

APPLICAZIONI GPS PER LO STUDIO DELLE CARATTERISTICHE GLACIOLOGICHE DI APPARATI DEL KARAKORUM, PAKISTAN.

Marco BELO' ⁽¹⁾⁽²⁾, Christoph MAYER ⁽³⁾, Astrid LAMBRECHT ⁽⁴⁾, Andrea TAMBURINI ⁽⁵⁾, Giovanni PERETTI ⁽⁶⁾, Luigi BONETTI ⁽⁶⁾, Claudio SMIRAGLIA ⁽²⁾

⁽¹⁾ Trimble Italia S.r.l., Centro Torri Bianche, Palazzo Larice 3, Vimercate – (MI), marco_belo@trimble.com

⁽²⁾ Università degli Studi di Milano, Dipartimento Sc. Della Terra “Ardito Desio, claudio.smiraglia@unimi.it

⁽³⁾ Commission for Glaciology, Bavarian Academy of Sciences Alfons-Goppel Str. 11, Munich, Germany

⁽⁴⁾ Institut für Meteorologie und Geophysik, Innrain 52, Innsbruck, Austria

⁽⁵⁾ Centro Elettrotecnico Sperimentale Italiano (CESI), Via Rubattino 54, Milano

⁽⁶⁾ ARPA Lombardia, Centro Nivo-Meteorologico di Bormio, Via Monte Confinale 9 (SO)

Riassunto

Il Ghiacciaio Baltoro (Karakorum, Pakistan) è uno degli apparati glaciali più vasti del mondo (62 km di lunghezza) al di fuori delle terre polari. In questo lavoro partendo dai dati raccolti da una spedizione italo/tedesca condotta nell'ambito del Progetto “K2 2004 - 50 anni dopo”, si espongono metodologie adottate e risultati ottenuti per la determinazione delle principali caratteristiche geometriche e dinamiche del Ghiacciaio Baltoro. Trattandosi di un ghiacciaio debris-covered, le dinamiche di ablazione dipendono anche dalle proprietà del detrito. L'insieme dei dati ottenuti da una rete di paline ablatometriche collocate sul ghiacciaio, supportati dai dati di due stazioni meteo automatiche, hanno consentito la determinazione delle condizioni di ablazione locale. Inoltre si sono quantificate le aree dei vari settori del ghiacciaio (zona di accumulo e zona di ablazione) ed è stata calcolata la velocità superficiale sia con strumentazione GPS sia con immagini ASTER. Si è osservata una differenza fra la velocità estiva e la velocità media, non comparabile a quanto registrato per i ghiacciai alpini. Il confronto fra le immagini fotografiche dei decenni precedenti e quelle realizzate nell'ambito della spedizione, nonché l'elaborazione delle misure di variazione frontale, indicano che le oscillazioni del limite del ghiacciaio sono state di scarsa entità, non assolutamente confrontabili con gli accentuati processi di degradazione dei ghiacciai osservati in altre catene montuose in relazione agli attuali fenomeni di incremento termico globale.

Abstract

Baltoro Glacier in the Karakoram (Pakistan) with an extension of more than 60 km is one of the world's largest valley glaciers. In 2004 an Italian/German expedition carried out a glaciological field program on the ablation zone of the glacier, focussing on the ablation conditions and the dynamic state of the glacier. As Baltoro glacier is a debris-covered unit, ice ablation depends also on the debris properties. Stake measurements of ice ablation and debris cover in combination with meteorological data from automatic weather stations close by have been used for the determination of the local melt conditions. The dynamic state of the glacier has been investigated by GPS based surface velocity measurements along the stake network. A comparison of these short-term measurements during the melt season with surface velocities computed from feature tracking of satellite images show a high seasonal variability of the ice movement. From the comparison of historical measurements and photographs it could be shown that the snout of Baltoro Glacier is oscillating back and forth a couple of hundred metres. Otherwise it seems not to react with the same magnitude as other glaciers to the climatic change.

Introduzione

La disponibilità di acqua dolce, specialmente durante le stagioni secche, sarà un problema sempre più cruciale nelle regioni semi-aride dell'Asia Centrale, Pakistan incluso. L'aumento della popolazione, i più elevati standard di vita e l'intensificazione delle attività agricole concorreranno ad aumentare considerevolmente i consumi di acqua. I ghiacciai dell'Asia Centrale danno un contributo significativo alla risorsa idrica potabile, specialmente durante la stagione arida. L'area pachistana del Karakorum settentrionale, adiacente ad India e Cina, è una delle zone più glacializzate della regione. Alcuni dei ghiacciai vallivi più grandi al mondo sono ubicati proprio in questa zona. Sebbene la maggior parte della popolazione del Pakistan settentrionale dipenda dalle risorse idriche derivante dai ghiacciai del Karakorum, solamente un limitato numero di progetti di ricerca è stato condotto in questa regione. Per commemorare la spedizione alpinistico-scientifica del professor Desio del 1954, nell'ambito della spedizione Italiana "K2 2004 – 50 anni dopo", è stato condotto un intenso programma di ricerche glaciologiche nel periodo Giugno-Luglio 2004. I rilievi sul Ghiacciaio Baltoro hanno avuto come obiettivo la raccolta di dati sulla morfologia e la geometria dell'apparato glaciale, le sue dinamiche ed i suoi processi di ablazione. L'analisi integrata di questi dati ha fornito utili informazioni sulle sue condizioni attuali, sulle sue variazioni recenti, sul suo bilancio di massa e sulla sua produzione di acque di fusione. I dati di terreno sono stati supportati da analisi di immagini satellitari, che hanno permesso l'estrapolazione delle informazioni puntiformi derivanti dai dati acquisiti sul campo. Tutte le informazioni geografiche disponibili sono state trattate ed integrate in un GIS, dove come base cartografica è stata utilizzata la carta redatta da Miyamoro (2000). E' stato inoltre esaminata l'evoluzione del ghiacciaio attraverso il confronto di carte e foto storiche con immagini e misure più recenti.

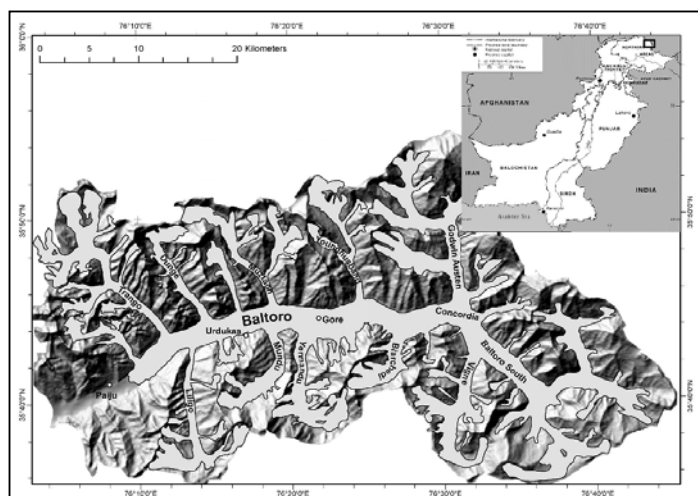


Figura 1 –Inquadramento dell'area di studio

Misure di terreno

Oltre ad un'intensa attività di esplorazione con fini alpinistici, il Ghiacciaio Baltoro è stato al centro di alcune spedizioni con obiettivi di ricerca geografica (Dainelli, 1924-1932; Spoleto, 1930, Desio et al., 1961).



Figure 2 e 3 – A sinistra caposaldo di riferimento presso Concordia (Archivio Desio). A destra, caposaldo GPS sulle pendici del Mitre Peak (foto Belò)

Ripercorrendo le orme dei primi esploratori, durante la salita verso il Campo Base del K2, per raccogliere informazioni sui parametri meteorologici del ghiacciaio e delle aree circostanti, sono

state installate due stazioni meteorologiche automatiche, presso la località di Urdukas ed al Campo Base stesso. Sulla superficie del ghiacciaio è stata installata una rete di paline ablatometriche, iniziando da Urdukas (4100 m) e salendo verso la testata della Valle del Braldu, e rispettivamente in direzione Nord (Ghiacciaio Godwin Austen) e Sud (Ghiacciaio Baltoro Sud), fino ad un'altezza di circa 4700 m.

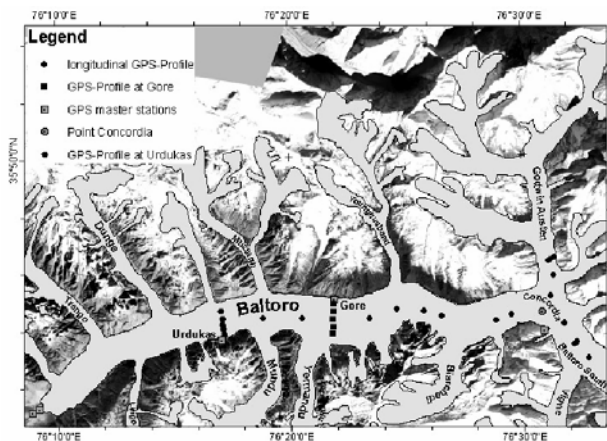


Figure 4 e 5 – Distribuzione delle paline sulla superficie del Ghiacciaio Baltoro (sinistra). A destra il Rover Trimble 5700 in acquisizione presso la palina BS01 (foto Belò)

Le paline sono state utilizzate per la determinazione dell'ablazione stagionale in aree a differente copertura detritica e come punti di riferimento per la misura della velocità superficiale del Baltoro. Per la determinazione di quest'ultimo parametro, si è fatto ricorso a strumentazione satellitare GPS doppia frequenza messa a disposizione dalla Società Trimble Italia. Nelle immediate adiacenze del Ghiacciaio Baltoro ed in aree sufficientemente aperte per garantire un buon tracciamento del segnale GPS, sono stati materializzati dei caposaldi di misura da utilizzare come riferimento per la determinazione delle velocità in più punti lungo il ghiacciaio. Le stazioni Master sono state collocate sui caposaldi esterni al ghiacciaio, mentre con ricevitore Rover in modalità Fast-Statica sono state determinate le coordinate delle paline ablatometriche ubicate in transetti trasversali e lungo il profilo longitudinale del Ghiacciaio Baltoro. Presso le paline si sono quindi misurate l'emersione dal ghiaccio/detrito e la velocità superficiale in diversi periodi, coincidenti con la data di installazione dei caposaldi e con la data del secondo passaggio durante il rientro al campo di Paiju, presso la fronte del Ghiacciaio Baltoro. In aggiunta alla rete di paline lungo il profilo longitudinale del Baltoro, sono state realizzate anche alcune sezioni trasversali presso Urdukas, Gore 1, il Ghiacciaio Godwin Austen ed il Baltoro Nord. I profili trasversali sono stati rilevati con elevato dettaglio utilizzando strumentazione GPS L1/L2 in tempo reale modalità Cinematico Continuo, al fine di determinare la complessità morfologica a media scala della superficie del ghiacciaio, elemento quest'ultimo controllato principalmente dalla confluenza di apparati tributari nella lingua principale e dall'erosione esercitata dallo scorrimento delle acque di fusione superficiali. La mancanza di caposaldi a coordinate note del Surveyor General of Pakistan (SGR) o di Stazioni GPS Permanenti nell'area non ha permesso l'inserimento dei dati in un sistema globale accurato; tuttavia per la determinazione delle velocità è stato sufficiente lavorare in un sistema di riferimento locale. Per la determinazione delle quote sul livello del mare, non avendo a disposizione un modello dedicato per l'area di studio, è stato utilizzato il Geoide EGM96.

Flusso glaciale e trasporto di massa

La misura della velocità superficiale è stata eseguita con misure GPS in differenziale presso le 60 paline collocate sulla superficie del ghiacciaio, dal Campo di Urdukas sino a quota 4900 circa. Le relative stazioni Master sono state installate ai margini del ghiacciaio, e precisamente presso Urdukas, Gore 1 e Concordia, ai piedi del Mitre Peak. L'intervallo di tempo delle misurazioni per la

determinazione delle velocità oscilla tra 1 e 11 giorni, in rapporto all'ultima misurazione eseguita durante la discesa dal ghiacciaio. I profili delle velocità mostrano alcune caratteristiche interessanti riferibili alla complessità del flusso dell'intero ghiacciaio. Per un apparato glaciale alpino a geometria semplice la massima velocità del flusso glaciale viene registrata nei pressi della linea di equilibrio. Per il Ghiacciaio Baltoro la massima velocità superficiale è stata misurata proprio sotto il profilo trasversale del Circo Concordia, con valori di 58.5 ± 0.4 cm/giorno calcolati su 3 giorni, che estrapolata ad un anno dà un valore di 214 m/anno. Sul Ghiacciaio Baltoro Sud, circa 3,6 km più a monte rispetto a Concordia, la velocità, sempre estrapolata, diminuisce sino a valori di 131 m/anno. La velocità sul Godwin Austen è di circa 120 m/anno. La ragione di questo aumento di velocità immediatamente a valle di Concordia può essere attribuita alla confluenza delle due colate glaciali del Godwin Austen e del Baltoro Sud, che aumentando considerevolmente la massa del ghiacciaio, favoriscono un movimento più accentuato. Nei pressi della confluenza del ghiacciaio tributario Yermandu, sotto le pendici del Masherbrum (7821 m), si osserva un nuovo incremento di velocità che va poi via via calando sino a 85 m/anno presso Urdukas. Le misure GPS effettuate presso i profili trasversali dimostrano l'esistenza di un gradiente trasversale per le velocità abbastanza ridotto; infatti in prossimità del Campo Gore 1, presso le paline più esterne del profilo trasversale ubicate a poche decine di metri dai margini del ghiacciaio, la velocità è ancora circa il 70% di quella misurata a centro ghiacciaio. Condizioni simili sono state riscontrate anche presso Urdukas. Sino ad ora si sono presentate solamente le velocità ricavate dalle misure GPS effettuate sul campo. Le misure GPS sono state effettuate durante la prima metà del periodo di ablazione. Ciò significa maggior presenza di acqua nell'interfaccia ghiacciaio/fondo roccioso con la conseguente maggiore velocità rispetto alla media annua. Per quantificare la differenza tra velocità estiva e velocità media annua, si è ricorso all'analisi delle immagini satellitari ortorettificate. Le immagini Landsat e ASTER utilizzate hanno permesso di identificare alcune forme riconoscibili in modo inequivocabile sulla superficie del Baltoro, dal cui tracciamento è stato possibile ricostruire gli spostamenti e quindi le velocità. Le *vele di ghiaccio* sono strutture caratteristiche alte sino a 25 metri, individuabili in un'ampia parte del bacino di ablazione. Dalla zona di Liligo sino al Campo Gore 1 sono state nitidamente identificate singole *vele di ghiaccio* in regioni altrimenti del tutto coperte di detrito. Il tracciamento di queste forme per un periodo di due anni ha permesso la costruzione di una carta delle velocità annue per la porzione centrale del Baltoro.

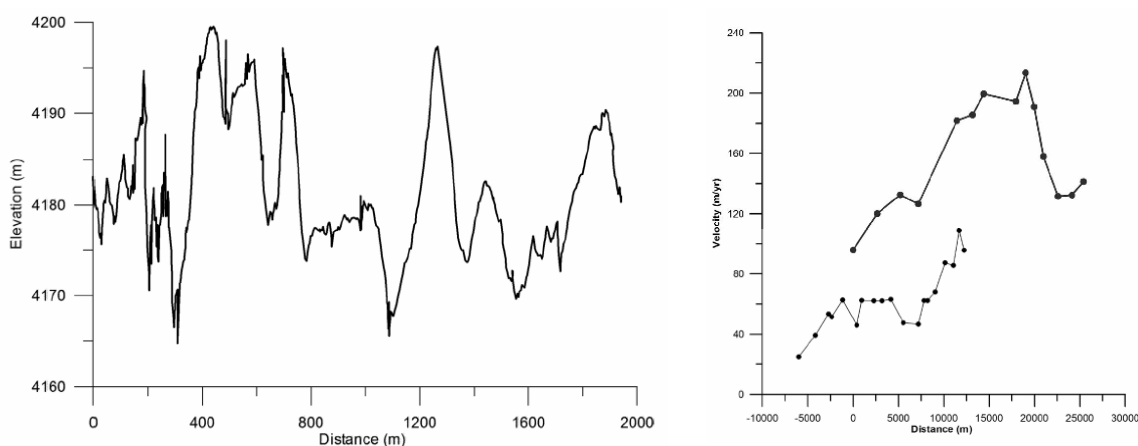


Figure 6 e 7 – Profilo GPS presso Gore (sinistra). A destra confronto tra la velocità stagionale (in alto) ottenuta dalle misure GPS e quella annua ottenuta dal confronto delle immagini ASTER

L'integrazione dei dati ottenuti dall'analisi delle immagini satellitari con i dati GPS raccolti sul campo ha dato come risultato il grafico di figura 7. Le due differenti misurazioni di velocità confermano che le velocità estive sono all'incirca il doppio rispetto a quelle medie annue, almeno per il settore principale del bacino di ablazione, sino a Concordia.

Fluttuazioni storiche

Le numerose spedizioni scientifico-alpinistiche hanno garantito l'esistenza di un ampio archivio di immagini storiche. In questo lavoro si riportano due esempi di utilizzo di varie fonti archivistiche e di confronti con la situazione attuale riguardanti le fluttuazioni della fronte e le modificazioni del settore centrale. La lingua del Ghiacciaio Baltoro oggi è principalmente costituita da contributi di tributari: il Ghiacciaio di Trango che occupa la porzione più elevata della valle e il flusso del Ghiacciaio Baltoro principale che scorre da Concordia ricoprendo la porzione meridionale della valle di Braldu. Da immagini del 1954 e del 2004 è possibile effettuare un confronto di questa porzione meridionale di ghiacciaio. Nell'arco di mezzo secolo la fronte del ghiacciaio si è appiattita. Alcune modifiche sono riscontrabili dall'osservazione delle immagini principalmente a proposito della posizione della bocca del ghiacciaio che si è spostata, attestandosi nella porzione settentrionale della fronte, ma in generale il confronto fotografico mostra che la sua posizione e la sua macromorfologia non sono mutate in modo sensibile. Anche dall'utilizzo delle misure delle oscillazioni frontali raccolte dall'inizio del XX secolo, si nota come non si possa parlare di evidenti episodi di avanzata e ritiro. Nella figura 8 vengono elencate le distanze misurate tra la fronte del Ghiacciaio Baltoro ed il masso Desio utilizzato come riferimento. I dati confermano che la fronte del ghiacciaio ha avuto solamente piccole oscillazioni (il valore cumulato risulta di un centinaio di metri dal 1913 al 2004), indicando una quasi stazionarietà nella posizione del limite del ghiacciaio, tenendo ovviamente in considerazione la sua intera lunghezza.

Autore	Anni	Distanza (m)	Azimut (°)
Dainelli	1913	80	70
Desio	1929	18	70
Desio	1954	296	Non definito
Smiraglia	1985	172	57
Maragnoli	1987	160	57
Rampini	1990	171	57
Pecci & Smiraglia	1997	131	70
Belò et al.	2004	145	70
Belò et al.	2004	140	57



Figura 8 - Variazioni frontali del Ghiacciaio Baltoro. Il caposaldo di misura è il Masso Desio, la cui quota è di circa 3366 m. Dopo Desio, molti autori nell'arco degli ultimi 91 anni hanno utilizzato il medesimo masso come riferimento per la determinazione della posizione della fronte del ghiacciaio.

Presso Concordia si trova uno dei caposaldi fotografici di Vittorio Sella utilizzati a partire dal 1909 per la riproduzione delle famose panoramiche di questo settore del Karakorum. Nel 2004 si è cercato di riprendere una identica serie di immagini dagli stessi caposaldi. Il limitato tempo a disposizione non ha permesso di raggiungere esattamente i caposaldi usati da Sella 95 anni prima. L'immagine panoramica del 2004 è quindi stata scattata circa 200 m più in basso rispetto a quella di Sella. Tuttavia il confronto qualitativo permette di affermare che lungo quasi tutta l'estensione del ghiacciaio il margine dell'apparato, identificabile dalle immagini a disposizione, non si è modificato in misura sensibile rispetto a 95 anni fa. Alcuni cambiamenti morfologici sono naturalmente identificabili, ma la loro dimensione è veramente ridotta se paragonata con quanto avvenuto sui ghiacciai montani, specialmente quelli alpini, nello stesso periodo, che hanno perso oltre il 30-40% della loro superficie (Beniston, 2003). La causa di questa ridotta involuzione del ghiacciaio va ricercata nelle caratteristiche morfologiche generali del ghiacciaio, un *debris covered glacier*, in particolare nella presenza della copertura detritica superficiale, in grado di ridurre l'ablazione e quindi la sua recessione.

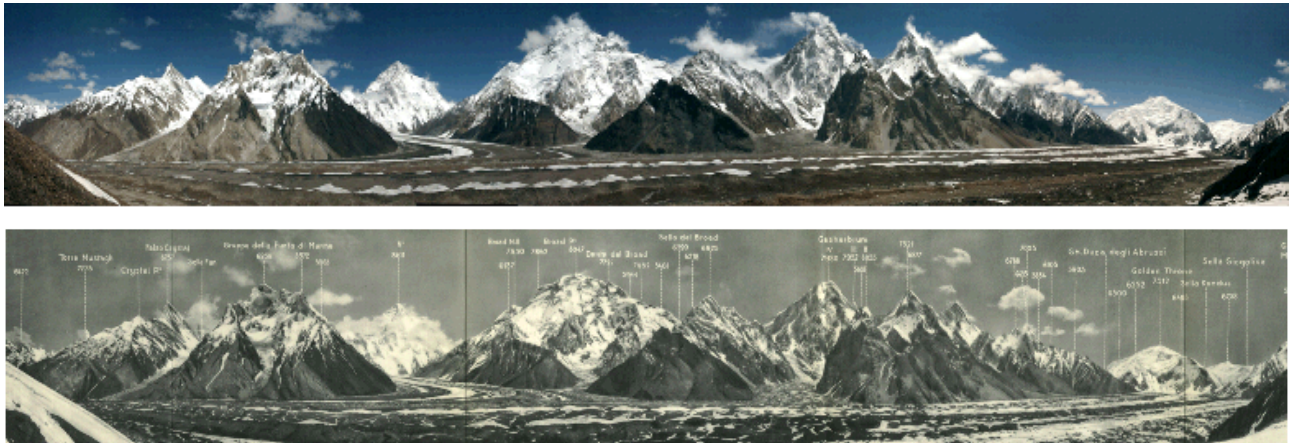


Figura 9 – Confronto della situazione a Concordia nel 1909 (foto Sella in De Filippi, 1912, in basso) e nel 2004 (foto Belò, in alto). Foto prese dalle pendici del Mitre Peak

Conclusioni

L'analisi dei dati ottenuti sul campo e dalle immagini satellitari del Ghiacciaio Baltoro in Karakorum ha permesso di delineare le caratteristiche morfologiche e geometriche generali di questo *sistema-ghiacciaio* che è uno dei più vasti della Terra. Il Baltoro è costituito da numerosi apparati tributari che rendono complesso determinare parametri glaciologici fondamentali come il bilancio di massa. Il flusso principale è comunque costituito dal settore più elevato del ghiacciaio al di sopra del Circo Concordia, che ne influenza la dinamica complessiva fino alla fronte. Il confronto dei dati di velocità superficiale ottenuti sul terreno durante la stagione estiva e quelli medi annui ottenuti dalle immagini da satellite indicano che le prime sono all'incirca il doppio rispetto alle seconde, un divario relativamente ridotto rispetto, ai ghiacciai alpini. Questo suggerisce che il flusso del Baltoro durante la stagione invernale sia caratterizzato non solo da deformazione plastica ma anche da scivolamento basale, a causa del notevole spessore di ghiaccio (sino a 900 m presso Concordia) che probabilmente permette la presenza di acqua allo stato liquido alla base del ghiacciaio anche durante l'inverno. L'analisi di immagini fotografiche attuali e storiche e le misurazioni delle fluttuazioni della fronte fanno ritenere che il Ghiacciaio Baltoro sia stato abbastanza stabile durante gli ultimi 100 anni. A differenza di alcuni *surging glacier* presenti nella regione, come il Liligo ed alla generale recessione che interessa gli apparati di tutto il globo (Haeberli et alii, 1999; Beniston, 2003), questo ghiacciaio sembra reagire in modo molto lento ai fattori forzanti di tipo climatico grazie alla protezione della consistente copertura detritica superficiale, che si estende sin quasi a raggiungere il bacino di accumulo.

Bibliografia

- Beniston M. (2003), "Climatic change in mountain regions: a review of possible impacts" *Climatic Change*, 59, 5–31
- Dainelli G., (ed) (1924-1932), "Relazione Scientifiche della Spedizione Italiana de Filippi, nell'Himalaia, Caracorum e Turchestan Cinese (1913-1914)". *Serie II, Risultati geologici e geografici*, 12, Nicola Zanichella, Bologna
- Desio A., Marussi A., Caputo M. (1961), "Glaciological Research of the Italian Karakorum Expedition 1953-1955", *International Association of Scientific Hydrology*, 54, General Assembly of Helsinki 1960 – Snow and Ice, 224-232
- Haeberli W., Frauenfelder R., Hoelzle M. and Maisch M. (1999), "On rates and acceleration trends of global glacier mass changes", *Geografisker Annalis*, 81A, 585-595.
- Spoletto, H.R.H. (1930), "The Italian Expedition to the Karakorum in 1929", *Geographical Journal*, 75(5), 385-401