

# L'USO COMBINATO DI FOTOGRAMMETRIA DIGITALE TERRESTRE, LASER SCANNER, TECNICHE TOPOGRAFICHE TRADIZIONALI E GNSS PER L'ANALISI DELLA DINAMICA GRAVITATIVA DI VERSANTE: IL CASO DELL'ORIONDÉ (CERVINO, VALLE D'AOSTA)

Luigi PEROTTI (\*), Marco GIARDINO (\*), Walter ALBERTO (\*),  
Davide MARTELLI (\*\*), Andrea TAMBURINI (\*\*)

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

(\*\*) IMAGEO s.r.l. , Spin-off dell'Università di Torino, imageo@unito.it

## Riassunto

L'accelerazione dei processi di instabilità naturale verificatisi in tempi recenti per effetto di cambiamenti climatici impone particolare attenzione ai problemi di sicurezza dell'ambiente montano ad alta frequentazione turistica e suggerisce approcci innovativi su cui basare l'analisi del rischio: ad esempio, integrando monitoraggi locali tecnologicamente avanzati (fotogrammetria digitale, GNSS e Laser Scanner) con dati GIS a carattere regionale.

Al fine di studiare l'evoluzione nel tempo della dinamica gravitativa dei versanti Alpini valdostani, sono state svolte alcune campagne di rilevamento morfostrutturale sulle pareti rocciose del Cervino, mediante l'utilizzo di tecnologie innovative di rilievo. Il lavoro è stato svolto affiancando tecniche innovative ai tradizionali rilievi geomorfologici e geologico-strutturali, utili per evidenziare come i fenomeni di crollo dalle pareti rocciose siano strettamente dipendenti, da un lato, dalle caratteristiche geologiche intrinseche dell'ammasso e, dall'altro, siano in grado di condizionare profondamente l'evoluzione morfologica del rilievo.

## Abstract

The acceleration of the natural instability processes taken place in recent times for effect of the climatic changes, imposes special caution to the problems of safety into high tourist frequentation environment, and suggests innovative approaches on which basing the risk analysis: as an example, integrating local monitorings (photogrammetry, GNSS and Laser Scanner) with regional GIS data.

In order to study the evolution of the gravitativ dynamics of the Valle d'Aosta Alpine landscape, some geomatics campaigns has been carried out with morfo-structural survey on the rocks walls of the Matterhorn. The job has been carried out supporting the geomatics survey with to the traditional geomorphological and geo-structural ones, useful in order to evidence the landslide phenomena induced on one side from the intrinsic geological characteristics of the heap and, from the other side, they are in a position to deeply conditioning the morphologic evolution of the relief.

## Introduzione

Per dare nuovo impulso alla ricerca nell'ambito della caratterizzazione morfostrutturale degli ammassi rocciosi è stata sperimentata la scansione Laser Scanner del versante roccioso della parte bassa del versante italiano del Cervino: è stata condotta una campagna di riprese fotogrammetriche digitali con camera calibrata, ed il loro orientamento attraverso appositi *software*. L'intero rilievo è stato appoggiato alla cartografia di base grazie ad una rete di inquadramento creata sulla base di rilievi GNSS/Topografici. Tutto ciò al fine di indagare in modo rapido ed il più possibile preciso l'andamento delle discontinuità dell'ammasso roccioso. L'individuazione delle principali fratture è

avvenuta sia mediante analisi geometrica delle immagini tridimensionali derivanti dalle scansioni, sia mediante restituzione delle immagini digitali in stereoscopia ed ovviamente anche attraverso i rilievi diretti in parete. Ciò ha permesso di ricavare una notevole quantità di dati sull'assetto morfologico dei versanti rocciosi e sullo stato di fratturazione degli stessi, senza dover accedere direttamente alle aree di indagine.

### Area di Studio

Il Monte Cervino (o Matterhorn per gli svizzeri) è ubicato nel settore centrale della Valle d'Aosta, dal punto di vista strutturale l'area in esame è costituita da tre unità tettoniche principali sovrapposte per effetto piani di taglio a basso angolo (Figura 1). La forma del rilievo è invece profondamente condizionata dalla azione morfogenetica glaciale pleistocenica, per effetto della quale il Cervino ha assunto la forma residuale di picco glaciale. Le forme risultanti appaiono profondamente condizionate dalle proprietà litotecniche delle unità che costituiscono l'ammasso roccioso. Nell'area interessata dallo studio, le rocce sono prevalentemente di tipo granitico e metamorfico (Falda Austroalpina della Dent Blanche), quindi molto resistenti e scarsamente erodibili; ne risulta una morfologia glaciale molto aspra e articolata. L'attuale modellamento dei versanti è prevalentemente imputabile all'azione del gelo-disgelo con fenomeni di tipo gravitativo/detritico.

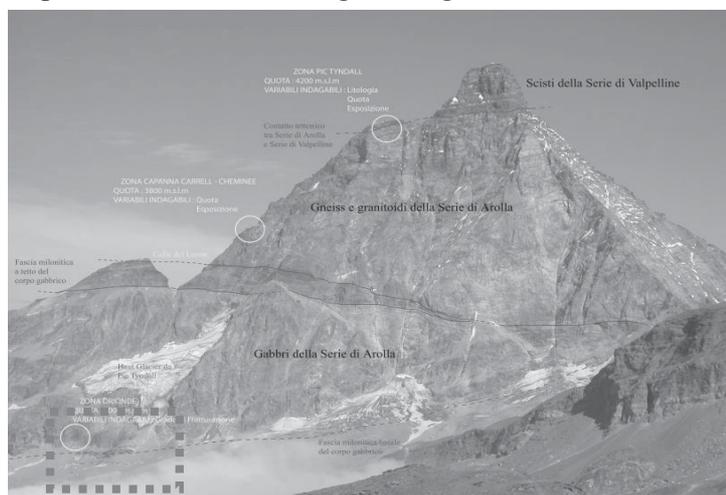


Figura 1. Panorama del Cervino e schema dell'organizzazione del progetto, in blu l'area di studio.

sugli ammassi rocciosi circostanti, è una profonda variazione del loro regime termico e del loro campo di stress (Wegmann et al, 1998). A seconda dell'orientazione della parete e del contesto topografico, l'esposizione alle condizioni atmosferiche favorisce la penetrazione di fronti di congelamento con conseguente formazione di ghiaccio all'interno delle discontinuità. L'instaurarsi di queste nuove condizioni, in ammassi precedentemente "temperati", genera una accelerazione dei processi distruttivi ed una generale instabilità.

### Il Lavoro di Terreno

In seguito ai numerosi crolli verificatisi sul Cervino durante l'estate del 2003, si sono avviati numerosi programmi di monitoraggio delle pareti rocciose del Cervino nei pressi di Capanna Carrel, 3830 m s.l.m.

Il presente studio si è articolato in attività di terreno con rilievi diretti in parete per inquadrare a livello regionale le famiglie di discontinuità, analisi morfostrutturali di dettaglio in alcune stazioni, atte a definire con precisione il grado di fratturazione e di stabilità dell'ammasso roccioso (con analisi della stabilità), rilievo fotogrammetrici digitali e scansioni Laser terrestri (Figura 2), a titolo di confronto fra metodologie tradizionali ed innovative.

### Dinamica Post-Glaciale

Il ritiro delle masse glaciali in conseguenza al riscaldamento globale genera da un lato la decompressione locale dei versanti e dall'altro favorisce lo sviluppo del *permafrost* in quei settori precedentemente "protetti" dalla presenza dei ghiacciai i quali solitamente presentano temperature, all'interfaccia ghiaccio-roccia, prossime a quella di fusione (Haeberli et al., 1997). Il ritiro areale dei ghiacciai alpini negli ultimi 100-150 anni viene valutato intorno al 45% (Orombelli et al., 2004) con perdite di spessore che in alcuni casi arrivano a superare i 100 metri; la conseguenza di questo abbassamento,



Laser Scanner in azione.

L'individuazione delle principali fratture è avvenuta sia mediante rilievo diretto in parete (Figura 3), sia mediante l'analisi geometrica delle nuvole derivanti dalle scansioni Laser, e sia mediante restituzione delle immagini digitali in stereoscopia.



Figura 3. Fasi del rilievo in parete Oriondè (Pogliotti, 2006).

È stato necessario eseguire un lavoro di inquadramento topografico/cartografico in modo tale da inserire i singoli rilievi in un unico sistema cartesiano di riferimento.

Le fasi di lavoro possono essere così riassunte:

- creazione di capisaldi del rilievo;
- campagna GNSS di acquisizione coordinate dei capisaldi;
- campagna di acquisizione scansioni Laser terrestri a partire dai capisaldi;
- rilievo topografico di appoggio con apertura a terra e celerimetrico in parete;
- campagna fotogrammetrica di acquisizione prese da terra;
- creazione monografie dei punti;
- orientamento fotogrammi digitali;
- restituzione ed analisi dati fotogrammetrici;
- allineamento e georeferenziazione dati Laser Scanner a partire anche dalle prese fotogrammetriche;
- restituzione ed analisi dati Laser.

### Rete di Inquadramento

La porzione di versante esaminato è ubicato nel settore sud del Cervino nella porzione mediana del rilievo, ha un'estensione di circa 600 m in altezza e 300 m in larghezza e si presenta notevolmente articolata dal punto di vista morfologico.

In primo luogo sono state acquisite le coordinate assolute di 3 punti alla base della parete (Figura 4). E' stata fatta una campagna GNSS differenziale doppia frequenza in modalità *fast-static* con strumentazione Topcon HyperPro GPS+GLONASS, fissando i punti con chiodi nella roccia in posto ben individuabili e da cui sono state anche eseguite le misure Laser Scanner. Il post-processamento dei dati acquisiti ha comportato una fase di compensazione degli stessi, facendo riferimento ai dati di alcune stazioni GPS Master fisse presenti nell'arco alpino occidentale. Collegandosi a questi punti, è stato possibile progettare ed eseguire l'operazione di appoggio per la fotogrammetria e per la georeferenziazione dei dati Laser.

Mediante l'utilizzo di una Stazione Totale, è stata realizzata l'acquisizione delle mire misurando alcuni punti in parete, ben riconoscibili morfologicamente, per la collimazione dei fotogrammi nelle applicazioni fotogrammetriche (Figura 5).

Per quanto riguarda l'allineamento delle scansioni Laser è stato previsto l'utilizzo dei tre capisaldi GNSS acquisiti per posizionare i punti di presa a causa dell'impossibilità di sistemare direttamente le mire riflettenti in parete. Dopo la fase di orientamento fotogrammetrico comunque è stato possibile restituire in stereoscopia i punti per l'allineamento delle scansioni Laser. Per ogni punto battuto è stata realizzata una monografia fotografica completa che permetterà in futuro l'appoggio dei rilievi successivi.

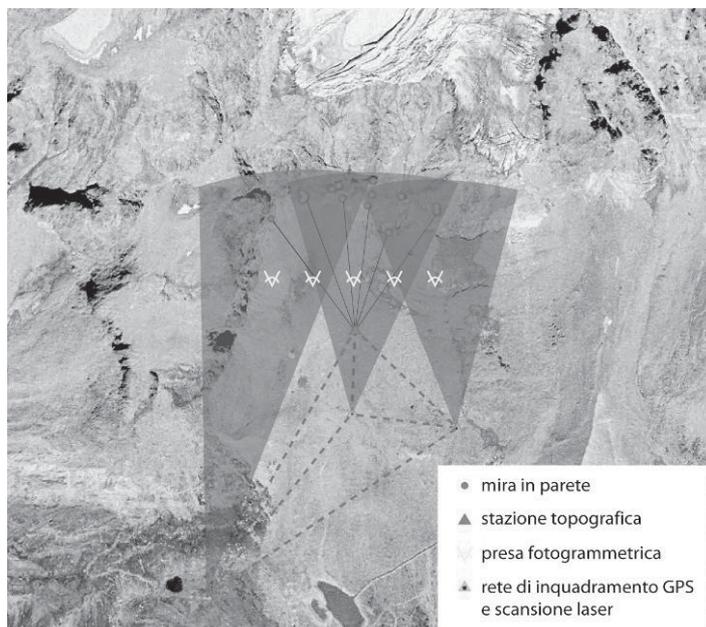


Figura 4. Geometrie dei rilievi e delle scansioni Laser sulla parete.

### Rilievo fotogrammetrico

La fotogrammetria digitale da terra ha consentito di effettuare misure geometriche sulle pareti attraverso una ricostruzione stereoscopica delle stesse ottenuta sfruttando il concetto di stereoscopia propria del processo visivo umano. Per il rilievo è stata utilizzata una camera non-metrica con obiettivo calibrato modello Nikon D70s con sensore da 6 milioni di pixel e ottica da 24mm. Il progetto del rilievo ha previsto la realizzazione di 5 prese con un rapporto B/H di 1/3 per avere il massimo rigore fotogrammetrico compatibilmente con l'ambiente di lavoro. Sono state effettuate prese fotogrammetriche inclinate al versante indagato (circa 18°), con distanza tra i punti di presa corrispondente a circa 50 m (un terzo della distanza punto di presa-parete), che è stata mantenuta invariata in tutte le prese.

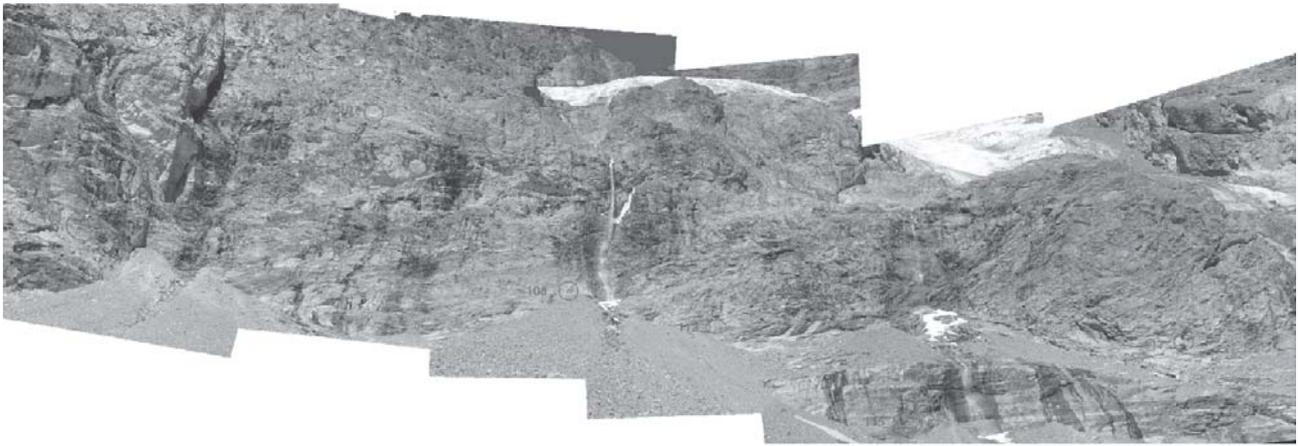


Figura 5. Localizzazione dei punti sul versante per la collimazione delle immagini.

La fase di orientamento è stata al momento eseguita su una coppia di fotogrammi. I risultati dell'orientamento "relativo-assoluto", condotto con il software "Z-glif", sono del tutto soddisfacenti: gli scarti sui punti d'appoggio utilizzati per l'assoluto sono dell'ordine dei 30 cm considerando le prese inclinate (Figura 6). A causa della distanza di scatto (oltre 200 m) e alla risoluzione della camera (6 Mpixel) non è stato possibile identificare particolari di dettaglio. Si può però constatare che l'analisi delle discontinuità strutturali e delle caratteristiche geomorfologiche della parete è facilitata dalla possibilità offerta dalla fotogrammetria digitale terrestre di esaminare l'oggetto in modalità stereoscopica. I presupposti del progetto erano di poter sviluppare e collaudare un metodo di raccolta dati veloce ed economico, quindi si è optato per una camera commerciale digitale e per un software fotogrammetrico come Z-Glif (che utilizza una visione anaglifica solo per coppie stereo) ma che risulta avere comunque un motore fotogrammetrico professionale. La restituzione anaglifica delle fratture individuate ha consentito di estrapolare ed analizzare un'ampia gamma di informazioni sulla geometria delle discontinuità dell'ammasso roccioso da confrontare poi con il dato Laser.

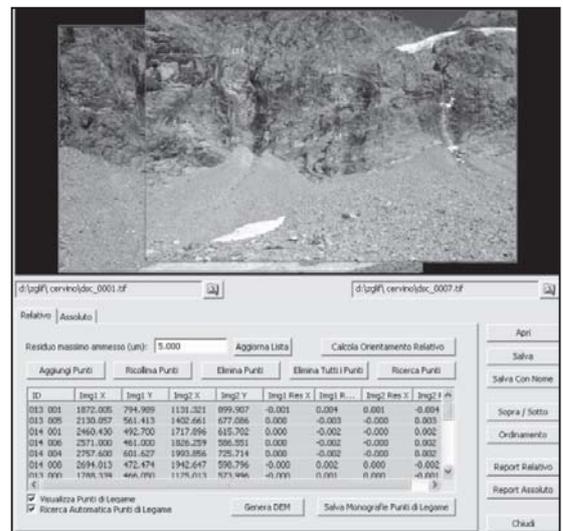
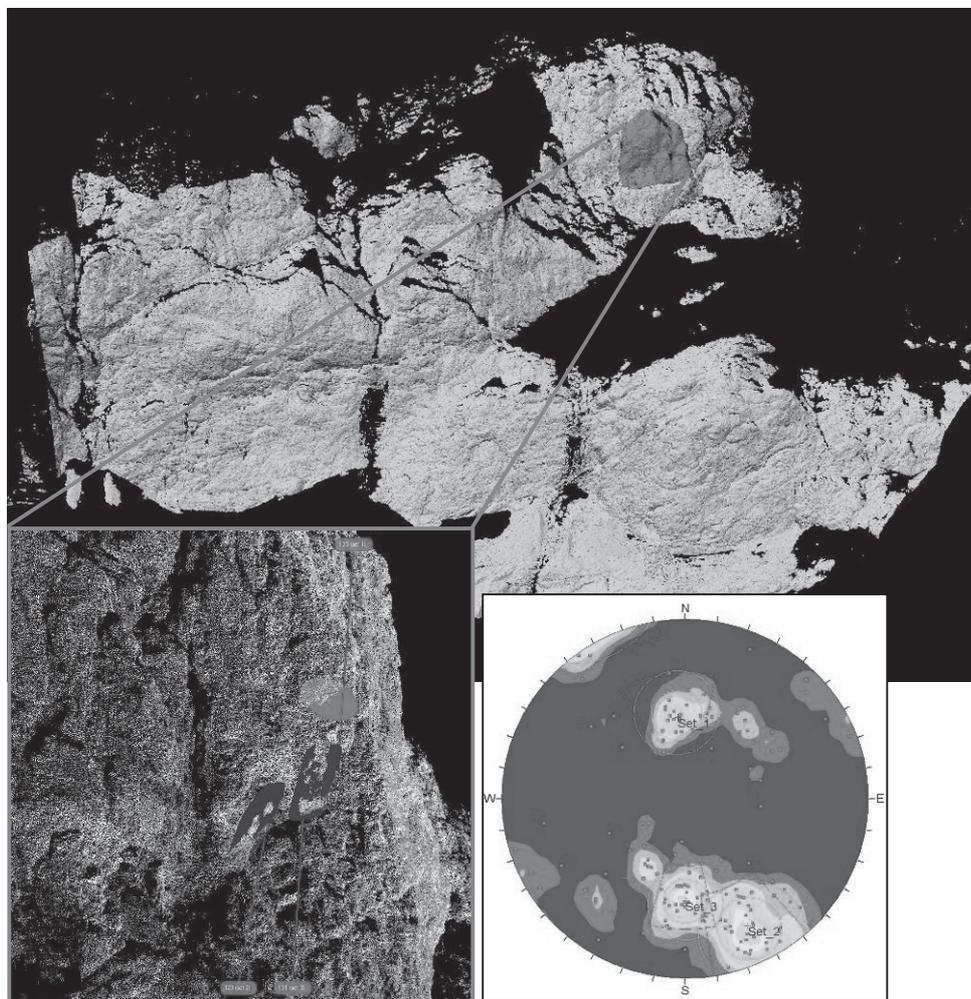


Figura 6. Procedura di Orientamento fotogrammetrico relativo-assoluto.

### Rilievo laser

La scansione della parete rocciosa effettuata con Laser Scanner OPTECH Iliris 3D ha permesso di ottenere una nuvola di punti in grado di rappresentare tridimensionalmente la geometria del versante (Figura 7).



*Figura 7. A partire dall'immagine solida prodotta da LSR (in alto, vista complessiva), selezione dei piani di discontinuità (dettaglio in basso a sinistra, i colori rosso e blu rappresentano rispettivamente la superficie superiore ed inferiore di ciascun piano) con individuazione automatica dei valori di immersione ed inclinazione proiettati sul diagramma strutturale (emisfero inferiore) in basso a destra.*

Sono state realizzate tre scansioni del versante da diverse posizioni e successivamente orientate attraverso le coordinate dei punti di stazione (note dal rilievo GPS) e da specifiche monografie create ad hoc dalla restituzione foto-

grammetrica. In questo modo, senza l'utilizzo di mire riflettenti in parete, è stato possibile georiferire l'intero rilievo del versante. L'acquisizione prevede anche la presa calibrata contemporanea di fotogrammi digitali con una camera interna di bassa qualità radiometrica. Si è preferito ricorrere all'analisi della nuvola di punti drappeggiata artificialmente e di utilizzare direttamente le prese orientate fotogrammetriche attraverso la rototraslazione tra i sistemi di riferimento del Laser e della camera collimando manualmente i punti corrispondenti individuati sulla nuvola di punti. Questa operazione ha consentito di sovrapporre alla nuvola di punti un'immagine della parete. Tramite il software Polyworks è stato quindi possibile, mediante una macro creata appositamente, ricavare direttamente coordinate di punti, distanze e giaciture di piani.

### Considerazioni conclusive

L'applicazione di tecnologie innovative quali la fotogrammetria digitale terrestre ed il Laser Scanner per lo studio delle condizioni di fratturazione e della stabilità dei versanti rocciosi alle alte quote nella zona dell'Oriondè (Cervino) ha rivelato pregi e limiti delle due tecniche. Nel corso della ricerca è stata messa a punto una metodologia di lavoro sul terreno in grado di restituire dati sulla morfologia della parete senza necessità di raggiungere la parete stessa per misure e posizionamento di mire riflettenti; è stata inoltre posta particolare attenzione alla fase di trattamento dei dati per la quale sono stati testati diversi software. I primi test svolti rivelano come la fotogrammetria consenta

di individuare visivamente le discontinuità morfologiche sul versante ma la precisione del dato dipenda dall'accuratezza in fase di restituzione legata alla distanza di presa ed ovviamente alla qualità fotografica utilizzata; inoltre vi sono limiti nella precisione e nel posizionamento dei punti di presa, in particolare in ambiente montano. La scansione Laser, al contrario, può dare ottimi risultati nell'analisi di porzioni di versante anche ampie, indipendentemente dai punti di presa (scelti a discrezione dell'operatore in funzione delle possibilità logistiche). La messa a punto, l'applicazione e la verifica delle metodologie innovative proposte per l'analisi morfostrutturale risultano molto utili per garantire un approccio "completo" all'analisi dei fenomeni gravitativi di versante a differente scala, qualitativo e quantitativo, sia in senso temporale (infra-pluriannuali) che spaziale (dalla singola parete all'intero massiccio). In conclusione si evidenzia la complementarità delle tecniche tra la fotogrammetria, dalla quale si può estrarre un'informazione d'insieme, e il Laser Scanner, con il quale si può entrare in maggior dettaglio riservando a quest'ultimo la scansione delle porzioni di interesse per l'estrazione di informazioni geometriche di maggior dettaglio.

### **Riferimenti Bibliografici**

- Bornaz L., Dequal S. (2003), "*L'immagine solida: un concetto innovativo e le sue applicazioni*", ASITA 2003.
- Bornaz L., Rinaudo F. (2004), "*terrestrial laser scanner data processing*", Proceedings of XX ISPRS Congress.
- Giardino M, Chiuminatto D., Perotti L., Marenchino D., (2006) *Fotogrammetria Digitale Terrestre per l'analisi della dinamica gravitativa di versante: Il caso del bacino del Miage*. ASITA 2006.
- Haeberli W., Wegmann M. & Muhll D.V. (1997), "*Slope stability problem related to glacier shrinkage and permafrost degradation in the Alps*". *Eclogae geol. Helv.*, 90, 407-414.
- Orombelli G., Tanzi G. & Ravazzi C. (2004), "*Glacier extent over the Italian Alps during the HCO*". In: *Climex Maps Italy, Litho-Palaeoenvironmental Maps of Italy during the Last Two Climatic Extremis*, Explanatory notes.
- Pogliotti P. (2006), "*Analisi morfostrutturale e caratterizzazione termica di ammassi rocciosi recentemente deglaciati*". Tesi di laurea inedita, Università di Torino, 191 pp.
- Wegmann M., Gudmundsson G.H. & Haeberli W. (1998), "*Permafrost changes in Rock Wall and the Retreat of Alpine Glaciers: a Thermal Modelling Approach*". *Permafrost Perigl. Process.*, 9, 23-33.