimento allo studio volto alla verifica dell'impiego di le tecniche di fotogrammetria aerea digitale e di posizionamento satellitare (GNSS).

### **Abstract**

The purpose of this work is to present the methodologies applied to study dynamical areas, as glacial and periglacial areas. The working group is composed by members of Turin University (GeoSitLab laboratory) and the CNR-IRPI Torino, in the framework of the Interreg Alcotra n.56 project GlaRiskAlp (Glacial Risk in Western Alps).

The methodology exploits digital aerial photograms, that are orthorectified, to extract themes for a topographical and geomorphological characterization of landscape at regional scale. At a local scale, the DEM extraction, from flights of different years, is useful to make comparisons of glaciers surface. Remote sensing techniques are doubtless necessary in large or unaccessible areas, but they are integrated by GNSS campaigns on field, using a fixed GPS station, and a kymatical one, to obtain topographical profiles of glacier variations.

### **Introduzione**

Alla luce dei cambiamenti climatici in corso (IPCC, 2007), si ritiene che specialmente i ghiacciai presenti sulle Alpi occidentali stiano reagendo alle mutazioni del clima in maniera straordinariamente rapida e possano generare fenomeni di instabilità (Dutto & Mortara, 1992; Chiarle & Mortara, 2007). Si tratta di studi che nascono in seguito alle attività proposte nell'ambito del progetto GlaRiskAlp, che raccoglie l'eredità del precedente progetto Glaciorisk, nel quale era stato realizzato un inventario dei fenomeni di instabilità (Didier & Gay, 2003). Lo scopo del progetto consiste nella messa a punto di metodologie volte allo studio della pericolosità di aree recentemente deglacializzate; tali metodologie sono sviluppate presso il GeoSitLab (<http://www.natrisk.org/datapage.asp?id=44&l=1>) e il CNR-IRPI di Torino (<http://www.irpi.to.cnr.it/>) nell'ambito del progetto Interreg Alcotra n.56 GlaRiskAlp (Rischi Glaciali nelle Alpi Occidentali, <http://www.glariskalp.eu>).

Lo scopo generale del progetto è dunque l'individuazione nelle Alpi Occidentali di aree recentemente deglaciate che potrebbero innescare fenomeni di instabilità e la messa a punto di tecnologie innovative atte a monitorarne gli effetti (Bertotto *et al.*, 2011).

A questo scopo è stato realizzato un progetto GIS nel quale sono visualizzabili a diversi livelli i dati cartografici, aerofotografici e le immagini satellitari d'archivio disponibili per ciascun ghiacciaio (fig.1).

METODOLOGIA IMPIEGATA /ANNO	Ghiacciaio Capra	Ghiacciaio Mulinet	Ghiacciaio Ciardoney
GNSS	2011-2012-2013	2012	2012
FOTOGRAMMETRIA TERRESTRE	2011-2012-2013	/	2012
AEROFOTOGRAMMETRIA	1954- 1983 -1988 - 2000- 2005	1954- 1983 - 1988 -2000	1954- 1975, 1983, 1988, 2000, 2001, 2005
LIDAR	2010	/	2010
IMMAGINI SATELLITARI	2010	2010	2010
ORTOFOTO	1989- 2000- 2006-2010	1989- 2000- 2006-2010	1989- 2000- 2006-2010
DTM	2000-2010	2000-2010	2000-2010

Fig.1. Tabella riassuntiva dei rilievi effettuati e dei dati d'archivio disponibili per i tre ghiacciai.

Attualmente è anche in corso la compilazione di un database informatico sui ghiacciai nel quale vengono raccolti i dati inerenti la morfologia e l'estensione attuale dei ghiacciai delle Alpi Occidentali italiane, sul modello del catasto dei ghiacciai italiani del Comitato Glaciologico Italiano (1961). Si è sperimentato soprattutto l'utilizzo della fotogrammetria digitale (Carletti, 2007) per lo studio multi-temporale dei ghiacciai, sia dal punto di vista qualitativo, (tramite osservazioni geomorfologiche in stereoscopia di voli aerei di anni diversi), sia quantitativo, realizzando modelli digitali del terreno (DTM) ed ortofoto.

Le tecnologie di telerilevamento e fotogrammetria digitale consentono una veloce gestione dei dati ed un approccio multidisciplinare ai fenomeni (Perotti *et al.*, 2005), richiesto soprattutto in ambito glaciologico e per l'analisi dei processi di deglaciazione e dei dissesti che avvengono sul territorio (Chiarle & Mortara, 2001).

L'areale di studio interessa tre ghiacciai del Piemonte occidentale: il Ghiacciaio della Capra (Ceresole Reale, alta Valle Orco), il Ghiacciaio di Ciardoney (Ronco Canavese, Valle Soana), e il ghiacciaio del Mulinet (Forno Alpi Graie, Lanzo Valli di Lanzo), scelti per l'accessibilità e per la disponibilità di dati storici significativi. Nella figura seguente (fig.2) sono illustrati i siti di studio e le tecniche impiegate per ciascuno di essi.

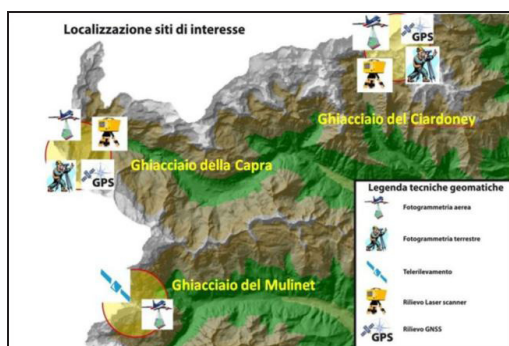


Fig. 2. I siti di studio e le tecniche impiegate.

Oltre alle analisi dei dati ricavati con tecniche di telerilevamento, indispensabili soprattutto a vasta scala e in particolare nelle aree meno accessibili, sono state realizzate delle campagne di rilevamento GNSS al fine di ottenere dei profili topografici trasversali delle aree proglaciali.

La tecnica del GNSS ha reso possibile la ricostruzione della superficie glaciale del bacino di ablazione del Gh. Ciardoney e l'analisi delle variazioni nel tempo della posizione della fronte; inoltre sono stati realizzati dei profili trasversali sul Gh. della Capra.

La tecnica della fotogrammetria aerea è stata impiegata per la sua idoneità in studi a carattere multitemporale e per la possibilità di indagare areali sufficientemente estesi, mentre il GNSS è stato adottato in funzione della sua utilità nell'ambito del monitoraggio di specifiche situazioni di rischio. In particolare, la fotogrammetria aerea ha consentito la realizzazione di prodotti cartografici tematici di dettaglio quali mappe delle variazioni planimetriche della fronte glaciale e delle variazioni altimetriche delle superfici nel tempo (Gh. Ciardoney).

L'analisi geomorfologica ha permesso di identificare ed analizzare dal punto di vista qualitativo le aree a potenziale rischio glaciale, mentre l'utilizzo di metodologie geomatiche ha fornito un quadro qualitativo e quantitativo articolato delle variazioni occorse negli ultimi anni in tali aree.

### **Il caso del Ghiacciaio di Ciardoney: triangolazione multi temporale di fotogrammi aerei**

Il Gh. di Ciardoney è situato nel comune di Ronco Canavese, in alta Valle Soana. Si tratta di un ghiacciaio collocato in un'area piuttosto inaccessibile e soggetta a fenomeni di crollo.

La metodologia adottata nel corso del presente studio si basa sull'utilizzo di fotogrammi aerei digitali ortorettificati per l'estrazione di tematismi per la caratterizzazione topografica e geomorfologica del territorio a scala regionale. A scala locale sono stati estratti dei *Digital Surface Model* DSM da voli di anni diversi per il confronto multi-temporale delle superfici e dei volumi.

I fotogrammi aerei storici rappresentano il dato indispensabile per realizzare una ricostruzione multi-temporale completa dell'evoluzione del ghiacciaio negli ultimi cinquant'anni e sono stati reperiti presso l'aerofototeca del CNR-IRPI di Torino. I fotogrammi cartacei sono stati digitalizzati e le varie fasi di orientamento e restituzione sono state condotte all'interno dell'ambiente ERDAS tramite il *software Leica Photogrammetric Suite 9.1* (LPS).

Il recupero di dati fotogrammetrici storici comporta spesso dei problemi: da una parte la scarsa qualità dei fotogrammi stessi (spesso scarsamente conservati), dall'altra la mancanza di informazioni riguardanti le camere fotogrammetriche con le quali sono stati acquisiti gli stessi. Queste carenze possono rappresentare un ostacolo per l'utilizzo a fini metrici delle immagini, rendendo impossibile (o quasi) utilizzarle nel processo fotogrammetrico classico o procedere ad una loro ortorettifica. Il problema può essere affrontato con le moderne tecniche di fotogrammetria digitale, utilizzando procedure di autocalibrazione ed applicando metodi di triangolazione aerea multi-temporale con punti di appoggio ricavati dall'analisi del territorio attuale (Bitelli *et al.*, 2006). I punti di appoggio sono stati individuati su ortofoto aeree reperite dal Portale Cartografico Nazionale del Ministero dell'Ambiente ([www.pcn.minambiente.it](http://www.pcn.minambiente.it)) alla scala nominale 1:10.000 (1 m di risoluzione geometrica). Per l'acquisizione del dato altimetrico è stato utilizzato un modello digitale del terreno fornito dalla Regione Piemonte con celle di dimensioni 5x5 metri avente una precisione (stimata da capitolato) intorno ai 60 cm. Il livello di precisione raggiungibile nel confronto geometrico di situazioni multi-temporali in evoluzione, basato sull'utilizzo di tecniche di fotogrammetria digitale, è dimostrato essere accresciuto attraverso una triangolazione aerea (TA) alla quale partecipino, in modo congiunto, tutti i fotogrammi costituenti i blocchi relativi ai diversi periodi presi in considerazione all'interno della serie multitemporale (Borgogno Mondino & Godone, 2007).

I risultati ottenuti evidenziano come un approccio di TA multi-temporale, determini un apprezzabile incremento della precisione relativa dei blocchi da confrontare (Borgogno Mondino & Godone, 2007). Sulla base delle indicazioni provenienti dalle prove, si è poi adottata la procedura di TA multi-temporale per la produzione, mediante procedura automatica, di DSM relativi alla sola area del ghiacciaio. I DSM sono successivamente stati confrontati per differenza matriciale al fine di produrre una carta di variazioni altimetriche incorse nel periodo di riferimento 1975-2010. Nel corso del 2012 è stato poi effettuato un rilievo GNSS della superficie del ghiacciaio (fig. 3) dal quale si è ottenuto un DEM, che è possibile confrontare con il DEM 2010.

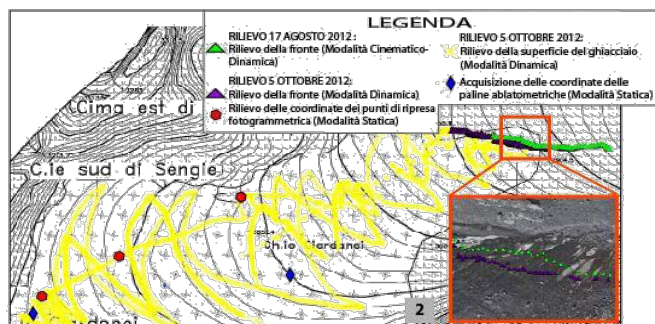


Fig. 3. Mappa dei rilievi GNSS effettuati sul ghiacciaio del Ciardoney nel corso del 2012.

I DSM sono stati prodotti con passo di 5 m, considerando le precisioni stimate per la planimetria. Per ottenere un modello coerente in ciascun punto sono stati utilizzate le immagini “quality”, create contemporaneamente al DEM, e creata successivamente una maschera di valori, escludendo le aree di scarsa coerenza, e salvando soltanto i valori di coerenza eccellente e buona. Successivamente viene ricavata una griglia di punti quotati dal DEM e interpolato in ambiente GIS.

I calcoli sulle variazioni altimetriche della superficie del ghiacciaio sono stati effettuati sottraendo al DEM relativo all’anno più vecchio con il DEM riferito all’anno immediatamente più recente. Questo criterio è stato adottato per rendere più comprensibile e lineare una ricostruzione dell’evoluzione del ghiacciaio nell’ultimo cinquantennio. Sono state prodotte delle mappe di variazione per ciascun intervallo di tempo considerato (come visibile in fig.4).

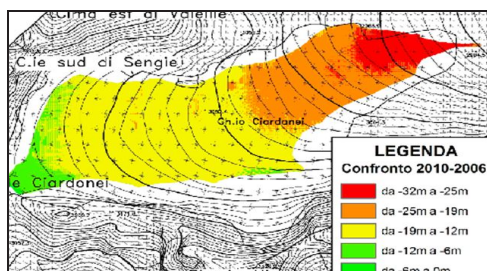


Figura 4. Esempio di carta di confronto fra DTM di anni diversi (2010-2006). In rosso risultano evidenziate le maggiori perdite di spessore delle masse glaciali. Scala 1:10000.

Infine utilizzando la visione stereoscopica sono state realizzate delle carte delle variazioni frontali del ghiacciaio negli ultimi decenni (fig.5).

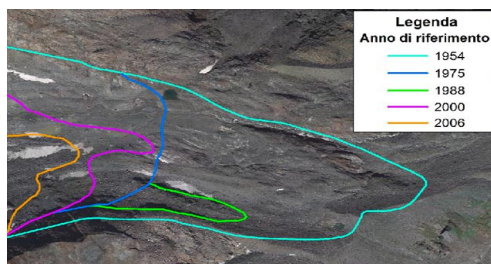


Figura 5. Carta delle variazioni multi temporali della fronte del ghiacciaio alla scala 1:5.000.

## Il ghiacciaio della Capra (applicazione della tecnica GNSS)



Al fine di studiare le variazioni topografiche di settori ipoteticamente stabili, sono stati realizzati dei profili trasversali (fig. 6) delle aree proglaciali, ortogonalmente alla direzione di flusso delle acque di fusione glaciale.

La realizzazione di profili con l'utilizzo del GNSS in modalità cinematica consiste nel tenere fisso uno dei due ricevitori (*base*) e nel trasportare il secondo (*rover*) lungo un percorso muovendosi con continuità (Cina, 2001).

I profili in questione sono state eseguiti nel corso delle stagioni estive 2011, 2012, 2013 per poter effettuare dei confronti.

*Figura 6. Le tracce del GPS cinematico effettuate durante i sopralluoghi estivi (anni 2011-2012-2013) nella porzione frontale del Ghiacciaio della Capra. Il punto rosso indica il posizionamento della stazione fissa. Scala 1:10000).*

Tramite il software Topcon Tools è stato eseguito il post-processamento dei dati e stimato l'errore per ciascun rilievo, che risulta in linea teorica inferiore al metro. Tuttavia per la presenza di massi e forti pendenze e irregolarità del terreno, tale valore è maggiore.

## Conclusioni

L'obiettivo generale della ricerca, era quello di dimostrare come la precisione relativa raggiungibile tra i blocchi fotogrammetrici sia poco influenzata dall'utilizzo, in sede di orientamento esterno, di punti di appoggio di qualità mediocre (e comunque inferiore a quella che rigorosamente andrebbe auspicata), come quelli derivabili da ortofoto aeree e Modelli Digitali del Terreno. Non essendo disponibili dati derivati da campagne GPS, è stato necessario reperire, in fase di orientamento dei fotogrammi, dei punti di appoggio a terra. L'acquisizione di tali punti si è presentata alquanto complessa a causa degli scarsi punti di riferimento presenti sull'area e della qualità digitale dei fotogrammi. La porzione di territorio presa in esame è, infatti, un'area montuosa scarsamente antropizzata e quindi con una presenza limitata di punti di riferimento quali strade ed edifici, presenti quasi esclusivamente in corrispondenza del fondovalle. Per porre rimedio a questo inconveniente si sono acquisiti punti anche nei versanti in roccia molto acclivi, evitando naturalmente i settori soggetti a copertura nevosa e le zone in ombra presenti in alcuni fotogrammi.

L'acquisizione dei punti di controllo è risultata più efficace quando i punti di appoggio utilizzati sono comuni a tutti i fotogrammi partecipanti alla triangolazione aerea. Secondo questo approccio, i fotogrammi appartenenti a tutti i blocchi che partecipano alla serie storica da trattare, vengono orientati all'interno di un'unica triangolazione aerea intesa ad irrigidire la dipendenza e ad accrescere l'omologia dei modelli stereoscopici finali. Per quanto riguarda i punti di legame, per il lavoro proposto è stato verificato che essi risultano necessari per fotogrammi coevi e sequenziali appartenenti allo stesso blocco cronologico, ma che punti di legame trasversali tra i diversi blocchi di periodi diversi, non incidono sensibilmente sugli errori complessivi del modello. Secondo questo approccio i parametri di Orientamento Esterno di tutti i fotogrammi sono stati stimati in unica triangolazione aerea, assorbendo in gran parte gli errori relativi. È stato perciò possibile, in sintesi, migliorare le precisioni relative di blocchi fotogrammetrici di periodi diversi.

I risultati applicativi della metodologia di indagine fotogrammetrica multi-temporale proposta appaiono interessanti anche in funzione di ulteriori sviluppi della ricerca nei settori alpini recentemente deglacializzati. Tramite una loro integrazione con i dati eventualmente raccolti da campagne di rilevamento GPS, in futuro si potrebbe sviluppare lo studio delle variazioni



dell'altimetria e del campo di velocità della superficie e delle fluttuazioni frontali dei ghiacciai dal termine della Piccola Età Glaciale.

Infine, la realizzazione di profili tramite GPS in modalità cinematica fornisce la possibilità di confrontare e verificare le variazioni di quota e topografiche di settori ipoteticamente stabili.

### **Riferimenti bibliografici**

Bertotto S., Fioraso G., Giardino M., Nigrelli G., Perotti L. (2011), "Effetti del cambiamento climatico sui ghiacciai delle alpi occidentali. Rischi associati e nuove metodologie d'indagine." Atti, vol. *Le modificazioni climatiche e i rischi naturali*. Maurizio Polemio (ed.). CNR IRPI, 109 - 112.

Bitelli G., Gatta G., Giorgini G., Minghetti A., Mogol A., Paselli E. (2006), *Recupero a fini metrici di fotogrammi aerei storici per lo studio delle dinamiche territoriali in ambito urbano: un caso di studio*, Atti X Conferenza Nazionale ASITA, Bolzano.

Borgogno Mondino E., Godone D. (2007), *Considerazioni sulla triangolazione aerea multitemporale per l'analisi di fenomeni in evoluzione: il caso del Ghiacciaio del Belvedere (Monte Rosa, SIFET 2007 National Congress, Arezzo (Italy), Proceedings on CD-ROM*.

Chiarle M., Mortara G. (2001) - "Esempi di rimodellamento di apparati morenici nell'arco alpino Italiano". *Suppl. Geogr. Fis. Din. Quat.*, V, 41-54.

Chiarle M., Mortara G. (2007) - "Modificazioni nell'ambiente fisico d'alta montagna e rischi naturali in relazione ai cambiamenti climatici". In: Carli B., Cavarretta G., Colacino M., Fuzzi S. (a cura di) - *Clima e cambiamenti climatici*. Le attività di ricerca del CNR. Consiglio nazionale delle ricerche, 757-760.

Cina A. (2001) - *GPS, Principi, modalità e tecniche di posizionamento*". CELID, Torino, 216 pp.

Comitato Glaciologico Italiano (1961) - *Catasto dei ghiacciai italiani*. Volume II Ghiacciai del Piemonte, 324 pp.

Didier R., Gay M. (eds) (2003) - *Survey and prevention of extreme glaciological hazards in European mountainous regions*, Glaciorisk report, <http://glaciorisk.granoble.cemagref.fr>. Pdf edition; 470 pp.

Dutto F., Mortara G. (1992) - "Rischi connessi con la dinamica glaciale". *Geogr. Fis. Din. Quat.*, v.15, 85-99.

Gomasasca M. (2004): *Elementi di Geomatica*, Associazione Italiana di Telerilevamento, ISBN 88-900943-7-0 44136

IPCC (2007) - *Climate change 2007, 4th assessment report*. Working group I - Report "The physical science basis", 987 pp.