

SPEDIZIONE SUL MONTE EVEREST

LE TECNICHE DEL RILEVAMENTO APPLICATE IN ALTA QUOTA

di Giorgio Vassena*

L'inizio di una ricerca scientifica è come l'inizio di un avventuroso viaggio ricco di incognite e di imprevisti. Quello che si descrive in questo articolo vuole essere un resoconto di questo viaggio, delle motivazioni scientifiche che l'hanno originato, delle tematiche ad esso connesse e più ancora la cronaca diretta di una spedizione il cui terreno di ricerca è l'Himalaya con i suoi remoti ghiacciai, i suoi laghi, i suoi sentieri e la sua gente.

Le ricerche di seguito descritte hanno avuto inizio nel 1997, quando due studenti della Facoltà di Ingegneria del Politecnico di Milano, durante il corso di Topografia, incontrano un giovane dottorando nella materia; nasce un'amicizia dettata dal comune interesse per la montagna, per il rilevamento e più in generale da una passione nell'indagare gli aspetti sempre stupefacenti della realtà che ci circonda. Nei mesi seguenti si aggrega al gruppo un esperto glaciologo e già nel 1998 viene organizzata una prima spedizione scientifica in Himalaya. Da quell'anno, grazie anche al fatto che il dottorando intanto diventa docente presso l'Università di Brescia, ha inizio un programma scientifico sempre più impegnativo nelle aree del Parco Nazionale del Monte Everest, che ha visto l'effettuazione di sei ulteriori spedizioni scientifiche a cui hanno partecipato numerosi studenti del Politecnico di Milano, tesisti, docenti e ricercatori universitari.

Oltre alle ricerche presso il ghiacciaio Changri Nup, posto alle pendici del Monte Everest, l'Università degli Studi di Brescia, in collaborazione con l'Associazione Ambientalista *L'Umana Dimora* e il Comitato Ev-K2-CNR, è impegnata nei programmi di realizzazione del Sistema Informativo Territoriale del Parco Nazionale Sagarmatha, del rilevamento con GPS del grafo primario della sentieristica all'interno del Parco e nel monitoraggio delle deformazioni dello sbarramento moreno-glaciale che forma il lago Imja Tcho, sotto le pendici della parete sud del Lothse.

*Università degli Studi di Brescia, Dipartimento di Ingegneria Civile. Membro della Associazione Ambientalista *L'Umana Dimora*.

Il logo della spedizione 2000, realizzato dai grafici dello sponsor *TXT e-solutions*.



In generale, lo studio dei ghiacciai nasce dall'interesse scientifico di monitorare un elemento fondamentale del paesaggio montano, fonte di importanti riserve idriche e in grado di modificare, con la sua continua evoluzione, l'ambiente di importanti porzioni di territorio. Il regresso delle masse glaciali nell'ambiente alpino, registrato negli ultimi anni, pone una serie di interessanti interrogativi, in particolare relativi all'entità del ritiro e alla stima del tempo di sopravvivenza dei singoli ghiacciai. La comunità scientifica cerca inoltre di comprendere se i fenomeni a cui stiamo assistendo siano limitati nel tempo e di tipo locale, se riguardino cioè solo un settore delle Alpi o tutto l'arco alpino e se siano rilevabili anche in altre catene montuose.

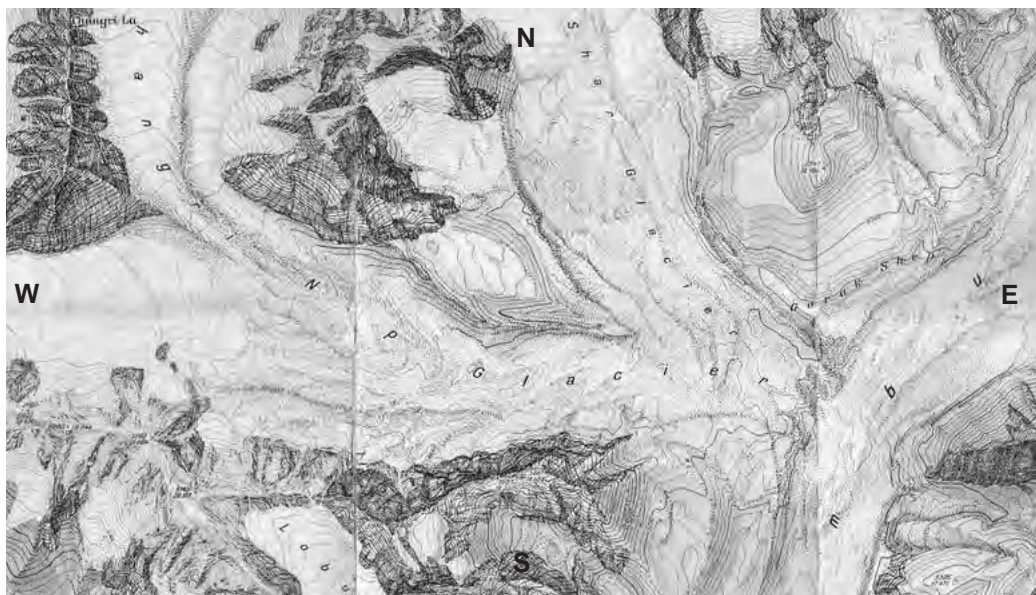
La *Changri Nup Glacier Monitoring Expedition* ha studiato l'evoluzione dei ghiacciai himalayani, ricorrendo all'impiego e sviluppo di moderne e innovative tecnologie di rilevamento, tramite *Global Positioning System* (GPS), che permettono di giungere a risultati altrimenti non conseguibili attraverso l'uso della topografia classica. Per questo intendiamo presentare le potenzialità del metodo e le soluzioni tecnologiche che è necessario introdurre per poter operare con efficacia anche in ambienti estremi come quelli che si incontrano nei ghiacciai posti in alta quota.

Il ghiacciaio Changri Nup

Il ghiacciaio Changri Nup, principale oggetto delle ricerche qui descritte, si trova all'interno del Parco Nazionale Sagarmatha, che è il nome nepalese del Monte Everest. Esso si sviluppa approssimativamente tra le quote di 5 200 e 5 700 metri e, come si vede nell'immagine riportata nella pagina successiva, confluisce nel ghiacciaio Khumbu che proviene direttamente dalle pendici del Monte Everest (versante Nepalese). Tuttavia, la confluenza tra il Changri Nup e il Khumbu non è certa, in quanto lo strato di detriti della parte meridionale è così spesso da mettere in dubbio la presenza di ghiaccio nella parte sottostante del ghiacciaio stesso. La superficie coperta da detrito è in generale caratterizzata da numerosi affioramenti di ghiaccio e appare notevolmente irregolare: gli ammassi di detrito misto a ghiaccio raggiungono anche i 30-40 metri di dislivello. In alcune zone si formano inoltre ampi laghi, che aumentano di dimensione con l'avanzare della fusione del ghiaccio. Il Changri Nup è un ghiacciaio di dimensioni limitate, circa 3 chilometri quadrati, che si presta particolarmente a studi scientifici grazie alla morfologia semplice e per la vicinanza alla cosiddetta *Piramide*, il laboratorio di ricerca d'alta quota del Consiglio Nazionale delle Ricerche Italiano situato a 5 050 metri di quota.

Spedizione 1998.
Gaetano Carcano in movimento lungo il settore di ghiacciaio coperto da detrito
(Foto di Giorgio Vassena)





Nella parte meridionale, il Changri Nup è caratterizzato da una lunga lingua (di circa 3 chilometri) la cui sezione trasversale è dell'ordine di 800 metri nella parte bassa e si allarga gradualmente procedendo verso le quote superiori in direzione Ovest. Alla quota di circa 5 400 metri il ghiacciaio è costituito dai suoi due bacini di accumulo.

Quello posto in direzione Nord, di dimensioni maggiori, è ancora oggi collegato alla parte inferiore; procedendo verso le quote più elevate, la superficie di questo bacino si libera gradualmente dal detrito, fino a scoprire completamente il ghiaccio sottostante. In questa zona si verifica un gran numero di frane e valanghe dalle ripide pendici dei monti che attorniano il ghiacciaio.

È dunque ipotizzabile che gran parte del detrito che attualmente ricopre il ghiacciaio «nero» abbia origine da questa regione. Durante

la permanenza per le misurazioni si sono osservate continue e frequenti scariche di detrito e di neve dalle pendici adiacenti il ghiacciaio. Ciò ha comportato l'impossibilità di effettuare misurazioni topografiche in molte zone del ghiacciaio, a causa dell'oggettiva pericolosità.

Il secondo bacino di accumulo muta al contrario bruscamente tipologia e si trasforma in ghiacciaio «bianco», cioè assolutamente scoperto da detrito e dunque, come i comuni ghiacciai alpini, è caratterizzato da una superficie uniforme che, in alcuni punti, si presenta densamente crepacciata.

Cartografia del ghiacciaio in scala 1:25 000 realizzata nel 1957 dall'*Austrian Alpenverein*, in collaborazione con E. Schneider e F. Ebster dell'Università di Monaco e con la collaborazione di P. Aufshneider, ingegnere civile che ha trascorso diversi anni in Himalaya.

Spedizione 1998. Fronte bianca dalla morena del ghiacciaio. Sulla destra la cima Pampuri, scalata per acquisire immagini del ghiacciaio. (Foto di G. Vassena)



Fin dal 1994, ricercatori che fanno riferimento al settore glaciologia del progetto Ev-K2-CNR, coordinato da Claudio Smiraglia del Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Milano, avevano effettuato misurazioni di posizione della fronte di questo settore del ghiacciaio, che d'ora in avanti sarà denominato «parte bianca», oltre a effettuare rilevamenti di carattere più prettamente glaciologico, quali l'analisi della densità e temperatura del nevato, l'entità dell'ablazione stagionale, l'analisi delle caratteristiche chimiche del nevato.

La spedizione del 1998 ha potuto verificare il definitivo distacco di questa parte del ghiacciaio dal corpo principale proveniente dal bacino di accumulo posto in direzione Nord che, scendendo a quote inferiori, si trasforma in ghiacciaio detritico.



Spedizione 1998.
Misurazione della posizione
della fronte del ghiacciaio
mediante stazione totale
(Foto di G. Carcano)

La presenza di una continuità storica di misurazioni di posizione della fronte del ghiacciaio è fonte di notevole interesse, essendo assai rare esperienze di tipo analogo che vedono misurazioni ripetute con regolarità su ghiacciai Himalayani. Tali misurazioni, negli anni precedenti il 1998, sono state effettuate impiegando le classiche metodologie di rilevamento utilizzate in campo glaciologico, che prevedono la segnalazione su massi stabili di segnali di riferimento e dunque, con cadenza annuale, la misurazione tramite rotella metrica e bussola della posizione della fronte del ghiacciaio.

Dare continuità a tali misurazioni applicando le moderne metodologie di rilevamento topografico è dunque stato uno degli scopi delle due spedizioni scientifiche qui descritte.

Prima di esse poco o nulla si conosceva circa l'entità dell'ablazione del ghiacciaio, sia nella sua parte bianca che nella parte coperta da detrito. Anche per ciò che riguarda la velocità di scorrimento verso valle del ghiacciaio non erano mai state effettuate misurazioni in grado di fornire almeno l'ordine di grandezza di tali movimenti. Sussisteva comunque l'ipotesi che, per lo meno nella parte inferiore del ghiacciaio, lo scorrimento fosse praticamente nullo e che lo strato di detrito riuscisse solo a preservare dallo scioglimento il ghiaccio sottostante. Si ipotizzava dunque che il bacino di alimentazione non fosse più in grado di fornire una pressione sufficiente alla lingua detritica tale da determinarne uno spostamento verso valle.

La ricerca sul Changri Nup

L'obiettivo principale della ricerca è stato quello di studiare le metodologie di rilevamento più adeguate allo studio del ghiacciaio. Le cinque spedizioni, che si sono svolte negli anni dal 1998 al 2002, hanno avuto molteplici obiettivi: realizzare con GPS una rete topografica di inquadramento materializzata in posizioni stabili intorno al ghiacciaio,

in grado di fornire un valido supporto per le operazioni topografiche di misura; studiare mediante GPS la velocità di scorrimento verso valle del ghiacciaio e misurare la posizione della fronte del ghiacciaio «bianco». Gli obiettivi della ricerca sono stati tutti raggiunti e di seguito viene fornita una sintesi delle metodologie che sono state impiegate per ottenerli.

Il sistema satellitare GPS

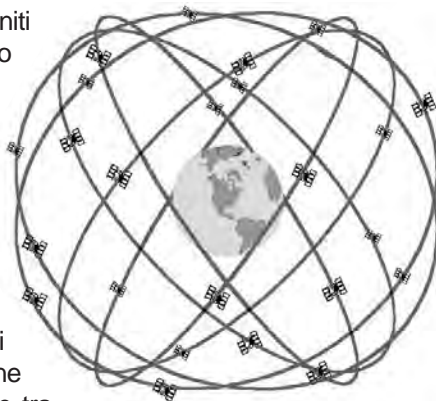
Il sistema satellitare GPS è una moderna tecnologia che permette di posizionare un punto in qualsiasi parte del globo, con qualsiasi condizioni meteorologica e in qualsiasi luogo, elaborando il segnale proveniente da una costellazione di satelliti. Questo sistema è nato durante la guerra del Vietnam per consentire ai militari americani di determinare la propria posizione con buona precisione e senza essere individuati dal nemico. A tal fine il sistema GPS si basa su antenne in grado di ricevere segnali da satellite, senza la necessità di emettere a sua volta alcun tipo di segnale; tale sistema è stato reso disponibile per usi civili a partire dagli anni Ottanta ed è ora di vastissimo impiego.

Questa metodologia permette di determinare la posizione relativa tra i centri di fase delle antenne attraverso la ricezione di segnali provenienti dai satelliti in orbita a una quota di circa 20 000 chilometri, e posizionati lungo tre orbite inclinate di circa 55 gradi sul piano equatoriale. La Russia possiede un sistema analogo, anche se con un numero assai minore di satelliti, denominato *GLObal Navigation Satellite System* (GLONASS), mentre l'Europa sta avviando un programma che prevede la messa in orbita di una costellazione di satelliti, compatibili con il GPS, che prenderà il nome di Galileo.

Il sistema GPS è costituito da tre distinti componenti definiti «segmenti»: il segmento spaziale, il segmento di controllo e il segmento utente. Il segmento spaziale si riferisce alla costellazione di satelliti e alle informazioni navigazionali a essa collegate, cioè alla loro posizione in ogni istante. La costellazione attuale, rappresentata nell'immagine a lato, è in continua evoluzione e aggiornamento; essa è composta da 28 satelliti ed è studiata in maniera tale che da ogni posizione sulla terra siano visibili almeno quattro satelliti contemporaneamente.

Il segmento di controllo è costituito da tutte quelle stazioni a terra che seguono e controllano di continuo la posizione dei satelliti, in questo modo l'informazione che il satellite trasmette al ricevitore riguardo la propria posizione può essere continuamente aggiornata ottenendo una stima accurata della posizione.

La stazione di controllo principale è situata nella base dell'aviazione americana di Falcon in Colorado. Le altre stazioni di controllo sono sparse in tutto il globo.



La costellazione satellitare *NAVIGATION SATellite TIMING AND RANGING GLOBAL POSITIONING SYSTEM* (NAVSTAR GPS)

Il segmento utente è costituito dall'utilizzatore con il proprio o i propri apparati di ricezione; per utilizzare il segnale satellitare non occorre pagare alcun abbonamento, ma unicamente provvedere all'acquisto degli strumenti di ricezione. La tecnologia GPS è nota al grande pubblico in quanto viene impiegata in modo diffuso nella sua applicazione navigazionale, che permette a ogni utente dotato di ricevitore GPS di conoscere la propria posizione, rispetto all'ellissoide di riferimento, in tempo reale, con accuratezze dell'ordine di 5-10 metri.

Le applicazioni professionali in campo topografico prevedono, al contrario, la determinazione della posizione relativa tra i centri di fase delle antenne con accuratezze centimetriche. Per effettuare tale determinazione in relativo, secondo l'approccio definito «statico», è necessario che uno o più ricevitori GPS registrino contemporaneamente, per un periodo variabile tra 15 e 60 minuti, il segnale proveniente da almeno quattro satelliti. Il dato elaborato successivamente permetterà di calcolare il valore della «base GPS», cioè delle componenti spaziali del vettore che unisce i centri di fase delle antenne.

Una seconda metodologia, identificata come *Real Time Kinematic* (RTK) o Posizionamento Cinematico In Tempo Reale, prevede che un ricevitore GPS master sia posizionato su un vertice a coordinate note, mentre un secondo ricevitore GPS rover si muove sul territorio. Tramite un collegamento radio, la stazione master invia una serie di informazioni al ricevitore mobile (rover) che, in questo modo, è in grado di determinare la propria posizione, con accuratezze centimetriche, in tempo reale. È noto che i ghiacciai non sono un elemento statico, ma si spostano sotto la spinta del ghiaccio posizionato nel bacino di accumulo posto a monte; grazie alla possibilità data dal

Real Time Kinematics RTK

Tecnica per l'individuazione in tempo reale della posizione di un punto mobile (2) rispetto ad una stazione fissa (1)

Il vettore b viene calcolato in tempo reale durante lo spostamento dell'operatore in 2

È necessario il collegamento radio-modem tra i due ricevitori



Schema di una misura GPS in modalità RTK

GPS di misurare con precisione la posizione relativa tra punti, è anche possibile misurare la variazione di posizione tra un punto fisso esterno al ghiacciaio e alcuni vertici posti sul ghiacciaio stesso. Così facendo è possibile stimare, alle diverse quote, la velocità di scorrimento verso valle della massa glaciale, la variazione di posizione della fronte e l'entità della fusione della massa glaciale.

È dunque evidente la necessità di individuare, all'esterno del ghiacciaio, in posizioni stabili, vertici in corrispondenza dei quali posizionare le stazioni GPS master; per poter poi misurare, con ricevitori rover, la variazione di posizione di capisaldi materializzati fisicamente su massi presenti sul ghiacciaio. L'operazione di monitoraggio delle deformazioni di un ghiacciaio deve prevedere in primo luogo l'esecuzione di

misurazioni GPS in modalità statica per calcolare la posizione dei vertici «fissi» all'esterno della massa del ghiacciaio. Poi successive rilevazioni in modalità cinematica per misurare gli spostamenti dei vertici di riferimento che giacciono sulla superficie glaciale.

L'enorme pregio del sistema GPS in ambito montano, se raffrontato agli altri sistemi di posizionamento di tipo topografico, è la possibilità di determinare la posizione relativa tra vertici posti anche a chilometri di distanza e non visibili uno con l'altro.

La rete topografica d'inquadramento

Per la definizione della rete di inquadramento del ghiacciaio si è optato per l'utilizzo di strumentazione satellitare GPS. La scelta è stata dettata da alcune semplici considerazioni. Le misurazioni mediante stazioni totali sono vincolate alla visibilità tra i vertici della rete stessa. Per applicazioni in ambiente himalayano, questo costituisce un vincolo troppo restrittivo che, in pratica, ne limita fortemente l'utilizzo. La campagna di misurazioni ha in primo luogo, per ovvi motivi sia di costi che di resistenza fisica degli operatori al lavoro in alta quota, dei limiti temporali ben precisi. In caso di mal tempo, come d'altro canto è accaduto durante le spedizioni, l'attività di misurazione risulterebbe bloccata, con elevate probabilità di insuccesso della campagna di misurazione stessa. Inoltre, dovendo operare con vertici visibili reciprocamente, il numero di misurazioni dovrebbe aumentare notevolmente, in condizioni operative molto difficili. Si deve infatti considerare che i tempi di trasferimento lungo il ghiacciaio (sia nella parte detritica che nella parte bianca) possono essere assai lunghi, a causa del terreno accidentato e in particolare a causa della difficoltà di muoversi con rapidità a quote sempre superiori ai 5 000 metri. La mancanza di una sufficiente documentazione fotografica del ghiacciaio, ma in particolare il fatto che non esisteva memoria di qualcuno che avesse percorso o attraversato il ghiacciaio, se non per giungere alla fronte bianca prima citata, non ha permesso nella fase di preparazione della prima spedizione, effettuata nell'autunno del 1998, una adeguata programmazione delle operazioni di misura e di definizione certa della posizione in cui materializzare i vertici della rete. Non era infatti definibile *a priori* la posizione in cui era realizzabile un campo base sulla superficie del ghiacciaio (da cui dipende la possibilità di raggiungere in giornata il vertice da misurare) ma soprattutto non era verificabile *a priori* la percorribilità del ghiacciaio stesso.

Gli unici supporti cartografici disponibili sono infatti la carta in scala 1:25 000 edita nel 1957 (di cui l'immagine a pagina 9 presenta uno stralcio) e la carta in scala 1:50 000 del 1988, totalmente inadeguate allo studio di possibili percorsi sul ghiacciaio.

Quando, durante la prima spedizione, il 30 settembre 1998, si ebbe finalmente la possibilità di osservare dall'alto di una morena il ghiac-

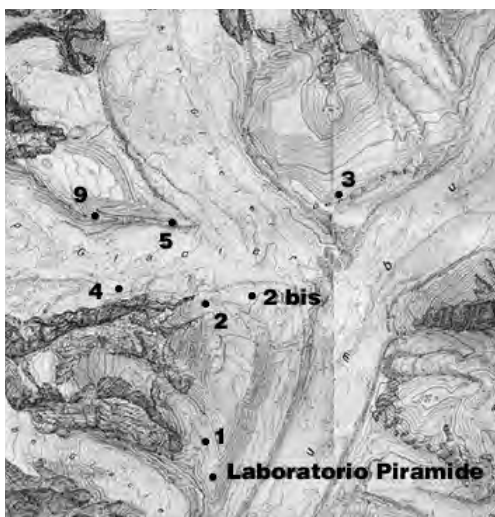
Il Laboratorio Piramide



ciaio, il progetto di rete che era stato ideato fu totalmente rivisto, in funzione di quanto osservato nella realtà.

Sempre il giorno dell'arrivo alla *Piramide*, il laboratorio in alta quota gestito dal comitato Ev-K2-CNR, fu possibile verificare che il vertice fondamentale della rete topografica misurata nel 1992 da Giorgio Poretti dell'Università di Trieste, determinato in coordinate WGS84 (cioè il *datum* di riferimento utilizzato dal GPS) e inserito nella rete topografica utilizzata per la misura della quota del Monte Everest, era ben conservato e facilmente rintracciabile anche grazie alle precise monografie che ne descrivevano la posizione, poco distante dal laboratorio *Piramide*. L'esistenza di tale vertice era indispensabile per determinare le coordinate assolute di tutti i rimanenti vertici della nuova rete, in quanto, come abbiamo ricordato, le misure GPS non possono fornire misure accurate in termini di coordinate assolute ma solo in termini di coordinate relative.

La rete è stata misurata nel periodo compreso tra il 30 settembre 1998 e l'11 ottobre 1998 ed è risultata composta da 9 vertici di rete materializzati tramite chiodi a espansione su massi scelti in quanto situati in posizioni stabili (alcuni riportati nell'immagine a lato). L'obiettivo di raggiungere accuratezze di posizionamento dell'ordine di 2-3 cm in planimetria e 4-5 cm in quota è stato raggiunto.



Il tempo di stazionamento per la misura delle basi è stato scelto in 45 minuti, per avere garantita la risolvibilità della base, a prescindere da eventuali disturbi di *multipath* o di perdita di segnale, e non avendo inoltre esperienza in misurazioni di segnale GPS in alta quota. L'angolo di *cut off* è stato impostato a 15°, il tempo di campionamento a 15 secondi e il GDOP massimo uguale a 6. In alcuni casi però, a causa delle condizioni ambientali particolarmente avverse o a causa dell'intenso freddo non sopportabile dal portatore di accompagnamento ai ricercatori (spesso protetto dal freddo solo grazie ad indumenti di fortuna forniti dai ricercatori stessi), si è preferito ridurre, in alcuni casi isolati, i tempi di acquisizione a circa 30 minuti.

Lo scarto quadratico medio sulle coordinate dei vertici è stato valutato attraverso una compensazione a minimi quadrati (a minimo vincolo). Non si è vincolato un vertice baricentrico alla rete, essendo l'unico vertice noto in coordinate (vertice 1) posto al margine della rete stessa. La compensazione ai minimi quadrati è stata dunque effettuata, a minimo vincolo. A fronte di un sigma zero *a priori* uguale a 1 si è ottenuto un sigma *a posteriori* pari a 1,493. Lo scarto quadratico medio massimo per i vertici della rete è risultato di 13 mm in planimetria e di 28 mm in quota. Lo scarto quadratico medio dei vertici della rete è stato influenzato anche dalle difficoltà incontrate nella messa in stazione con accuratezza dell'antenna GPS. A riguardo si rimanda alla descrizione della strumentazione impiegata nelle campagne di misurazione ed in particolare alla descrizione della metodologia di «messa in stazione» del ricevitore GPS effettuata con un metodo alternativo al treppiede. D'altro canto le condizioni ambientali in cui si è dovuto operare, oltre alla difficoltà nel trasporto della strumentazione, hanno reso improponibile l'uso diffuso dei treppiedi topografici.

Di seguito, nella tabella, vengono riportati i risultati della compensazione a minimi quadrati della rete di inquadramento realizzata nella prima spedizione del 1998.

Punto	Lon	Lat	H ell.	Sqm Est	Sqm Nord	S q m
H	[° ' '']	[° ' '']	[m]	[mm]	[mm]	[mm]
1	E86° 48' 47.06415''	N27° 57' 31.77626''	4993.295	0.0	0.0	0.0
2	E86° 48' 46.02673''	N27° 58' 21.33198''	5243.657	7.5	9.9	22.3
2 bis	E86° 49' 00.97784''	N27° 58' 15.91348''	5199.133	9.0	8.9	24.0
3	E86° 49' 37.32509''	N27° 58' 58.63044''	5222.338	8.9	10.1	23.1
4	E86° 48' 41.15672''	N27° 58' 23.37674''	5206.048	5.3	7.1	16.9
5	E86° 48' 40.66061''	N27° 58' 46.00797''	5245.961	7.1	8.8	23.9
6	E86° 46' 45.45067''	N27° 59' 09.86228''	5487.340	10.5	13.1	28.4

Le coordinate compensate e gli scarti quadratici medi dei vertici sono nel sistema di coordinate geografiche WGS84 riferito al vertice 1 noto in tale sistema (punto Poretti).

Le quote dei vertici sono riferite alla superficie dell'ellissoide del sistema WGS84, non essendo a tutt'oggi disponibile una stima accurata del geoide nella zona che permetterebbe di fornire l'esatto valore della quota sul livello medio del mare.

A riguardo si tenga però in considerazione che per ciò che riguarda la misura delle deformazioni e degli spostamenti, è importante che il riferimento rimanga fisso nel tempo. L'impiego di quote riferite al geoide - piuttosto che all'ellissoide di riferimento - non incide in alcun modo nel calcolo delle deformazioni.

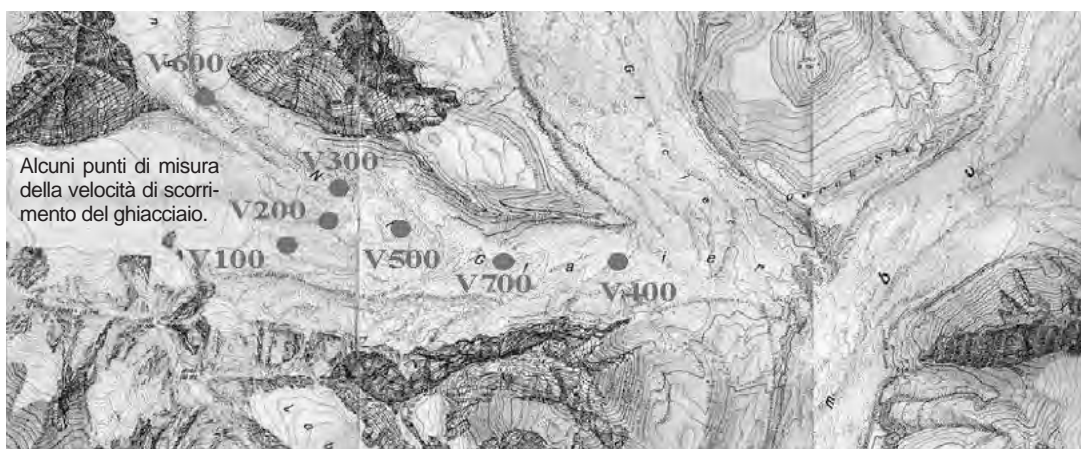


Spedizione 1998 quota 5 500 metri. Immagine del vertice di stazione 6 durante le operazioni di misurazione statica. Sullo sfondo a sinistra il monte Everest (Foto di Giorgio Vassena)

La velocità di scorrimento del ghiacciaio verso valle

Un parametro assai significativo dello stato di salute di un ghiacciaio è la sua velocità di scorrimento verso valle. La fronte della massa glaciale, posta a quote relativamente basse rispetto alla zona di accumulo, posizionata più in quota e dunque teoricamente meno soggetta a fenomeni di fusione, dovrebbe essere di continuo alimentata dalla massa glaciale proviente da monte. Più il ghiacciaio è in buona salute, più la velocità di scorrimento verso valle è alta e dunque l'apparato glaciale può mostrare un'avanzamento della posizione della fronte.

Le cinque spedizioni, nei diversi anni, hanno provveduto a misurare con cadenza annuale la posizione di alcuni vertici posti su massi che giacciono sulla superficie del ghiacciaio nero. I massi si muovono in modo solidale con il ghiaccio sottostante e permettono dunque di stimare la velocità di scorrimento di quest'ultimo.



Alcuni punti di misura della velocità di scorrimento del ghiacciaio.



Spedizione 1998. Stazionamento del ricevitore GPS in corrispondenza del vertice V700 materializzato in corrispondenza di un masso affiorante presso il campo base (Foto di Giorgio Vassena)

Le velocità di scorrimento verso valle dei vertici mostrati nell'immagine, è osservabile nelle tabelle alla pagina seguente.

Il vertice V600, posizionato nella parte alta del ghiacciaio nero (cioè ricoperto da detrito), ha ancora una certa velocità di scorrimento, stimata in circa 4-5 metri all'anno.

Scendendo verso valle questa velocità decresce però rapidamente e quando si raggiungono le parti centrali e basse del ghiacciaio lo scorrimento diventa praticamente nullo, sinonimo che la «potenza» del ghiaccio presente nella zona di accumulo non

è assolutamente più in grado di alimentare la parte inferiore dell'apparato glaciale. Il ghiaccio presente sotto lo strato di detrito, nell'intorno dei vertici V500, V700 e V400 deve dunque la sua presenza unicamente al fatto che il detrito, spesso anche 1-2 metri, svolge una funzione di isolante termico preservando il ghiaccio da una rapida fusione. Questo fenomeno fa sì che le parti più a monte del ghiacciaio, come la parte bianca del Changri Nup, posizionata nella lingua a Ovest dei vertici V100, V200 e V300, non risulta nemmeno più in contatto con la parte sottostante coperta da detrito. Il ghiaccio scoperto ha infatti subito una fusione più rapida della lingua coperta da detrito che un tempo contribuiva ad alimentare.

Le misurazioni di seguito descritte del ritiro nel tempo della fronte bianca del ghiacciaio, si riferiscono proprio a quel settore del Changri Nup che si osserva nelle immagini alle pagine nove e dieci.



Spedizione 1999.
Giorgio Vassena impegnato nelle operazioni di materializzazione del chiodo di riferimento sul vertice «di velocità» V300 posto nella parte medio-alta del ghiacciaio (Foto di Simone Radovan)

SPOSTAMENTI ALTIMETRICI

	V100	V200	V300	V400	V500	V600	V700
2001/2002	0,59	0,11	0,80	0	PERSO	1,22	0
2000/2001	---	0	0,57	0	PERSO	0,78	0
1999/2000	---	0	-0,42	0	PERSO	2,15	0
1998/1999	---	---	---	0	PERSO	0,17	0

Spostamenti altimetrici di alcuni punti di controllo della velocità di scorrimento del ghiacciaio

SPOSTAMENTI PLANIMETRICI (m)

	V100	V200	V300	V400	V500	V600	V700
2001/2002	0,21	0	1,47	0	PERSO	4,57	0
2000/2001	---	0	1,22	0	PERSO	4,48	0
1999/2000	---	0	1,13	0	PERSO	4,22	0
1998/1999	---	---	---	0	PERSO	5,51	0

Spostamenti planimetrici di alcuni punti di controllo della velocità di scorrimento del ghiacciaio

La misurazione della posizione della fronte bianca

Spedizione 1998. Matteo Sgrenzaroli misura la posizione della fronte bianca. Si osserva un piccolo ma netto distacco tra la fronte bianca e la morena detritica del ghiacciaio nero.



Spedizione 1999. Stefano Capitanio e Simone Radovan durante le operazioni di misura in RTK in prossimità della fronte bianca (5300 metri di quota) (Foto di Giorgio Vassena)



Dal 1994 squadre di glaciologi provenienti dal laboratorio *Piramide* avevano controllato la posizione della fronte bianca situata a circa 5 300 metri di quota, lungo il settore del ghiacciaio Changri Nup che si svolge verso Ovest. Dal 1998 tali misurazioni sono state «riprese» dai rilevatori delle *Spedizioni Changri Nup* potendo in questo modo ricostruire una serie storica di misurazioni di grande interesse.

Nell'immagine a lato si nota il cumulo di detriti facente parte del settore di ghiacciaio nero proveniente da Nord. Il settore Sud

della fronte ha mostrato nel periodo 1994-2002 un arretramento di ben 180 metri; il settore Nord, più protetto dai raggi solari grazie alla *Cima Pampuri* che lo sovrasta, mostra un arretramento più contenuto e pari, sul medesimo periodo temporale, a 84 metri.

La tabella sottostante mostra gli arretramenti dal 1994 a oggi in corrispondenza delle tre sezioni della fronte bianca del ghiacciaio.

ARRETRAMENTO DELLA FRONTE DEL GHIACCIAIO (metri)

	SEZ A	SEZ B	SEZ C
1994 / 1995	16	15	15
1995 / 1996	-3	1	23
1996 / 1998 biennale	35	31	73
1998 / 1999	33	35	12
1999 / 2001 biennale	-3	73	30
2001 / 2002	6	12	27

Gli arretramenti su base annuale o biennale della fronte bianca del ghiacciaio Changri Nup

La strumentazione al seguito delle spedizioni

Il periodo complessivo di permanenza sul ghiacciaio è solitamente dell'ordine di 10-15 giorni. La struttura organizzativa prevede ovviamente l'impiego di uno *sherpa* addetto al coordinamento del lavoro dei portatori e all'organizzazione dei campi e di alcuni portatori, indispensabili nelle operazioni di allestimento dei campi e per il trasporto dei materiali. Essendo la zona in cui i ricercatori si muovono in gran parte inesplorata, non esistono al riguardo guide o sentieri da seguire e dunque i ricercatori devono avere anche spiccate doti di orientamento e un minimo di capacità alpinistiche, in particolare per percorrere in sicurezza la parte bianca del ghiacciaio densamente crepacciata. Tralasciando la descrizione dei particolari organizzativi di carattere prettamente logistico e alpinistico, ci si sofferma ora sulle caratteristiche tecniche della strumentazione al seguito della spedizione e sulle soluzioni tecnologiche adottate.

Le spedizioni sono dotate in primo luogo di ricevitori GPS in doppia frequenza, cioè in grado di registrare entrambe le frequenze GPS L1/L2. Ogni apparato GPS è dotato di cavetteria di emergenza, particolare questo che risulta spesso essenziale per l'effettuazione delle misure. Per lo stazionamento delle antenne GPS si è deciso di non ricorrere a treppiedi topografici, considerato l'eccessivo ingombro e il peso di tali apparati. Sono stati realizzati sostegni semplificati composti da un'asta in alluminio mantenuta in verticale da un treppiede fotografico. La sommità dell'asta termina con un filetto dal passo 5/8" che permette il fissaggio dell'antenna ricevente o l'aggiunta di un'ulteriore asta di prolunga. Una livella sferica può venire agganciata all'asta per la sua messa in verticale e la struttura è progettata per poter essere ancorata al terreno mediante tiranti nel caso si debba operare in condizioni atmosferiche particolarmente avverse.

Le spedizioni sono dotate di numerose batterie al piombo di 12 A/h - 12 volt e di batterie d'emergenza sempre a 12 volt ma di 7 A/h, portate con sé dai ricercatori e utilizzate nel caso di scarica accidentale delle batterie delle radio ricetrasmittenti o delle batterie dedicate al funzionamento dei ricevitori GPS. La ricarica delle batterie è garantita da numerosi pannelli solari trasportabili mentre la carica della strumentazione funzionante a 220 volt è garantita da *inverter* alimentati dalle batterie stesse. La resa in quota dei pannelli solari è ottima, per cui anche con condizioni atmosferiche avverse la ricarica delle batterie è garantita. Le medesime batterie venivano impiegate per il funzionamento dei due computer portatili *Pentium* al seguito dei ricercatori.

Per la gestione della connessione radio tra la stazione master e la stazione rover nelle misurazioni in RTK, si sono adottati *radio modem* funzionanti a una frequenza di 408 200 Mhz e impiegando per la trasmissione del segnale le antenne omnidirezionali 1/2 comunemente commercializzate con questi apparati di comunicazione.



Spedizione 1999. Immagine del ponte radio attivo presso il campo base. Si osserva in primo piano un modem, appoggiato alla batteria e con a fianco l'antenna omnidirezionale per la trasmissione della correzione differenziale nelle misurazioni con GPS in RTK. Sullo sfondo il monte Pumori (7100 metri).

Una vista d'insieme del ghiacciaio

Le spedizioni sfruttano come base logistica il laboratorio *Piramide* e si organizzano in due campi operativi. Il primo, denominato campo base, alla quota di 5150 metri sulla parte mediana del ghiacciaio nero, è impiegato durante le operazioni di rilevamento della parte bassa e mediana del ghiacciaio.

Tale campo, composto da numerose tende è sempre attivo e abitato dallo *sherpa* e dai portatori. Il secondo campo, denominato avanzato, è posto alla quota di 5300 metri, in prossimità della fronte bianca del ghiacciaio e del vertice di stazione 8.

Sia nel 1999 che nel 2000 alcuni membri della spedizione si sono recati sulla vetta che domina il ghiacciaio dedicandola a San Pampuri (5960 metri di quota). L'obiettivo era quello di portare sulla sommità del picco, ottimamente osservabile dalle cartografie in nostro possesso, un ricevitore GPS in modo da permettere, almeno in maniera approssimativa, il trasporto delle coordinate dal sistema cartesiano locale al sistema cartografico. Ulteriore scopo della scalata era quello di acquisire immagini del ghiacciaio dall'alto. Purtroppo la grande quantità di neve instabile, trovata a poche decine di metri dalla cima non ne ha permesso il raggiungimento. Il ricevitore GPS era stato in precedenza già lasciato in posizione sicura lungo il percorso di salita, in quanto quest'ultima era inagibile per l'eccessiva quantità di neve e si era proseguito con una facile ma faticosa scalata in quota.

Spedizione 1999.
La vista del ghiacciaio da
quota 5900 metri.



La scalata ha comunque permesso di acquisire alcune interessanti immagini del ghiacciaio Changri Nup, evidenziando i settori di cui esso è composto: una parte alimentata da valanghe di accumulo, una parte centrale di forma triangolare, addossata alla parte bianca, oramai libera dai ghiacci e una parte centrale occupata dalla ancora potente lingua di ghiaccio coperto da detrito.

Conclusioni

Le spedizioni hanno mostrato con chiarezza come, anche in ambito himalyano, si è in un periodo di deciso arretramento da parte delle masse glaciali. Un confronto con le cartografie storiche mostra un abbassamento della lingua detritica valutabile in circa 30 metri, nell'arco di circa 50 anni. Il detrito che ricopre i grandi ghiacciai nepalesi svolge però un'importantissima opera di protezione del ghiaccio dai processi di fusione, che permette al ghiacciaio di sopravvivere. Questo processo di «autoprotezione» è osservabile anche in alcuni grandi ghiacciai alpini che stanno evolvendo in una forma di ghiacciaio nero. Il ghiacciaio è un interessantissimo sensore dei cambiamenti climatici; anche perché la risposta del «sistema ghiacciaio» alle variazioni del clima non è istantanea, ma mediata nel tempo e con un certo ritardo. In zone come l'Himalaya, l'osservazione e lo studio della storia degli apparati glaciali permette di risalire a una stima del clima del passato in tali zone.

La ricerca qui descritta, che avrà una continuazione con un programma triennale di ricerche tra il 2003 e il 2005, mostra inoltre come le tecniche moderne di rilevamento GPS permettano di ottenere conoscenze nuove su fenomeni ancora in gran parte poco studiati. L'applicazione della strumentazione in ambiente limite stimola anche la ricerca di nuove soluzioni tecnologiche, che possono avere interessanti ricadute nelle applicazioni di ogni giorno.

Le ricerche ora si svilupperanno in diverse direzioni. In primo luogo si intende verificare la possibilità di effettuare misurazioni tramite dati rilevati da satelliti (*Spot*, *Aster*, *Landsat*) e di rilevare settori di ghiacciaio tramite le tecnologie della scansione *laser*. Le spedizioni future renderanno dunque il ghiacciaio Changri Nup sempre più familiare ai rilevatori e ai glaciologici che lo studiano. ▽

Si ringraziano i membri delle spedizioni che si sono alternati tra il 1998 e il 2002; un particolare ringraziamento a Giacomo Casartelli, glaciologo, maestro e ispiratore della ricerca sul Changri Nup. Grazie a Claudio Smiraglia, sempre disponibile a fornire un aiuto in particolare mettendo a disposizione le sue conoscenze in campo glaciologico; grazie a tutto lo *staff* operativo presso il laboratorio *Piramide* e a tutto il personale del progetto Ev-K2-CNR. Grazie agli *sherpa* e ai portatori che ogni anno, con grande disponibilità, ci accompagnano in queste zone remote.

INDICAZIONI BIBLIOGRAFICHE

M. Cunietti e A. Marazio, *Rilievo fotogrammetrico della lingua terminale del ghiacciaio del Lys eseguito nell'agosto 1953*, Bollettino del Comitato Glaciologico Italiano, 2a serie, n. 6/1955.

A. Leick, *GPS Satellite Surveying*, John Wiley & Sons, New York 1995.

H. Rentsch, W. Welsch, C. Heipke, M. Miller, *Digital terrain models as a tools for glacier studies*, Journal of Glaciology, Vol. 36, No. 124, 1990.

H.H. Brecher e L.G. Thompson, *Measurements of the Retreat of Qori Kalis Glacier in the Tropical Andes of Peru by Terrestrial Potogrammetry*, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, Vol. 59, N. 6, June, 1993, pp. 1017-1022.

C. Heipke, H. Rentsch, M. Rentsch, Würländer, *The digital orthophoto map Vernagtferner 1990*, Zeitschrift für gletscherkunde und glazialgeologie, Band 30, Innsbruck 1994, pp. 109-117.

M. Rentsch, *Die orthophotokarte Vernagtferner 1979*, Zeitschrift für gletscherkunde und glazialgeologie, Band 18, Innsbruck 1982, pp. 109-117.

A. Caporali, S. Martin, *La rete italiana di stazioni GPS permanenti e il controllo delle deformazioni su scala regionale*, 3a Conferenza Nazionale ASITA (1999), Informazioni Territoriali e Rischi Ambientali, Vol. II, pp. 479-484.

A. Cina, P. Boccardo, A. Manzino, F. Ghidella, *Tecniche differenziali DGPS per il rilievo in tempo reale*, 3a Conferenza Nazionale ASITA (1999), Informazioni Territoriali e Rischi Ambientali, Vol. II, pp. 577-582.

A. Cina, *GPS*, Celid, Torino 2000.

Ulteriori informazioni, link, articoli scientifici sul sito: www.rilevamento.it o www.umanadimora.org