

# L'UTILIZZO DI IMMAGINI STEREO SCOPICHE IKONOS PER IL MONITORAGGIO VOLUMETRICO DEI GHIACCIAI LOMBARDI: RISULTATI SUI COMPRESORI GLACIALI INVESTIGATI E VALIDAZIONE CON RILIEVO GPS-RTK

Dario BELLINGERI (\*), Marco BELO' (\*\*\*), Enrico ZINI (\*), Luigi BONETTI (\*\*), Stefano URBANI (\*\*)

(\* ARPA Lombardia – Settore Sistemi Informativi Ambientali, Viale Restelli 3/1, 20124 Milano, tel. 02 69666320, fax 02 69666259, [d.bellingeri@arpalombardia.it](mailto:d.bellingeri@arpalombardia.it)

(\*\*) ARPA Lombardia, Centro Nivometeorologico di Bormio

(\*\*\*) Trimble Italia S.r.l.

## Riassunto

Vengono qui presentati i risultati del monitoraggio planimetrico e volumetrico dei ghiacciai lombardi con l'utilizzo di immagini satellitari stereoscopiche ad alta risoluzione, con metodologia sviluppata in ARPA Lombardia ed applicata a diversi comprensori glaciali dal 2003. Inoltre, si presentano i risultati di una validazione del metodo di ricostruzione dei modelli digitali del terreno, con una stima degli errori sulla base di un rilievo GPS in modalità RTK effettuato sul Ghiacciaio Alpe Sud.

## Abstract

The results from planimetric and volumetric monitoring of glaciers in Lombardy, using high resolution stereoscopic satellite images, are presented. The methodology, developed in ARPA Lombardia, has been applied over different glacial areas from 2003. Furthermore, a validation test of DTM reconstruction has been conducted, based upon a GPS-RTK field campaign.

## Introduzione

Il Settore Sistemi Informativi Ambientali di ARPA Lombardia ha sviluppato metodologie operative di monitoraggio volumetrico dei ghiacciai con l'utilizzo di immagini satellitari stereoscopiche IKONOS.

Le principali applicazioni di questo tipo di attività sono la valutazione degli impatti a scala locale del cambiamento climatico sui ghiacciai lombardi, e la stima del contributo della fusione glaciale al ciclo idrologico, con un approccio parallelo e complementare rispetto alle tradizionali metodologie di analisi glaciologica di campo.

La conoscenza approfondita e aggiornata dell'ambiente glaciale e delle sue variazioni recenti è necessaria anche al fine dell'impostazione di adeguate politiche di adattamento ai cambiamenti climatici, in particolare per la gestione della risorsa idrica.

## Sintesi dei risultati sui comprensori glaciali investigati

Le immagini satellitari IKONOS, acquisite su diversi comprensori glaciali lombardi negli anni recenti, hanno permesso, grazie all'elevata risoluzione geometrica, un'accurata valutazione delle variazioni lineari e areali dei corpi glaciali. Inoltre, sfruttando le riprese stereoscopiche e quindi la possibilità di ricostruire i modelli digitali del terreno, è stato possibile valutare le variazioni di spessore e stimare le variazioni volumetriche, sia tramite confronto con cartografia storica che con riprese IKONOS ripetute.

Le aree investigate, con riprese estive effettuate nel 2003, 2004 e 2006, sono stati i comprensori glaciali situati in alta Valtellina (Alta Valfurva, M. Confinale, M. Sobretta) e sul gruppo del Bernina.

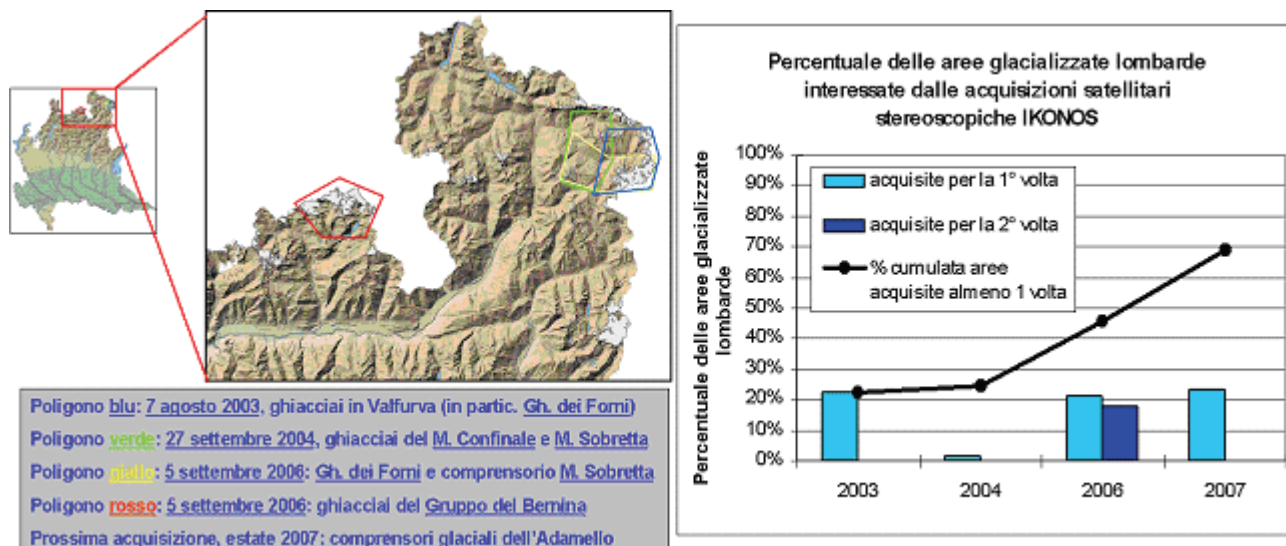


Figura 1: Aree riprese con acquisizioni programmate di immagini IKONOS stereoscopiche e statistiche relative alle percentuali di aree glaciali lombarde interessate.

Il primo è più ovvio utilizzo delle immagini satellitari acquisite sui comprensori glaciali lombardi è quello relativo al monitoraggio di tipo planimetrico. L'elevata risoluzione geometrica permette infatti una precisa valutazione degli arretramenti lineari e areali, oltre all'individuazione di una serie di evidenze geomorfologiche connesse all'evoluzione glaciale (crepacci, laminazioni, frammentazione delle fronti, collassi delle morene laterali, creazione di laghi effimeri di contatto glaciale, aumento della copertura detritica superficiale, ecc..).

La metodologia relativa al monitoraggio volumetrico prevede invece l'orientamento relativo ed assoluto delle coppie stereoscopiche IKONOS, e tecniche manuali e semi-automatiche di stereorestituzione digitale, al fine di ricavare una maglia sufficientemente fitta di punti quotati, e quindi ricostruire i modelli digitali di elevazione delle aree glaciali. Tali DTM possono essere quindi confrontati con le informazioni raster e vettoriali storiche, al fine di stimare le diminuzioni di spessore assoluto del ghiaccio e le variazioni volumetriche.

Nel corso degli anni scorsi, sono state stimate le variazioni di spessore di ghiaccio (e ove possibile di volume totale) dei principali ghiacciai ripresi dalle immagini stereoscopiche, ed in particolare il ghiacciaio dei Forni, il comprensorio del Monte Confinale e del Monte Sobretta in alta Valtellina ed i ghiacciai del comprensorio del Bernina in alta Valmalenco (Scerscen Sup. e Inf., Fellaria Est e Ovest).

Al fine di sintetizzare i risultati, si propone il grafico in figura 2, in cui vengono riportate le riduzioni medie annue stimate di spessore di ghiaccio, relativamente ad una serie di punti campione individuati a differenti quote sui diversi ghiacciai interessati (e quindi su ghiacciai di differente tipologia, caratteristiche dei bacini di accumulo, esposizione media, ecc..).

Le medie annue di perdite di spessore sono relative a due differenti periodi temporali: il primo e più lungo (1981-2006), deriva dal confronto dell'altimetria derivata dalla C.T.R. del 1981 con i DTM ricostruiti sulla base dei dati stereoscopici IKONOS del 2006. Analizzando questa prima serie emerge chiaramente che ogni punto campionato ha subito riduzioni sensibili di spessore, in particolare, come prevedibile, alle quote relativamente inferiori dove il bilancio fra fusione e accumulo è maggiormente negativo. L'altra serie è relativa al solo sotto-periodo 2003-2006 e ad un sottoinsieme di punti (ovvero per le sole aree in cui è disponibile la doppia acquisizione con IKONOS), ed evidenzia che il fenomeno della perdita di spessore ha subito una chiara accelerazione negli anni recenti, caratterizzati mediamente da una riduzione degli accumuli nevosi e da un aumento della temperatura media.

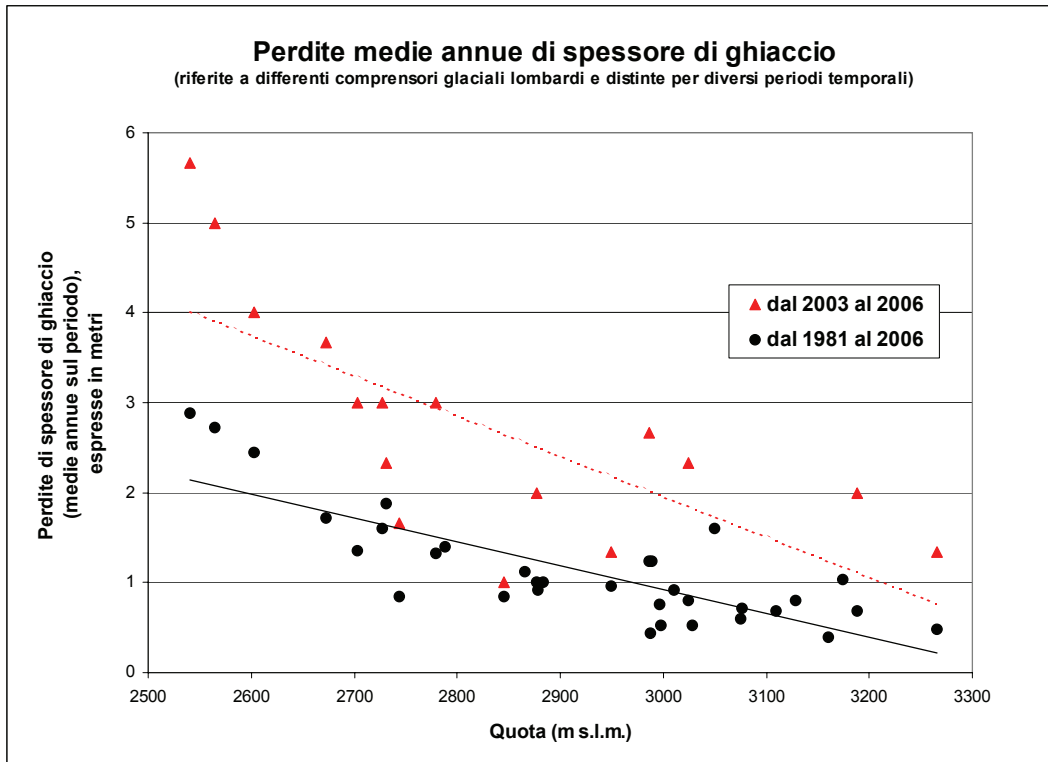


Figura 2: Sintesi delle variazioni di spessore medie annuali stimate per alcuni punti campione, relativi a differenti comprensori glaciali lombardi. Confronto rispetto ai due intervalli temporali 1981-2006 e 2003-2006.

Questo tipo di analisi è parzialmente limitante nel caso in cui vengano confrontati DTM ricavati con metodologie differenti e con differente accuratezza. Questo limite è stato parzialmente superato proprio con la ripetizione di riprese IKONOS a distanza di pochi anni sui medesimi ghiacciai. Ad esempio, l'acquisizione ripetuta sul Ghiacciaio dei Forni a distanza di soli 3 anni (2003 e 2006) ha consentito la stima delle variazioni volumetriche recenti non solo rispetto ai DEM "storici". Le perdite di spessore medie in questo triennio sul ghiacciaio (figura 3) sono state di circa 5 metri (con punte di circa 20 metri) e la variazione totale di volume è risultata di circa 54 milioni di m<sup>3</sup>.

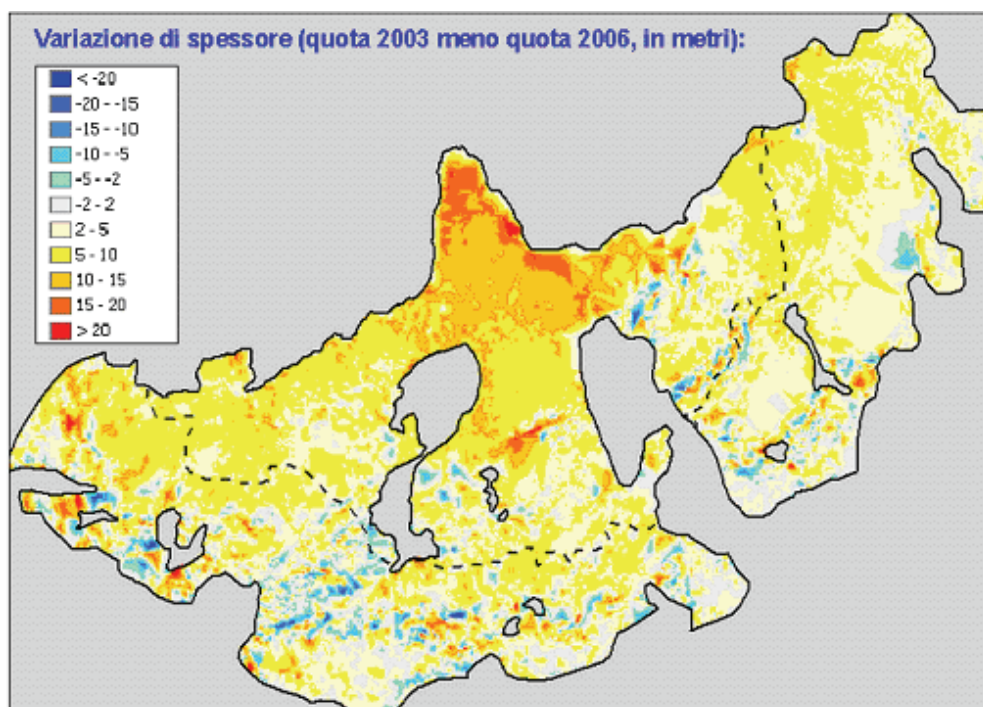


Figura 3: Mappa delle variazioni di spessore del Ghiacciaio dei Forni dal 2003 al 2006.

### Validazione con rilievo GPS-RTK

L'acquisizione del 5 settembre 2006 sull'area dell'alta Valtellina è stata anche oggetto di una validazione della metodologia e di una quantificazione degli errori introdotti nella stima della quota assoluta utilizzando immagini stereoscopiche IKONOS.

A tale scopo, sono stati utilizzati i dati a terra ottenuti con una campagna intensiva sul Ghiacciaio Alpe Sud (Monte Sobretta, alta Valfurva, estensione di circa 0,1 Km<sup>2</sup>), in cui sono stati acquisiti ben 5299 punti quotati con un rilievo GPS impiegato in *real time* (RTK), in modalità cinematico continuo, effettuata il 17 settembre 2006.

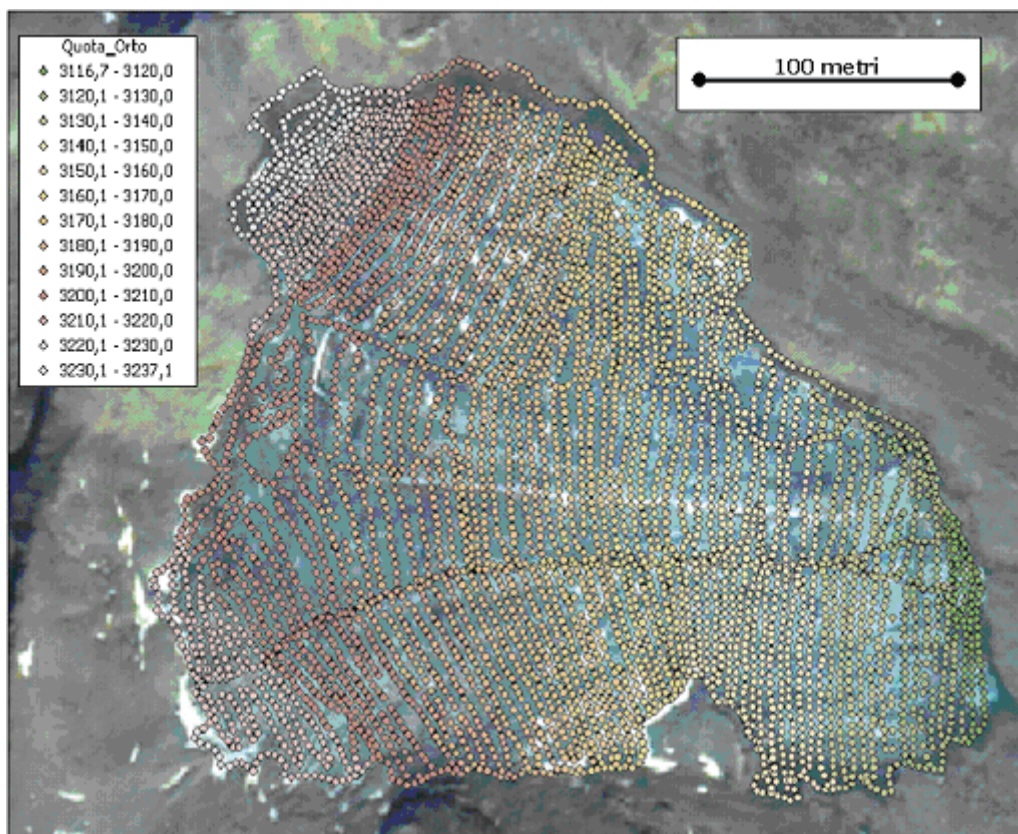


Figura 4: Immagini IKONOS del Ghiacciaio Alpe Sud (M. Sobretta) con sovrapposti i 5299 punti quotati ottenuti con apposito rilievo GPS-RTK effettuato nell'estate 2006.

L'analisi statistica degli errori ha riguardato un totale di 428 punti quotati ottenuti tramite stereorestituzione digitale e individuazione automatica dei punti omologhi, analizzando gli scostamenti fra la quota stimata da satellite rispetto al valore misurato con il rilievo GPS.

Si precisa che l'analisi è stata condotta sulla totalità dei punti quotati individuati tramite stereorestituzione digitale sul Ghiacciaio Alpe Sud, senza quindi la ricerca e l'eliminazione di presunti *outliers*.

Ad ogni punto quotato individuato, è stata associata (tramite l'operazione di *spatial join*) la quota del punto GPS più vicino. L'ottima densità dei punti misurati durante la campagna a terra garantisce la rappresentatività della procedura (la distanza fra i punti "IKONOS" e i punti "GPS" infatti è, per tutti i punti investigati, inferiore ai tre metri).

Il grafico in figura 5 sintetizza gli scostamenti fra quota stimata e quota misurata per il totale dei 428 punti, in un intervallo di quote assolute variabili da circa 3120 a circa 3225 metri s.l.m.

Il coefficiente di correlazione fra valori stimati e misurati è risultato dello 0,998. Lo scarto quadratico medio o RMSE è risultato di 0,98 metri.

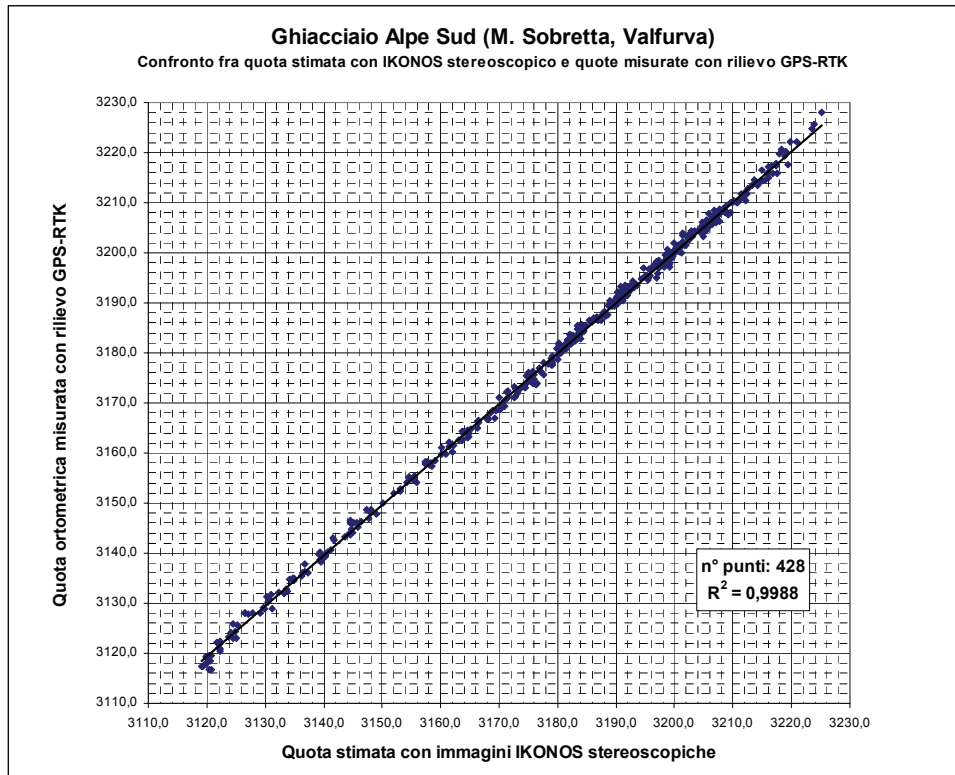


Figura 5: Retta di regressione, relativa ai 428 punti campione, fra i valori di quota stimata con stereoscopia satellitare e le misure GPS-RTK a terra.

Analizzando la statistica relativa agli scarti (figura 6), sul totale dei punti con quota stimata da satellite, il 70,6 % ha scarto assoluto rispetto alla quota misurata con GPS minore di un metro. Il 25,4 % ha scarto assoluto maggiore di un metro e comunque inferiore a due metri.

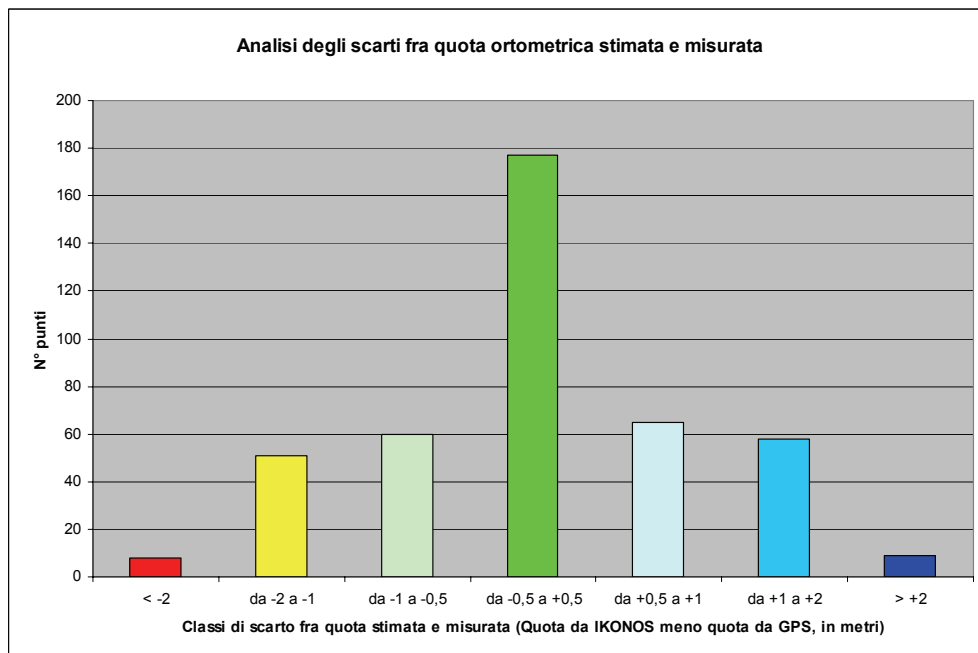


Figura 6: Distribuzione degli scarti fra quota stimata e misurata sui 428 punti campione.

Dal punto di vista della distribuzione “geografica” degli scarti fra quota stimata e misurata (figura 7), l’errore pare distribuito piuttosto uniformemente, con solo un leggero aumento ai margini del corpo glaciale (presumibilmente anche a causa dell’aumento della pendenza).

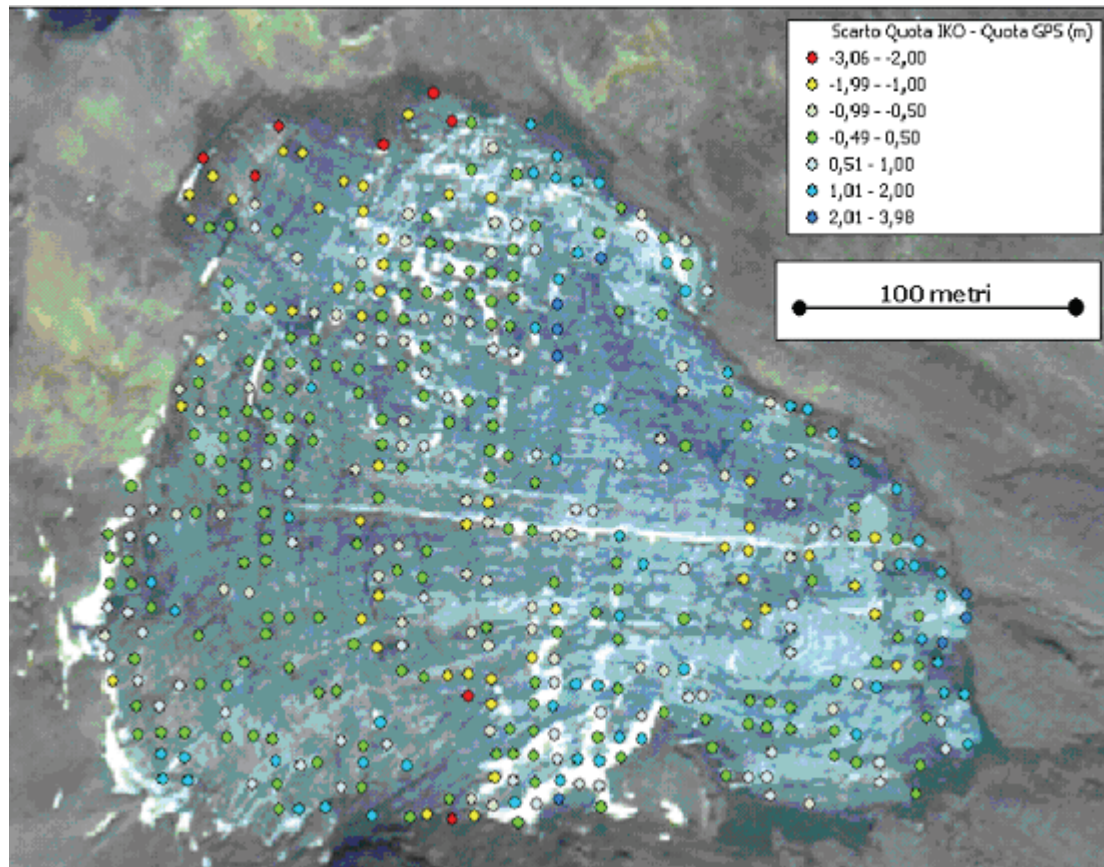


Figura 7: Scarto fra quota stimata con IKONOS e quota misurata con GPS-RTK per i 428 punti quotati individuati tramite stereorestituzione automatica sul Ghiacciaio Alpe Sud.

## Conclusioni

I dati satellitari IKONOS ad alta risoluzione acquisiti in stereoscopia si sono rivelati un ottimo strumento per il monitoraggio quali-quantitativo delle dinamiche glaciali su aree estese, sia dal punto di vista planimetrico che volumetrico. I risultati ottenuti, in termini di estensione delle aree monitorate e di accuratezze orizzontali e verticali, sono di supporto in vista del proseguimento del monitoraggio dei ghiacciai lombardi anche con tecniche satellitari.

La metodologia sviluppata è complementare e integrata con le tecniche glaciologiche tradizionali (misure frontali, bilanci di massa, bilanci energetici, ecc..) ed i due approcci potranno coesistere in un'ottica di monitoraggio integrato e "multi-scala" dei corpi glaciali.

L'alta risoluzione satellitare in stereoscopia, a fronte di alcune limitazioni (soprattutto i costi ancora piuttosto elevati e la non completa garanzia dell'effettiva acquisizione delle aree di interesse), ha il vantaggio di poter effettuare analisi sufficientemente affidabili e ripetibili su aree estese o di non semplice accessibilità per le misure glaciologiche di campo.

## Bibliografia

- Bellingeri et al. (2005), "Utilizzo di immagini IKONOS stereoscopiche per il monitoraggio dei ghiacciai e per la stima degli accumuli di frana", Atti della 9° Conferenza Nazionale ASITA
- Belò et al. (2005), "Bilancio volumetrico e di massa di un ghiacciaio alpino campione tramite rilievi GPS in modalità RTK: il Ghiacciaio della Sforzellina", Atti 9° Conferenza Nazionale ASITA
- Kaczynski et al. (2004), "Accuracy of DTM and Ortho generated from IKONOS Stereo images", XXth ISPRS Congress.
- Zini et al. (2006), "Il telerilevamento per il monitoraggio delle risorse idriche in Lombardia", Atti del seminario del convegno ECOMONDO 2006 - Telerilevamento e GIS per la protezione dell'ambiente.