

Atti 17<sup>a</sup> Conferenza Nazionale ASITA - Riva del Garda 5-7 novembre 2013

## **GLIMS-IT: contributo italiano al progetto GLIMS di monitoraggio satellitare dei ghiacciai del globo**

Roberto Ranzi (\*), Carlo Baroni (\*\*), Monica Pepe (\*\*\*), Enrico Rossi (\*),  
Federico Vantadori (\*), Maria Cristina Salvatore (\*\*)

(\*) Università degli Studi di Brescia, Dipartimento d'Ingegneria Civile, Architettura, Territorio,  
Ambiente e di Matematica, Via Branze 43, 25123 Brescia, Tel. +390303711212, [ranzi@ing.unibs.it](mailto:ranzi@ing.unibs.it)

(\*\*) Università degli Studi di Pisa, Dipartimento di Scienze della Terra, Via S. Maria n. 53, 56126 Pisa,  
Tel +39-0502215731, [carlo.baroni@unipi.it](mailto:carlo.baroni@unipi.it)

(\*\*\*) CNR-IREA, UOS di Milano, Via Bassini 15, 20133 Milano, Tel. +290223699550, [pepe.m@irea.cnr.it](mailto:pepe.m@irea.cnr.it)

### **Sommario**

Si illustra lo stato di avanzamento del contributo italiano al progetto GLIMS-Global Land Ice Measurements from Space che consiste nella redazione di un Atlante satellitare dei ghiacciai italiani. Dall'analisi di cinque immagini rilevate dal sensore ASTER installato sul satellite TERRA sono stati delineati i limiti dei ghiacciai nei gruppi montuosi delle Alpi Lepontine, Pusteresi, delle Dolomiti venete, del versante trentino del Cevedale e dell'Adamello-Presanella. Dal punto di vista metodologico si sono sfruttate, tra l'altro, le informazioni desumibili dai canali spettrali dell'infrarosso termico per il riconoscimento di alcuni ghiacciai coperti da detrito e, una volta delineata l'estensione del ghiacciaio, i parametri geomorfologici vengono estratti in modo automatico con un codice di calcolo che implementa i requisiti del progetto GLIMS. I risultati delle elaborazioni sono stati trasmessi al data base gestito dal National Snow and Ice Data Center ed al Comitato Glaciologico Italiano, che collabora all'iniziativa per l'aggiornamento del catasto dei ghiacciai italiani. Le informazioni per i gruppi montuosi del Cevedale e dell'Adamello-Presanella sono state organizzate in un sistema informativo territoriale in formato KML. Mediamente, nelle aree sinora investigate, è stata rilevata una diminuzione dell'estensione dei ghiacciai, dagli anni '80 al 2007, compresa tra il 34% ed il 50%, una marcata frammentazione di diversi ghiacciai e la scomparsa di alcune unità glaciologiche, confermando l'accelerazione del ritiro iniziato al termine della Piccola Età Glaciale. Si presentano i risultati dell'elaborazione di un'immagine del gruppo dell'Adamello-Presanella la cui estensione dei ghiacciai si è ridotta del 36% dagli anni '80 al 2007.

### **Abstract**

In this article progresses of the Italian contribution to the project GLIMS-Global Land Ice Measurements from Space are presented. The final objective is to produce a satellite-derived Atlas of Italian. From the analysis of five images scanned by the ASTER sensor installed on the TERRA satellite, the limits of glaciers in the mountain ranges of the Lepontine Alps, Pusteresi Alps, the Veneto Dolomites, the Cevedale group in the Noce basin, and Adamello-Presanella were extracted. From a methodological point of view the information from the thermal infrared spectral channels for the recognition of some debris-covered glaciers was used. Once the extent of the glacier is obtained, the geomorphological parameters are extracted automatically with a computer code that implements the requirements of the project GLIMS. The results of processing have been transmitted to the data base maintained by the National Snow and Ice Data Center and the Italian Glaciological Committee, which is involved in the initiative for updating the Italian Glaciers Inventory. The information for the mountain ranges of the Cevedale and Adamello-Presanella have been organized into a geographic information system in KML format. On average, in the areas investigated so far, a decrease from the 80s to 2007, in the extent of glaciers between 34% and 50% was detected, with a marked fragmentation of different glaciological units and the disappearance of some small glaciers, confirming the acceleration in the last decades of the glacier's retreat started at the end of the Little Ice Age. A detailed analysis of the image of the Adamello-Presanella group, where a 36% glacier's retreat was observed, is presented.

## Introduzione

La mappatura dei limiti dei ghiacciai può essere effettuata, ricercando un compromesso tra costi delle immagini e della loro elaborazione ed accuratezza dei risultati, sfruttando come dato di partenza un'immagine rilevata da sensori installati su una piattaforma satellitare. Il sensore ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and reflection Radiometer) installato sul satellite TERRA è progettato per acquisire le immagini nella bande del visibile e infrarosso vicino (VNIR), infrarosso delle onde corte (SWIR) e termico (TIR). Da opportune combinazioni di bande spettrali, viene delineata una maschera del ghiacciaio, che, salvata in un formato compatibile con un GIS, può essere sovrapposta ai layer cartografici quali Cartografia Tecnica Regionale, ortofoto, o, negli ultimi anni, piattaforme web disponibili su internet, come Google Earth. E' così facile apprezzare visivamente l'evoluzione (in questo caso meglio parlare di "ritiro") dell'estensione dei ghiacciai nel corso del tempo. Il confronto tra le bande viene fatto, molto spesso, effettuando un rapporto tra bande, nel caso del sensore TERRA-ASTER, la banda VNIR 3N e SWIR 4. Questa operazione produce una nuova immagine, nella quale è evidenziato il corpo del ghiacciaio. La banda termica, TIR, è utilizzabile per osservare i ghiacciai ricoperti da detriti ("black glaciers") di spessore inferiore ad alcune decine di centimetri, invisibili con le altre bande spettrali. Esistono, tuttavia, diverse soluzioni automatizzate per il tracciamento dei contorni dei ghiacciai partendo da immagini satellitari (Della Ventura et al., 1986, 1987). I relativi algoritmi sono studiati per adattarsi ad una determinata caratteristica del suolo (vegetazione, ghiaccio, detriti, ombra, copertura nevosa), quindi un singolo algoritmo non può essere utilizzato per qualunque classificazione. Spesso è, inoltre, necessaria l'esperienza di un operatore che conosca i luoghi, per distinguere il ghiaccio dalla neve stagionale, il detrito sovrapposto al ghiaccio dalle morene laterali e frontali ed altri dettagli geomorfologici. Servendosi, inoltre, di documentazione disponibile da altre fonti, ogni ghiacciaio viene riconosciuto, isolato manualmente, e schedato. Il riconoscimento dei ghiacciai attraverso immagini satellitari si inquadra nel progetto internazionale GLIMS-Global Land Ice Measurements from Space (Kargel et al., 2005). Il progetto GLIMS si pone come obiettivo la creazione di un database dei ghiacciai presenti sul nostro pianeta, monitorando il cambiamento dell'estensione nel corso del tempo. I ghiacciai, infatti possono essere ritenuti come un indicatore dello stato di salute del pianeta Terra, ed il loro monitoraggio costante ha assunto grande rilevanza soprattutto negli ultimi anni, dove la velocità di variazione della superficie coperta da ghiaccio è andata riducendosi con velocità sempre crescenti, insieme alle variazioni climatiche (Citterio et al, 2007). Il monitoraggio attraverso sistemi tecnologici semi-automatizzati, quali immagini acquisite dallo spazio, nel complesso risulta meno costoso rispetto ad una campagna di rilievo *in-situ*. E' sufficiente pensare al numero di persone coinvolte, alle attrezzature necessarie per la spedizione, ed al tempo richiesto per portare a termine l'intera campagna. Sfruttando invece le immagini provenienti dal satellite TERRA, il costo in termini di personale per una mappatura globale dei ghiacciai si riduce notevolmente, sebbene l'accuratezza dei risultati sia inferiore a quella derivata da rilievi aerofotogrammetrici con verifiche *in-situ*. Inoltre è possibile tenere sotto controllo la variazione dei confini del ghiacciaio nel corso del tempo, eseguendo operazioni di analisi più frequenti, rispetto alle campagne di rilievo sul campo. Per ogni ghiacciaio sono determinate informazioni specifiche, quali l'area, la pendenza media, ed altri parametri geomorfologici che possono essere utili per completare la schedatura dello stesso. Queste informazioni possono essere estratte grazie al software messo a disposizione da GLIMS, chiamato "Glims View", oppure tramite codici specifici come, nel caso del contributo italiano, il codice GLIMSIT.exe, scritto in linguaggio FORTRAN. Essi elaborano l'informazione fornita da un modello digitale delle quote del terreno (DEM) e la maschera del ghiacciaio risultato della classificazione. I files che si ottengono, realizzati secondo gli standard richiesti dal progetto GLIMS, vengono inviati allo National Snow and Ice Data Center, per essere integrati nel database mondiale. Sempre nell'ottica della condivisione delle informazioni di carattere scientifico relative ai ghiacciai, è stato pensato di convertire il file in formato shapefile in un formato compatibile con la piattaforma "Google Earth", e standard internazionale dell'OGC (Open Geospatial Consortium), ovvero il KML (Keyhole Markup

Language). Per i ghiacciai del gruppo dell'Adamello–Presanella esiste un catasto degli anni '90 (C.G.T., 1994) e, per la parte lombarda, una recente monografia (Bonardi et al. 2012). Essi sono stati studiati da numerosi autori (tra gli altri Baroni e Carton, 1990, 1996; Coppola et al., 2012; Ranzi et al. 2010; Grossi et al. 2013) e la loro classificazione è avvenuta considerando 3 bande ASTER: TIR, VNIR 3N, e SWIR 4. In particolare i ghiacciai sono evidenziati dall'utilizzo del rapporto tra la banda VNIR 3N (Figura 1) e SWIR 4 (Figura 2). La banda TIR è stata utilizzata per la valutazione di eventuale ghiaccio coperto da detrito, operazione che si è resa necessaria per l'elaborazione dell'immagine del gruppo del Cevedale, ma che si è rivelata insufficiente per classificare il Ghiacciaio del Venerocolo, coperto da una coltre di detrito di spessore eccessivo, di diverse decine di centimetri (Bonardi et al., 2012). L'immagine del 25 agosto 2007, di 5737 x 5134 pixel di 15 m di risoluzione geometrica, è stata ortoproiettata e georiferita in un sistema di riferimento UTM-WGS84 32N, informazione sarà presente nei metadati di ogni singolo file in formato geotiff. L'immagine utilizzata è stata acquisita il 25 agosto 2007, nel periodo di minima copertura nevosa, ed è stata scelta fra i passaggi privi di nuvole, elemento che ostacola, o impedisce del tutto, il riconoscimento ottico delle superfici. Sfruttando il fatto che nel campo spettrale 0,76 – 0,86 micron neve e ghiaccio hanno riflettanza massima, mentre presentano picchi di assorbimento caratteristici nello SWIR, le relative superfici appaiono chiare nelle immagini relative alla banda

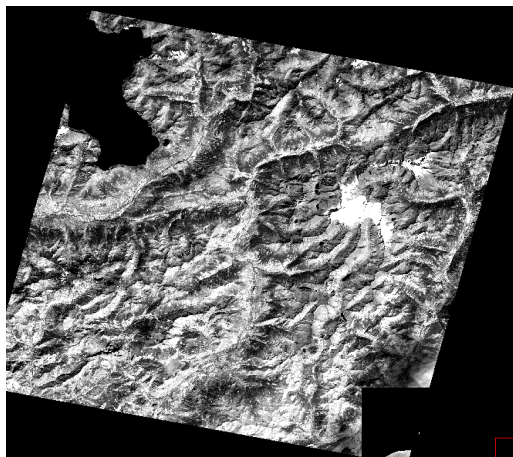


Figura 1. Immagine Aster del 25.8.2007, banda VNIR 3N.

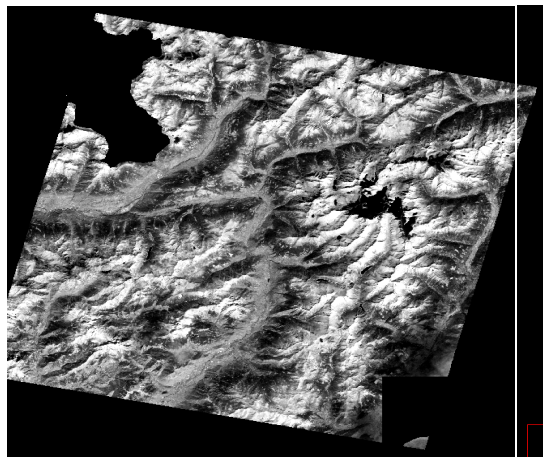


Figura 2. Immagine Aster del 25.8.2007, banda SWIR4.

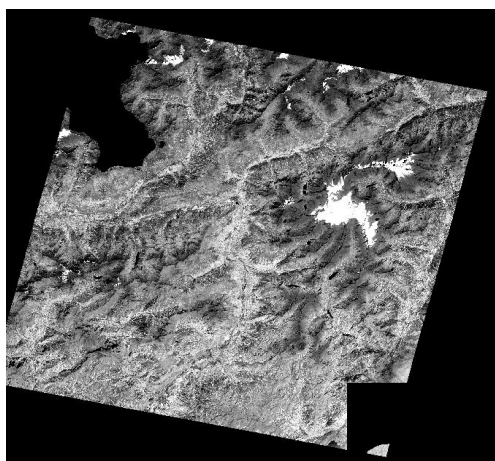


Figura 3. Rapporto di bande VNIR 3N e SWIR 4.



Figura 4. Immagine riclassificata (zoom).

3VNIR, mentre sono di colore scuro nella banda 4 SWIR. Il rapporto tra la banda 3 VNIR e 4 SWIR (Figura 3) accentua il contrasto tra le superfici innevate o ghiacciate, permettendo di distinguerle dall'acqua e dalle nubi, ottenendo una nuova immagine (Figura 4), che viene elaborata per estrarre definitivamente la maschera del ghiacciaio, necessaria per delineare i contorni dei ghiacciai allo stato attuale. Seguendo le indicazioni del progetto GLIMS, per ogni ghiacciaio sono stati calcolati, con il codice GLIMSIT.exe i parametri riportati nella Tabella 1.

*Tabella 1. I parametri riportati nelle schede di descrizione di ciascuna unità glaciologica nell'Atlante satellitare dei Ghiacciai Italiani del progetto GLIMS-IT.*

<b>Nome del Ghiacciaio</b>	Non esiste un nome unico per il ghiacciaio, ed è possibile utilizzare abbreviazioni. Il nome locale del ghiacciaio può essere utilizzato solo se questo rientra integralmente nel nome ufficiale.
<b>ID WGI</b>	E' la sigla alfanumerica ufficiale stabilita dal WGI, ed è composto, da sinistra a destra da: nome del paese, ID del bacino, numero del sottobacino, numero progressivo relativo al numero di unità del ghiacciaio.
<b>ID CGI</b>	E' il numero ufficiale CGI-CNR come definito dal Comitato Glaciologico italiano del 1962. E' composto da 4 numeri, i primi 3 rappresentano il numero di identificazione storico, mentre dopo il punto è indicato il numero relativo agli elementi in cui è suddiviso il ghiacciaio.
<b>GLIMS ID</b>	Ogni ghiacciaio deve avere un codice unico di identificazione nel database Glims. Questo codice viene generato dalle coordinate geografiche del baricentro del ghiacciaio. L'Id è nella forma GxxxxxEyyyyy [N   S], dove [N   S], indicano rispettivamente Nord o sud. Il numero xxxxxx, indica la longitudine con tre cifre decimali e può variare nel range di [000000, 359999]. Il numero yyyyyy, indica la latitudine con 3 cifre decimali e può variare da [000000, 90000]. Il problema dell'assegnazione delle coordinate al ghiacciaio, riguarda il fatto che, se si considera il baricentro, nel corso del tempo questo può variare, a causa del cambiamento delle dimensioni del ghiacciaio. E' bene quindi considerare la zona principale di accumulo, che viene stabilita manualmente.
<b>Sinonimi</b>	Eventuali nomi aggiuntivi del ghiacciaio, separati da una virgola.
<b>Bacino</b>	E' il nome del bacino relativo al ramo del primo ordine.
<b>Sottobacino (II e III ordine)</b>	Sono i nomi dei rami di secondo e di terzo ordine che affluiscono al corso d'acqua principale
<b>Coordinate UTM statiche (UTM static coordinates)</b>	Le coordinate del ghiacciaio sono posizionate nel punto principale di approvvigionamento dello stesso, e sono riportate in gradi decimali, relative all'anno in cui sono state rilevate dal WGI
<b>Coordinate UTM dinamiche (UTM dynamic coordinates)</b>	Sono le coordinate (UTM-WGS84) del baricentro del ghiacciaio, in funzione dei nuovi contorni tracciati.
<b>Classificazione Primaria (Primary classification)</b>	La classificazione primaria, come indicato dal WGI, utilizza le seguenti numerazioni (e nome delle classi in lingua inglese) 0 Uncertain or miscellaneous, 1 Continental ice sheet, 2 Ice-field, 3 Ice cap, 4 Outlet glacier, 5 Valley glacier, 6 Mountain glacier, 7 Glacieret and snowfield 8 Ice shelf, 9 Rock glacier

<b>Fonte di approvvigionamento del ghiacciaio (Feeding)</b>	Le principali indicazioni per la fonte di approvvigionamento sono: 0 Unknow, 1 Snow, 2 Avalanches, 3 Superimposed Ice
<b>Area totale (Total area)</b>	La superficie dell'area di un ghiacciaio è considerata come l'intera area ricoperta di ghiaccio. Questo è strettamente connesso con il perimetro, perché sono parametri calcolati automaticamente con i software GIS. L'area ed il perimetro devono essere misurati in una proiezione appropriata. Il valore considerato è in chilometri quadrati, con 3 cifre decimali.
<b>Larghezza media (Mean width)</b>	Rapporto tra l'area totale e la massima lunghezza
<b>Massima Lunghezza (Max length)</b>	Rappresenta la linea di scorrimento maggiore dell'intero ghiacciaio
<b>Perimetro esterno (External perimeter)</b>	Misura del perimetro del ghiacciaio
<b>Quota Min (Min elevation)</b>	Valore della quota minima, fornito dal DEM
<b>Quota Max (Max elevation)</b>	Valore della quota massima, fornito dal DEM
<b>Quota mediana (Median elevation)</b>	Valore calcolato dividendo in 2 il numero delle celle che contengono tutti i valori delle quote. Il risultato indica il numero di celle che contengono l'elevazione media.
<b>Quota media (Mean elevation)</b>	Rapporto tra i valori di ogni quota e il numero delle celle considerate
<b>Pendenza media (Mean slope)</b>	Pendenza media calcolata partendo dal DEM
<b>Esposizione (Mean aspect 360°)</b>	Media dei valori di esposizione, calcolata partendo dal DEM
<b>Esposizione principale (Aspect sector, direction)</b>	Direzione geografica indicata dalla media dei valori di esposizione
<b>Data DEM (Satellite data and Dem source)</b>	Indica la data di realizzazione del modello digitale del terreno (DEM)
<b>Data acquisizione immagine (Year/Mounth/Day)</b>	Indica la data in cui è stata acquisita l'immagine satellitare
<b>Operatore (Operator/analyst)</b>	Nome e cognome dell'operatore/i che ha elaborato le immagini satellitari.

### **Incertezze della classificazione e dei parametri geomorfologici**

L'incertezza,  $s_l$ , della lunghezza massima de ghiacciaio è affetta da errori di geocoding e da errori di classificazione. Gli errori di geocoding possono essere stimati come  $S_g$ , cioè l'errore quadratico medio dei GCP (Ground Control Points) di posizionamento dopo il processo di ortoproiezione. Questa quantità è fornita dal software utilizzato per questo scopo ed è tipicamente inferiore alla dimensione dei pixel (ad esempio 15 m per VNIR bande ASTER).

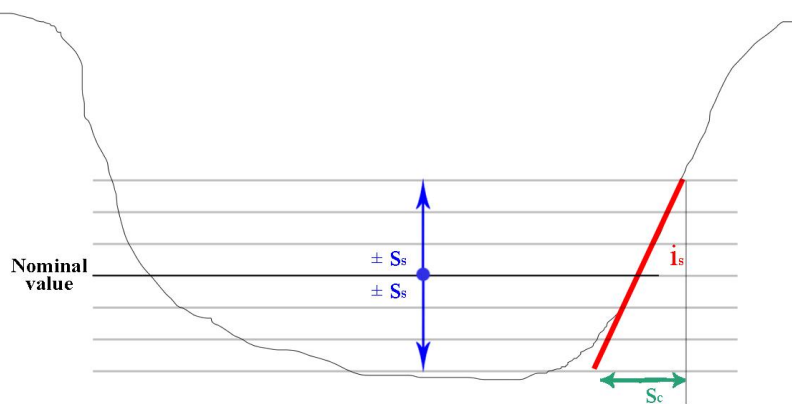


Figura 5. Esempio dei parametri usati per la definizione delle incertezze nelle distanze, in una sezione tipo di una immagine elaborata, ad esempio, con un rapporto tra bande.

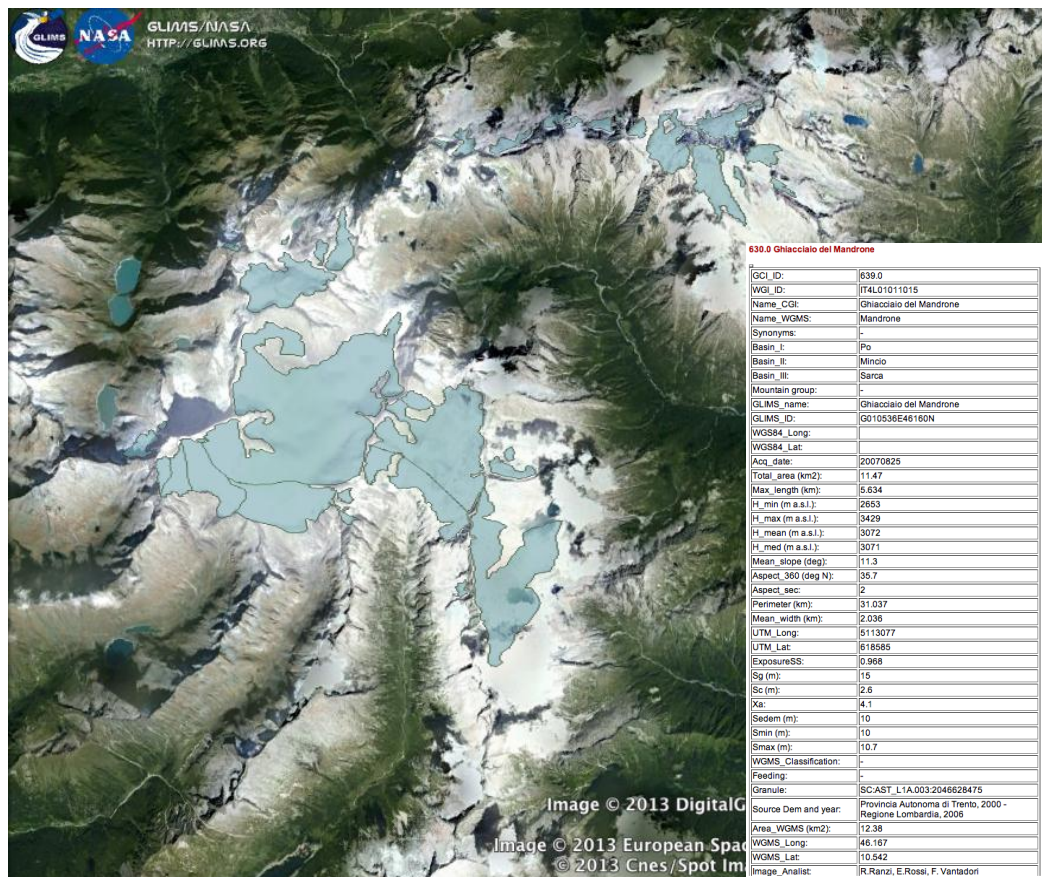


Figura 6. Ghiacciai del Gruppo Adamello-Presanella delineati dall'immagine ASTER del 25.8.2007, visualizzati con Google Earth con relativa scheda descrittiva secondo lo standard GLIMS-IT. Dalla classificazione è escluso il Ghiacciaio del Venerocolo, coperto da una spessa coltre detritica.

Gli errori di classificazione dipendono dalla tipologia di algoritmi adottati. In una sezione (Figura 5) trasversale del contorno del ghiacciaio, la pendenza locale  $i$ , del rapporto tra bande, lungo la sezione  $\bar{n}$ ,  $i_s = dbr/dn$  determina l'incertezza nella classificazione della distanza  $S_c$  pari a:

$$S_c = \frac{S_s}{i_s} \quad [1]$$

Quindi, l'incertezza complessiva della posizione del limite del ghiacciaio  $S_x$  è:

$$S_x = \sqrt{(S_c^2 + S_g^2)} \quad [2]$$

E di conseguenza, l'incertezza complessiva  $S_d$  sulla misura della distanza tra due punti (ad esempio della lunghezza del ghiacciaio) può essere ottenuta come:

$$S_d = S_x \times \sqrt{2} \quad [3]$$

L'incertezza relativa sulla misura dell'area del ghiacciaio può essere stimata come il prodotto tra il perimetro del ghiacciaio  $P$  e l'incertezza del limite del ghiacciaio,  $S_x$ :

$$S_A = S_x \times P \quad [4]$$

La lunghezza del perimetro può essere ottenuta direttamente dall'operatore, mentre l'incertezza relativa sulla misura dell'area è data da:

$$X_A = \frac{S_A}{A} = \frac{S_x \times P}{A} \quad [5]$$

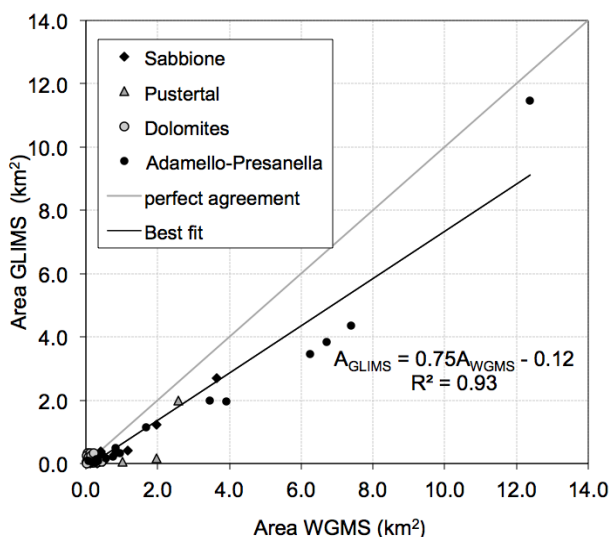


Figura 7. Confronto tra l'estensione dei ghiacciai classificati da quattro immagini satellitari degli anni 2001-2007 e quelle del catasto del WGMS risalente agli anni '80.

Il risultato della classificazione è illustrato dalla Figura 6 nella quale è riportata, per il Ghiacciaio del Mandrone che alimenta il bacino del fiume Sarca, la scheda con le informazioni del data-base del progetto GLIMS-IT. Nel complesso la superficie dei ghiacciai del gruppo dell'Adamello-Presanella è diminuita del 36% rispetto a quella registrata nel World Glaciers Inventory, risalente agli anni '80. Nella Figura 7 le superfici dei ghiacciai rilevati in quattro immagini satellitari acquisite tra il 2001 ed il 2007 sono confrontate quelle del WGI, marcando una riduzione media del 38%. I risultati delle elaborazioni in corso sono utili per l'aggiornamento del catasto dei ghiacciai italiani (C.G.I., 1962) per il quale è necessario coordinare varie iniziative promosse nell'ultimo decennio (Carnielli et al. 2004) anche utilizzando come fonte i dati satellitari, integrati dalla verifica di operatori glaciologici esperti e dall'elaborazione di rilievi aerofotogrammetrici.

### Riferimenti bibliografici

- Baroni C, Carton A. (1990), "Variazioni oloceniche della Vedretta della Lobbia (Gruppo dell'Adamello Alpi Centrali)", *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 13:105-119.
- Baroni C, Carton A. (1996), "Geomorfologia dell'alta Val di Genova (Gruppo dell'Adamello Alpi Centrali)", *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 19:3-17.
- Bonardi L., Rovelli E., Scotti R., Toffaletti A., Urso M., Villa F. (2012), *I Ghiacciai della Lombardia*. Servizio Glaciologico Lombardi (a cura di), Hoepli, Milano, 328 pp.
- Carnielli T., Carrara P., D'agata C., Diolaiuti G., Iulita C., Laffi C., Novembre C., Nucci R., Pepe M., Poggioli D., Rampini A., Rota Nodari F., Siletto G. B., Smiraglia C. (2004) "Data base per la gestione di un nuovo catasto dei ghiacciai lombardi", *Atti 8a Conferenza ASITA*, Roma, Dicembre 2004, Vol. I, pp. 655 – 662, 2004
- Citterio M., Diolaiuti G., Smiraglia C., D'Agata C., Carnielli T., Stella G., Siletto G.B. (2007), "The fluctuations of Italian Glaciers during the last century: a contribution to knowledge about alpine glaciers changes". *Geografiska Annaler*, 89A (3), 167-184.
- C.G.I. - Comitato Glaciologico Italiano (1962), *Catasto dei ghiacciai italiani*, volumes 1-4, Torino.
- C.G.T. - Comitato Glaciologico Trentino (1994), *I ghiacciai del Parco Naturale Adamello-Brenta. Catasto a cura del Comitato Glaciologico del Trentino*, Parco Adamello Brenta, Nuova Stampa Rapida, Trento, 126 pp.
- Coppola A., Leonelli G., Salvatore M.C., Pelfini M., Baroni C., (2012), "Weakening climatic signal since mid-20th century in European larch tree-ring chronologies at different altitudes from the Adamello-Presanella Massif (Italian Alps)", *Quaternary Research*, 77:344-355.
- Della Ventura, A., R. Rabagliati, A. Rampini and R. Serandrei Barbero (1986), "L'evoluzione recente del glacialismo in Valle Aurina (Alpi Pusteresi) nelle immagini Landsat MSS". *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 9(1), 39-48.
- Della Ventura A., Rampini A., and R. Serandrei Barbero (1987), "Development of a satellite remote-sensing technique for the study of alpine glaciers". *International Journal of Remote Sensing*, 8 (2), 203-215.
- Grossi G, Caronna P., Ranzi R. (2013), "Hydrologic vulnerability to climate change of the Mandrone glacier (Adamello-Presanella group, Italian Alps)", *Advances in Water Resources*, 55: 190-203.
- Kargel J.S., Abrams M.J., Bishop M.P., Bush A., Hamilton G., Jiskoot H., Kääb A., Kieffer H.H., Lee E.M., Paul F., Rau F., Raup B., Shroder J.F., Soltesz D., Stearns L., Wessels R. & The Glims Consortium (2005), "Multispectral imaging contributions to Global Land Ice Measurements from Space". *Remote Sensing of Environment*, 99, 187-219.
- Paul F., Frey H., Le Bris, R. (2011), "A new glacier inventory for the European Alps from Landsat TM scenes of 2003: Challenges and results". *Annals of Glaciology*, 52 (59), 144-152.
- Ranzi R., Grossi G., Gitti A., Taschner S. (2010), "Energy and mass balance of the Mandrone glacier (Adamello, Central Alps)", *Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria*, 33:45-60.