



L'altezza delle montagne. 24 maggio 2004: una nuova misura di quota del Monte Everest

di Giorgio Poretti *, Roberto Mandler **, Marco Lipizer *, 2004

* Università di Trieste - Dipartimento di Matematica e Informatica - CER Telegeomatica

** SOGEST Geofisica - Trieste

articolo pubblicato come "L'altezza delle Montagne" negli Atti del convegno CNR "Il K2 cinquant'anni dopo: la ricerca scientifica negli ambienti estremi" - dicembre 2004 - Ed. Il Veltro n.1-3 2005; come "Exakte Bestimmung des Mount Everest" nella rivista "Der Vermessungsingenieur", n.5 Oktober 2005 - Wiesbaden; e come "The height of mountains", nel "Bollettino di Geofisica Teorica e Applicata" - Ed. Ist. Naz. Ocean. Geof. Sperim. - Trieste, vol. 47, n.4, pp. 557-575, December 2006.

Introduzione

In questi ultimi anni si è sentito parlare spesso della *rimisurazione* di alcune delle montagne più celebri delle Alpi e dell'Himalaya con valori che, a dispetto della precisione millimetrica degli strumenti impiegati, presentavano differenze anche di un paio di metri.

Quali sono dunque le variabili che entrano in gioco in queste misure e come vanno valutate nel calcolo dell'altezza di una montagna?

L'altezza di una montagna è determinata da tre fattori principali. Il primo è legato alla presenza di neve sulla vetta. Questa varia di stagione in stagione e di anno in anno con una variazione che supera il metro tra primavera ed autunno. Il secondo dipende dalla precisione con cui sono state determinate le quote dei punti in valle dai quali vengono effettuate le misure. Il terzo fattore è dato dal livello del mare che si avrebbe sotto la cima se l'acqua potesse scorrere liberamente sotto i continenti, e quindi dal mareografo preso come riferimento. Così ad esempio le misure italiane delle Alpi si riferiscono al mareografo di Genova, mentre quelle dell'Ente Svizzero per la Geodesia e la Topografia si riferiscono ad una media tra il mareografo di Genova e quello di Bordeaux. Perciò le misure Italiane e quelle Svizzere hanno uno scarto costante di circa 20 centimetri.

È facile quindi intuire quanto maggiore possa essere la differenza tra il versante Cinese e quello Nepalese del Monte Everest i quali fanno riferimento al mareografo di Qingtao sul Mar Giallo e di Karachi sull'Oceano Indiano, che si trovano ad una distanza di oltre 6000 km. Questa differenza però è stata ridotta negli anni per mezzo di reti sempre più fitte e precise di livellazione e viene evidenziata dalle differenze di quota nei punti di confine.

Le nuove determinazioni del geode sotto la vetta dell'Everest

Le misure satellitari ottenute con ricevitori GPS o con emittenti DORIS forniscono le coordinate di un punto della Terra con riferimento alla sua superficie geometrica, un ellissoide, definito con parametri riconosciuti internazionalmente.

Le misure di quota invece fanno riferimento al "livello medio del mare" che viene approssimato da un'altra superficie, il geode, che rappresenta una superficie equipotenziale sulla quale si adagerebbero i mari e gli oceani se fossero omogenei, a temperatura costante e non perturbati da elementi atmosferici. Questa superficie viene determinata di quando in quando, per mezzo di misure di gravità e di deviazione della verticale, da enti nazionali (geode locale) o internazionali (geode globale). Essa è molto ben delineata sugli oceani e nelle zone continentali in cui le misure di gravità sono frequenti, mentre presenta notevoli lacune nelle zone montane o comunque remote dove le misure di gravità sono molto sparse.

Tab. 1: Height anomalies at some GPS stations in the Mt. Everest area

Station	Lat.	Long.	ζ (94)	ζ (99)	ζ (EGM96)
Base	28°08'10"	86°51'06"	1.0 m	-24.2 m	-25.1 m
III7	28°06'14"	86°52'49"	0.8 m	-24.3 m	-25.5 m
Summit Mt. Everest	27°59'17"	86°55'31"	-1.0 m	-26.2 m	-27.3 m

Fig. 1 - Calcolo del geoida sotto la cima dell'Everest negli anni '90 (da Zeitschrift für Vermessungswesen 11/1999).



Fig. 2 - Lo schema della misura dell'Everest del 1992.

Nel 1992, quando i ricercatori del Comitato EV-K2-CNR, in collaborazione con il National Bureau of Surveying and Mapping di Pechino effettuarono la misura dell'Everest (Figg. 2 e 3), lo scarto N tra ellissoide e geoida era stato calcolato, da parte Cinese, in 25.14 metri. Più tardi, nel 1996 il nuovo geoida EGM96 forniva il valore di 27.3m (Fig.1) mentre nel 1999 un nuovo calcolo da parte cinese saliva a 26.2m. La misura del 1999 faceva riferimento al nuovissimo valore di 28.74. Sommando questo valore a quello di 8821.09m della quota ellissoidica si ottiene il valore di 8849.82 che viene arrotondato a 8850 metri. Il valore che si sarebbe ottenuto con la misura italo-cinese del '92 sarebbe stato di 8852.25 m e quindi significativamente più grande. Questa differenza è stata spiegata con il fatto che **il manto nevoso sulla vetta** era stato eroso dai forti venti invernali.

Possiamo così confrontare i valori della altezza dell'Everest con riferimento alla superficie nevosa e in funzione della separazione N geoida-ellissoide (Tab.1).

Risulta perciò evidente che le variazioni della quota dell'Everest degli ultimi decenni, sono dovute principalmente alla variazione dello strato nevoso e a differenti valori della separazione tra geoida ed ellissoide.

È necessario pertanto che eventuali confronti tra le quote delle montagne vengano effettuati rispetto ad un sistema di riferimento riconosciuto internazionalmente quale ad esempio l'ITRS (International Terrestrial Reference System).

	N	Quota Geoide	Quota Elliss.
Survey of India 1852		8840	
Sidney Burrard 1904		8882	
De Graaf Hunter 1930	-30,18	8854 ±5	8823,82
B. L. Gulatee 1954	-35,05	8848	8812,95
Desio e Caporali 1987	-39,00	8872	8833,00
Ev-K2-CNR/NBSM 1992	-25,14	8848,65±0,35	8823,51
J. Y. Chen 1999	-26,20	8849,71	8823,51
EGM96	-27,30	8849,82	8822,52
Washburn e Chen 1999	-28,74	8850,±2	8821,26

Tab. 1 - La quota dell'Everest con la separazione geoide-ellissoide N.
I valori negativi indicano che il geoide si trova sotto l'ellissoide.



Fig. 3 - 29 settembre 1992. Benoit Chamoux sulla vetta dell'Everest con gli strumenti della misura.

Per arrivare ad una misura definitiva **bisogna inoltre convenire che la quota va presa rispetto alla superficie rocciosa** effettuando una misura incontestabile della profondità del manto nevoso.

Con un riferimento alla superficie rocciosa e all'ellissoide GRS80 (Geodetic Reference System 1980) del sistema ITRS, verrebbero a cadere tutti i motivi di ambiguità e si potrebbero effettuare confronti anche a livello centimetrico.

Di queste attività si occupa il Comitato EV-K2-CNR (fondato da Ardito Desio nel 1987) con il progetto TOWER (Top of the World Elevations Remeasurement) che ha misurato con strumentazione GPS il monte Everest (1992 e 2004) il K2 (ma non con GPS in cima) nel 1996, il Cervino (1999), il Monte Rosa (2000) e l'Aconcagua nel gennaio 2001.

Per la determinazione della profondità della neve sulla cima delle montagne è stato costruito un nuovo strumento con tecnologia d'avanguardia. Si tratta di un georadar portatile (GPR - Ground Penetrating Radar) abbinato ad un GPS. Questo strumento è stato impiegato per la prima volta nell'ambito delle spedizioni "K2 2004 - 50 anni dopo" sia sull'Everest in Maggio che sul K2 nel Luglio 2004 (Fig. 4).

La misura dello spessore della neve

Lo strumento, ideato dal Centro di Eccellenza per la Telegeomatica dell'Università di Trieste in collaborazione con la società SOGEST Geofisica, è stato realizzato dalla IDS Spa (Ingegneria dei Sistemi), una dinamica azienda di Pisa con notevole esperienza in questo campo e unica produttrice nazionale di sistemi georadar.



Fig. 4 - Aprile 2004. Il primo prototipo di georadar della IDS con GPS abbinato.

Dopo diverse prove su ghiacciai alpini (Canin, Stelvio, Moelltal, Marmolada), con la presenza di alcuni degli alpinisti possibili candidati alle misure in vetta, sono stati realizzati due prototipi nei quali le antenne della IDS sono state abbinata a dei GPS monofrequenza Leica MX421L.

Per questi prototipi sono state scelte, in particolare per le loro doti di penetrabilità nella neve e nel ghiaccio, antenne radar con frequenza nominale di 900 MHz mentre per i dati è stata adottata una memorizzazione di 10 segnali al secondo, con 2048 campioni a 16 bit per segnale, in memorie di tipo *Compact Flash Card* di tipo industriale. Per l'alimentazione è stata adottata una speciale batteria ricaricabile al litio avente una autonomia di utilizzo in continuo superiore alle 7 ore.

Nella realizzazione dei prototipi, gran parte dei particolari sono stati studiati su basi di affidabilità e leggerezza. La "carrozzeria" è stata realizzata dalla GMR di V. Müller di Aquileia (UD), ditta specializzata nelle lavorazioni con materiali compositi, che ha realizzato una "scocca" molto leggera in fibra di vetro di tipo "S" aeronautico. Esternamente sono stati predisposti due pattini stabilizzatori, indispensabili nel trascinarsi ed in caso di vento o neve soffice. Il peso totale è stato contenuto in 4 kg, telecomando e batteria compresi.

Il programma di lavoro sulla cima

La misura dello spessore della neve, in cima ad una montagna quale è l'Everest, dipende fortemente dalle capacità degli alpinisti coinvolti nella ricerca di operare in vetta secondo degli schemi convenuti, mantenendosi tuttavia in contatto radio continuo con il campo base per eventuali suggerimenti o variazioni.

Il programma studiato a tavolino prevedeva l'esecuzione di una serie di profili georadar in prossimità ed in coincidenza della sommità, che riconoscessero l'andamento della roccia sottostante la copertura nevosa, in modo da individuare un punto di culmine, una volta quotati i profili in superficie.

Conquistata la cima, gli alpinisti dovevano scendere alla prima roccia affiorante (distante circa 20 metri), avviare la stazione GPS a doppia frequenza Leica 1200 (da lasciare fissa sull'affioramento), assemblare ed avviare il georadar, con in particolare la prevista fase di pre-riscaldamento e quella di aggancio ai satelliti da parte del suo GPS incorporato.

La fase successiva consisteva nel trascinare il georadar fino alla vetta apparente. In questa attività erano coinvolti due alpinisti, uno davanti ed uno dietro lo strumento, per mantenerlo in rotta e per evitare eventuali ribaltamenti in caso di forte vento. A qualche metro dalla roccia affiorante di partenza, era programmato un passaggio in corrispondenza di un punto di taratura diretta dello spessore (da eseguire tramite una sonda da neve).

Raggiunta la sommità, il georadar rimaneva fermo in registrazione per alcuni minuti, in modo da consentire un collegamento con le stazioni GPS fisse per una maggiore precisione nel calcolo della quota. Il georadar veniva poi fatto scendere dalla cresta sommitale lungo il pendio secondo dei profili estesi da 3 a 5 metri ognuno, in modo da coprire nel miglior modo possibile tutta l'area di vetta.

L'ultimo passo consisteva nel montaggio della mira ottica e dei prismi riflettenti per le misure classiche di livellazione previste per confronto con quelle satellitari.

I preparativi alla base dell'Everest

Nelle ore immediatamente precedenti le misure in vetta all'Everest sono stati predisposti alcuni punti di osservazione e misura nella zona del Campo Base.

Un punto per la misura classica con teodolite e distanziometro è stato fissato alla confluenza tra i due ghiacciai che scendono dalla parete Nord dell'Everest (Rongbuk e East Rongbuk). Nelle vicinanze è stata installato un GPS Leica SR530 con acquisizione dati ogni secondo.

Un'altra stazione GPS Leica 300 a doppia frequenza è stata posta sul caposaldo trigonometrico e di livellazione della rete Cinese presente nella zona del Campo Base.

Un ulteriore punto di misura era costituito dalla stazione GPS in acquisizione permanente presso il Laboratorio Piramide del Comitato Ev-K2-CNR situato in Nepal lungo il ghiacciaio del Khumbu.

Questi punti vengono presi in considerazione nella elaborazione globale con lo scopo di inquadrare geograficamente quelli rilevati in vetta dandogli un riferimento a caposaldi di coordinate note. (Tab. 2)

Stazione GPS	Latitudine	Longitudine	Quota Elliss.
Lhasa	29° 39' 26,426"N	91° 06' 14,364"E	3624,658
Campo Base	28° 08' 09,812"N	86° 51' 06,203"E	5125,190
C. Intermedio	28° 06' 17,471"N	86° 52' 16,734"E	5285,856
Master Cima	27° 59' 16,500"N	86° 55' 30,587"E	8811,281
Piramide	27° 57' 33,271"N	86° 48' 47,125"E	4993,422

Tab. 2 - Le stazioni base per il calcolo delle coordinate.

I profili osservati

Nella realtà, la presenza di una cornice esposta sul versante Est e molto prossima alla sommità, e numerosi ostacoli sulla cresta, costituiti da accumuli di bandierine votive, da una fotografia (incorniciata!) del Dalai Lama, da corde abbandonate e da bombole di gas esauste, ha fatto sì che non si potessero eseguire profili secondo una maglia regolare, ma piuttosto convergenti verso il culmine di vetta, lungo i pendii esposti sia a Sud/SudOvest che a NordOvest, secondo la disposizione presentata nella Fig. 5.

La mattina del 24 maggio 2004 quattro sono stati gli alpinisti che hanno realizzato le eccezionali misure in cima all'Everest, operando senza ossigeno per oltre 2 ore. Alex Busca che ha coordinato le operazioni in contatto con il Campo Base, Claudio Bastrentaz, Karl Unterkircher che hanno seguito lo strumento e documentato ogni fase delle operazioni e Mario Merelli che ha anche assemblato ed eretto l'asta con la mira ottica ed i prismi per le misure classiche (Figg. 6,7).

Al Campo Base i ricercatori Roberto Mandler e Giorgio Poretti hanno seguito le operazioni degli alpinisti via radio cercando di immaginare le loro mosse, di interpretarne le pause e di anticipare le richieste di chiarimento, mentre i ricercatori Marco Lipizer, Andrea Zille e Gino De Min erano impegnati nelle misure verso la cima.

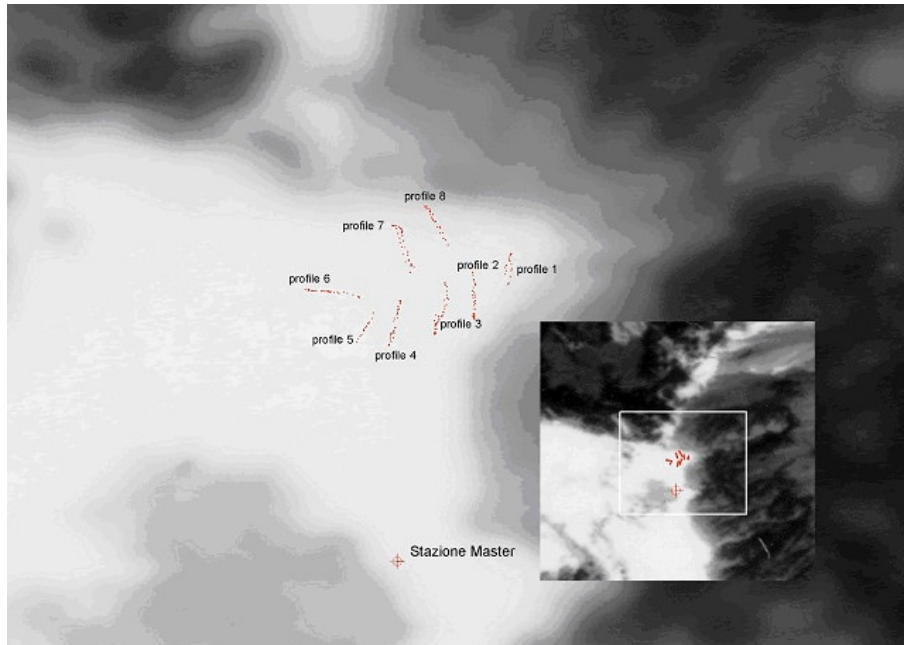


Fig. 5 - I profili radar sulla cima (ripresa aereo fotografica d'archivio, fortemente ingrandita e georeferenziata).



Fig. 6 - La fase iniziale di avviamento del GPS-master (fisso) e del georadar/GPS (mobile), in corrispondenza degli affioramenti rocciosi sul pendio Sud sotto la vetta del Monte Everest.

Il giorno successivo sono saliti in vetta anche gli alpinisti Tarcisio Bellò e Marco Confortola, mentre gran parte della seconda squadra che aveva atteso al Campo 3 decideva di ritirarsi a causa del forte vento.

Le misure classiche

Alla conclusione dei rilievi georadar, è stata issata un'asta con una mira ottica e tre prismi riflettenti, in coincidenza con la sommità della vetta (Figg. 16, 17). La sua posizione è stata quindi rilevata dal teodolite Leica T2002K installato in precedenza alla base della montagna nei pressi del campo intermedio, ad una distanza di oltre 14 km dalla cima.

Gli alpinisti, impegnati ormai da oltre due ore nelle misurazioni sulla vetta, hanno lasciato la cima mentre le misure angolari erano ancora in corso. Nei giorni successivi si è tentato invano di recuperare la mira ed i prismi che purtroppo sono da considerarsi perduti.



Fig. 7 - L'alpinista Claudio Bastrentaz impegnato con il georadar sul culmine della vetta, che si presentava "addobbata" con bandierine votive e addirittura con la fotografia incorniciata del Dalai Lama.

I valori ottenuti:

Distanza	Angolo Zenitale	Differ. di quota
14428.9160	84.27887	3540.742

si riferiscono ai prismi riflettenti e alla mira ottica. Per la correzione della quota è stato tenuto conto del coefficiente di rifrazione calcolato in base alla differenza di temperatura tra il Campo Base e la cima. La notte del 26 maggio è stata calcolata la deviazione della verticale mediante il sistema Astra (Lipizer et al. 2001) rilevando 128 posizioni stellari. I risultati ottenuti sono:

$$\xi = 4.69'' \pm 0.54'' \quad \eta = -7,59'' \pm 0.44''$$

Questi valori risultano sorprendentemente piccoli se confrontati con quelli osservati nel 1992 sul versante Sud della montagna, ma in buon accordo con quelli rilevati dai ricercatori cinesi nella stessa zona nel 1975 (Chen J.Y., 1980).

Profili radar, calcolo della quota e della profondità della neve

Le elaborazioni relative al calcolo delle quote hanno preso in considerazione i dati GPS rilevati lungo i profili e in diverse stazioni di misura presenti nella zona circostante, comprendendo in queste anche la stazione GPS permanente del laboratorio Piramide (in Nepal). Questo punto situato lungo il ghiacciaio del Khumbu, non lontano dal Campo Base Sud dell'Everest, coincide con un punto di quota e posizione già determinate in precedenti campagne e collegato con una stazione del sistema francese DORIS operante in loco da più di 12 anni. Assieme ai dati della stazione dell'International GPS System situata a Lhasa questa ha permesso di inquadrare opportunamente anche le coordinate della cima della montagna nel sistema ITRS.

Si è già detto che il programma delle misure in cima, messo a punto sulla base delle fotografie disponibili, ed utilizzato nella fase di istruzione degli alpinisti, prevedeva una serie di profili che consentisse di disporre di una copertura adeguata di tutta l'area della cima. Era stata prevista l'esecuzione di almeno due profili paralleli alla cresta sommitale, e poi successivamente alcuni profili di massima pendenza che, partendo dalla cresta, scendessero per quanto possibile sul pendio e venissero poi recuperati al punto di partenza. La presenza di alpinisti, degli zaini, ed anche l'andamento stesso della morfologia della cima, hanno però condizionato tale copertura.

Le misure effettuate in cima il 24 maggio 2004 hanno seguito complessivamente 9 profili radar/GPS. Il primo, denominato profilo 0, è stato condotto sul pendio esposto a Sud-SudOvest, dagli sfasciumi e rocce affioranti a circa 20m a Sud della vetta, fino al culmine nevoso in cresta. In avvio di registrazione il georadar è rimasto affiancato al GPS "master" per alcuni minuti (P-0: spessore neve =20cm), e durante il percorso del tracciato è stato fatto passare in corrispondenza di un punto di verifica dello spessore della neve (P-1: spessore neve =50cm). Purtroppo non è stato poi possibile recuperare il file relativo a questo primo profilo, per problemi di registrazione, probabilmente causati dalla bassa temperatura registrata durante la notte. Una volta raggiunta la cima, il georadar ha ripreso a funzionare correttamente, mentre venivano eseguiti 8 profili georadar (Tab. 3).

Durante l'analisi dei dati registrati, i profili 5 e 7 hanno inoltre evidenziato alcuni salti nei valori GPS di posizione, determinati dalla perdita di segnale. In ogni caso, entrambi questi profili erano stati eseguiti a quote altimetriche sensibilmente inferiori alla cresta nevosa della cima, interessata invece dai profili 1, 2 e 3. In planimetria la disposizione dei profili è risultata quella evidenziata nella Fig. 8.

Nelle fasi di discesa e di recupero, si era ben consci del rischio della possibile perdita di un certo numero di satelliti, trovandosi l'antenna GPS in posizione probabilmente molto inclinata. Una volta recuperati ed analizzati i dati, è stata data pertanto priorità, nei calcoli per la modellazione della superficie nevosa e della superficie rocciosa sottostante, alle registrazioni di sola andata.

L'elaborazione dei dati del georadar è stata basata sui dati GPS di posizione dei profili, i quali hanno permesso di "normalizzare" la progressione, spesso irregolare, nel trascinarsi manuale dello strumento sulla neve, e di quotare l'andamento in superficie.

Profilo	Ubicazione profilo	Durata
0 (*)	Sul versante Sud-SudOvest, dall'affioramento roccioso fino alla cima	-
1	Sul culmine orientale della cresta sommitale, con direzione Nord-Sud e ritorno	23°0
2	A Est del culmine nevoso della vetta con direzione Nord-Sud	50°8
3	A Ovest della vetta con direzione Nord-Sud e ritorno	41°5
4	A Ovest del profilo precedente, con direzione Nord-Sud e ritorno	33°2
5 (°)	A quota altimetrica inferiore, con direzione NordEst-SudOvest	29°2
6	A Ovest dei profili precedenti e a quota altimetrica inferiore, con direzione Est-Ovest	33°1
7 (°)	Sul versante NordOvest, parte dalla cresta con direzione Sud-Nord e ritorno	34°0
8	Sul versante NordOvest, parte dalla cresta con direzione SudEst-NordOvest	30°7

Tab. 3 - Descrizione profili georadar.
(*) profilo danneggiato e (°) profili con perdita di segnale GPS.

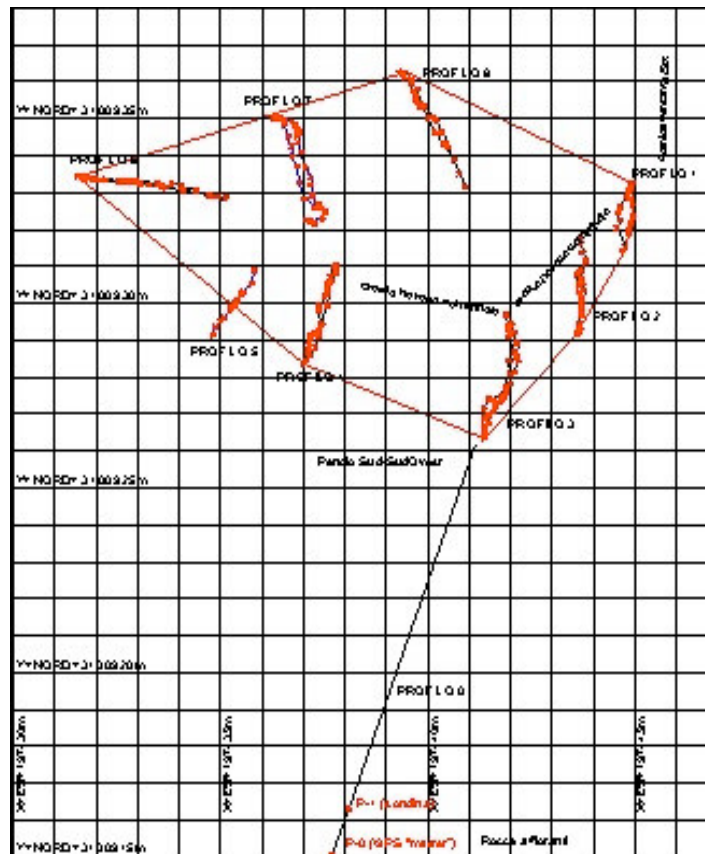


Fig. 8 - Profili georadar in cima (lato quadrati = 1 metro).

Per ogni profilo, una volta determinato l'andamento plano-altimetrico, è stata costruita una sezione grafica, per procedere all'elaborazione dei segnali radar (Fig. 9).

Nelle registrazioni radar, la superficie di riflessione tra strato nevoso e roccia sottostante è risultata generalmente evidente. L'applicazione di filtri di passa banda orizzontali e verticali ha comunque consentito di meglio evidenziare l'andamento della superficie rocciosa, rispetto alle superfici di discontinuità causate dalle successive stratificazioni nella neve.

Un aspetto problematico ha riguardato invece la valutazione della velocità di propagazione delle onde radar nello strato nevoso, per poter passare dai *tempi di riflessione dei segnali* (registrati in nanosecondi) alle *profondità delle riflessioni* (calcolate in metri). A questo riguardo, un tentativo di misura diretta dello spessore della neve con un'astina da valanga è stato effettuato anche in cima, ma la spessore è risultato maggiore della lunghezza disponibile dell'asta (2m ca.).

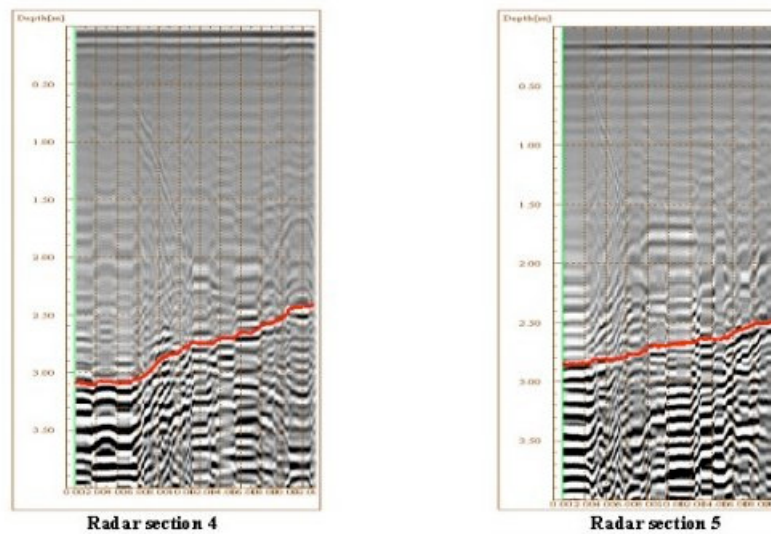


Fig. 9 - Esempi di sezioni georadar con evidenziato l'andamento della roccia sottostante la neve; entrambi i profili si riferiscono a tracciati dalla cresta sommitale lungo i pendii esposti a Sud e a SudOvest; lo spessore della neve evidenziato risulta "apparente" in quanto rilevato su pendii variamente inclinati.

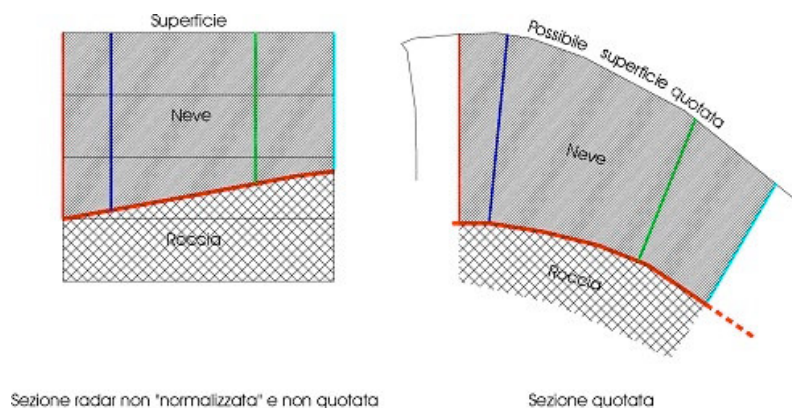


Fig. 10 - Esempio di possibile "normalizzazione" di una sezione georadar, con deformazione allometrica.

Proprio prevedendo tale eventualità, era stata prevista l'esecuzione di un profilo iniziale che, partendo da uno spessore della neve minimo (roccia affiorante), passasse in corrispondenza di un punto di spessore-neve nota (p.to P-1), prima di proseguire verso la cresta. La perdita di questo primo profilo ha quindi determinato la necessità di una taratura con un procedimento noto come *migrazione* dei segnali, che è stato applicato ad alcune forme tipiche (note come *iperboli di riflessione*) riconosciute nelle registrazioni e determinate dalla presenza di probabili oggetti sepolti nella neve a piccola profondità (bombole di ossigeno o altro). In questo modo, sono state ricavate delle sezioni del tipo: spostamento dell'antenna / profondità della roccia (Fig. 10).

Come verrà precisato in seguito, le fasi di elaborazione hanno comportato anche la necessità di tener conto sia della posizione dell'antenna GPS rispetto al sensore radar a contatto con la neve, che dell'inclinazione dei profili lungo il pendio. Per ogni profilo, partendo dai punti GPS sono stati così ottenuti nuovi punti traslati a contatto con la neve, e quindi sono stati riportati sempre in sezione i valori di profondità individuati per la superficie rocciosa, dopo esser stati a loro volta traslati in considerazione dell'inclinazione del pendio nel punto di misura (Fig. 11).

Sui dati ridotti è stato applicato un programma di interpolazione che ha permesso di ricostruire le superfici sia della calotta nevosa che della roccia sottostante con un errore di poco superiore ai 2 cm, come media su tutti i

punti rilevati. Dal campionamento delle funzioni polinomiali su di una maglia regolare di 10 cm di lato è stato poi possibile tracciare le linee di livello, individuando i punti di massima elevazione per le due superfici (Figg. 12, 13 e 14).



Fig. 11 - L'alpinista Mario Merelli impegnato con il georadar sull'inclinato pendio lungo il versante SudOvest.

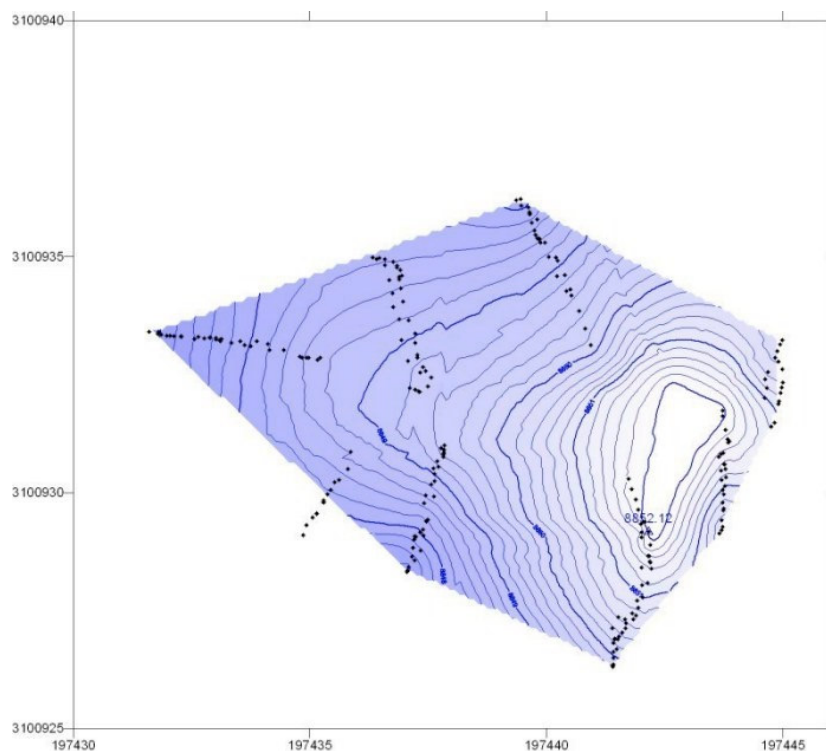


Fig. 12 - La ricostruzione delle isolinee della cima nevosa del Monte Everest.

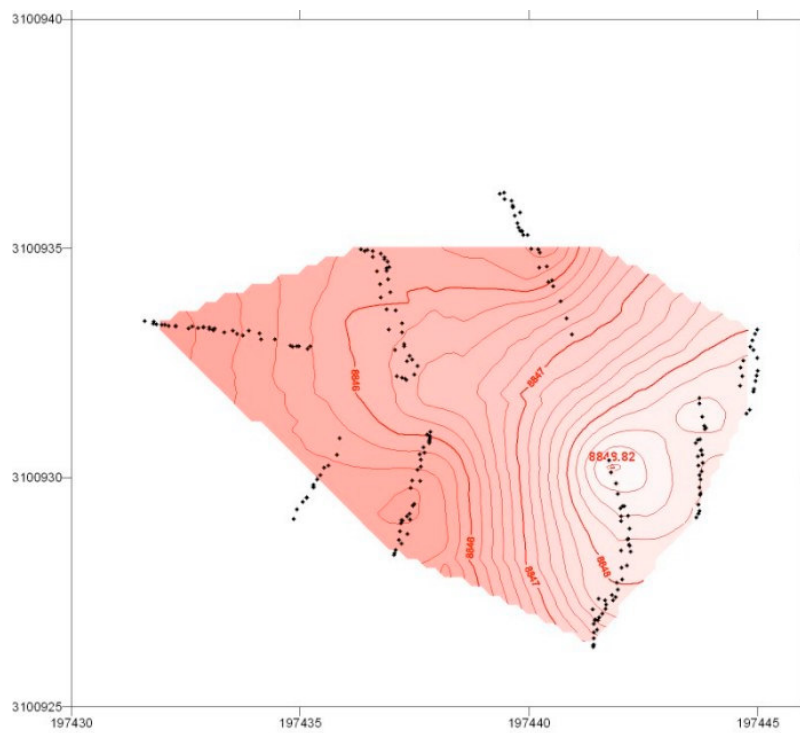


Fig. 13 - La ricostruzione delle isolinee della cima rocciosa del Monte Everest.

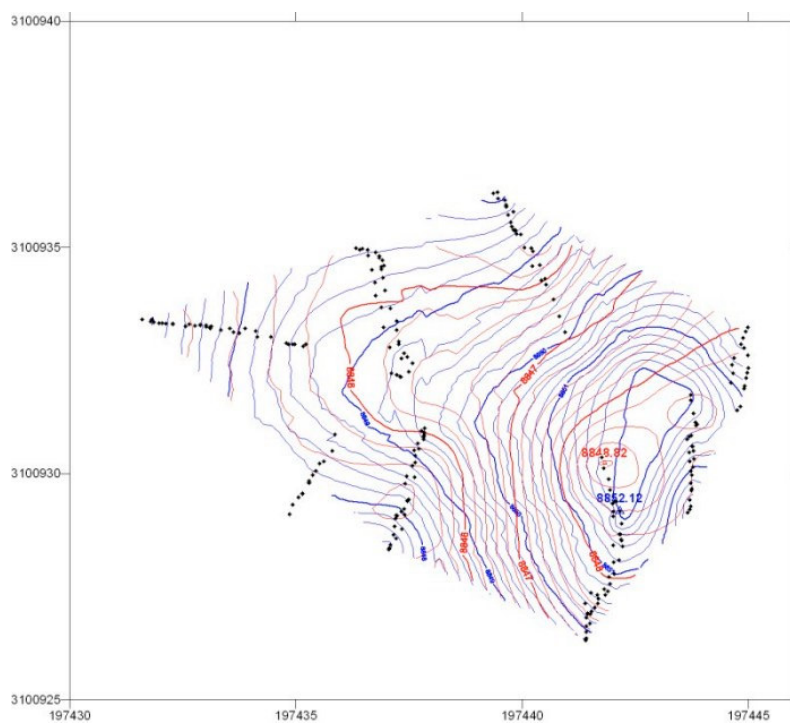


Fig. 14 - Sovrapposizione delle isolinee della cima rocciosa e di quella nevosa.

Lungo una linea che attraversa i punti di quota massima è stata tracciata una sezione che evidenzia le due cime e lo spostamento tra di esse.

Le elaborazioni relative alle quote hanno tenuto in considerazione i dati rilevati lungo i profili, quelli della stazione fissa all'affioramento roccioso e quelli registrati in alcune stazioni di misura presenti nella zona circostante, comprendendo tra queste anche la stazione GPS permanente del laboratorio Piramide del Comitato Ev-K2-CNR in territorio Nepalese.

Questo punto situato lungo il ghiacciaio del Khumbu, non lontano dal Campo Base Sud dell'Everest, coincide con un punto di quota e posizione già determinate in precedenti campagne e collegato con una stazione del sistema francese DORIS operante in loco da più di 12 anni (Beinat et al. 1994). Assieme ai dati della stazione dell'IGS (International GPS System) situata a Lhasa questa ha permesso di inquadrare opportunamente anche le coordinate della cima della montagna nel sistema ITRS.

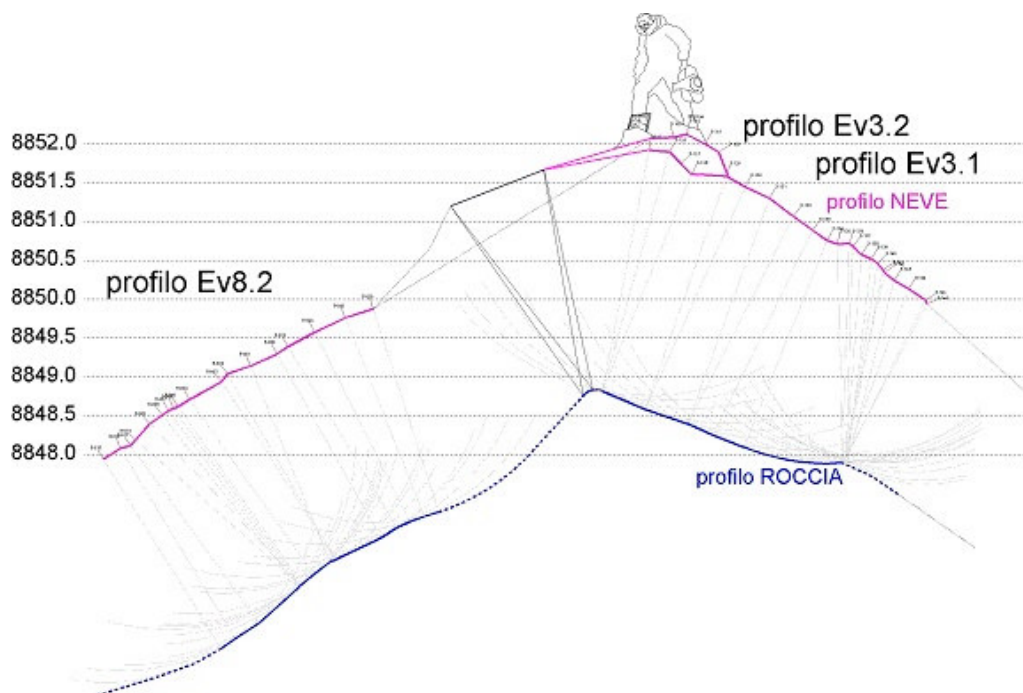


Fig. 15 - Sezione lungo due profili che attraversano la cima.

La ricostruzione della superficie rocciosa e di quella nevosa.

Analizzando i risultati della elaborazione dei profili radar, si nota un generale ispessimento dello strato nevoso in corrispondenza della cresta sommitale, con spessori massimi di 285-370cm di neve, in particolare in corrispondenza dei profili 1-2-3 che interessano più direttamente il culmine nevoso della cima.

I dati rilevati dal GPS Leica MX421L individuano punti situati su di una superficie parallela alla superficie nevosa e distante da essa 15.8 cm che rappresentano l'altezza del centro di fase del GPS rispetto al centro della sorgente che emette i segnali radar in un cono avente un'ampiezza di 45° nella direzione di avanzamento del radar e di 30° in quella perpendicolare. L'asse del cono rimane comunque sempre ortogonale alla superficie emittente.

La riflessione ricevuta dall'antenna è, in ogni caso, quella perpendicolare alla roccia secondo un settore sferico, con raggio pari alla profondità della neve misurata.

Per ricostruire la superficie rocciosa si deve quindi considerare un fascio di sfere i cui centri sono situati sulla superficie nevosa e i cui raggi variano con la profondità della neve misurata ogni decimo di secondo. La superficie involuppo aderente a questo fascio di sfere rappresenta il profilo roccioso per i punti del quale vengono di conseguenza ricalcolate le coordinate (Figg. 9, 11).

Ci si trova quindi di fronte a due insiemi di punti che rappresentano i profili sulla superficie nevosa e i corrispondenti su quella rocciosa.

La profondità della neve in corrispondenza della cima nevosa

Esaminando le superfici risultanti dall'elaborazione dei dati radar e GPS si può facilmente dedurre che i due massimi non coincidono. Si deve quindi parlare di una quota massima **"sulla neve"** e di una quota massima **"sulla roccia"**. Le due cime si trovano ad una distanza di circa un metro nella direzione del vento prevalente (Fig. 15).

Per la neve, il punto di massima elevazione corrisponde ad un punto rilevato lungo il profilo P3, che ovviamente risulta spostato rispetto al relativo punto GPS. Qui la roccia sottostante è presente alla quota di 8848.40 m s.l.m. e pertanto la neve ha uno spessore di 3.7 m.

	Neve 2004	Roccia 2004	Neve 1992 Roccia 1992	Dati '92 con "N" del 2004	Dati '92 con parametri 2004
Quota ell. Cima	8823.38	8820.08	8823.51	8823.51	8823.51
Ond. Geode N	28.74	28.74	25.14	28.74	28.74
Quota Geoidica	8852.12	8848.82	8848.65	8852.25	8852.25
Profondità Neve	3.7	3.0	2.55	2.55	3.70
Quota Roccia	8848.4	8848.82	8846.10	8848.70	8848.55
Quota Neve		8851.8		8852.25	

Tab. 4 - Confronto tra i rilievi del 1992 e del 2004 con l'adozione di un differente valore di separazione tra ellissoide e geode.

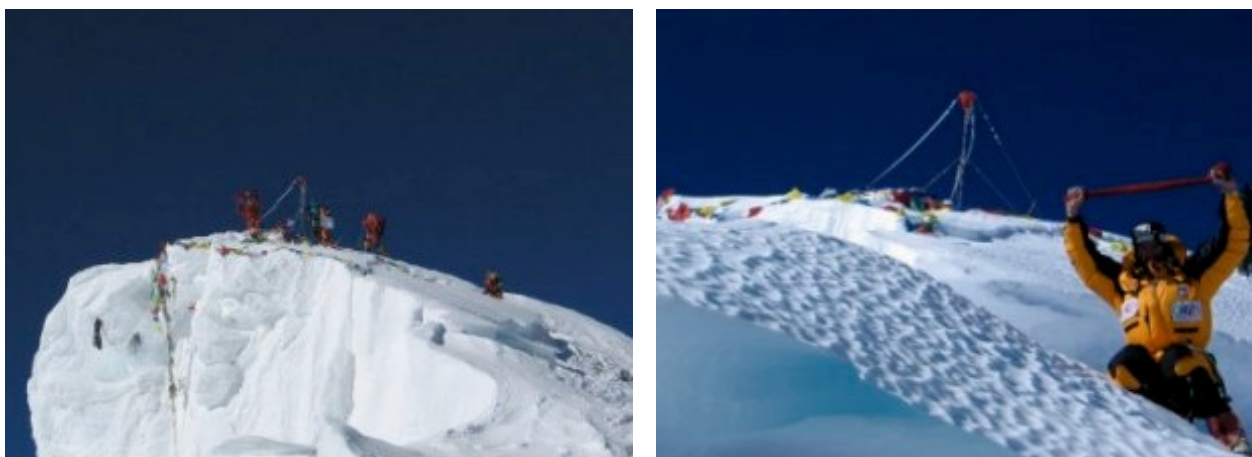
Per la roccia, il punto di massima elevazione corrisponde in realtà a ben 3 punti, rilevati sempre lungo il profilo P3 e anch'essi spostati rispetto ai relativi punti GPS in direzione Nord. Essi presentano una quota di 8848.82 m s.l.m. Questi punti di massima elevazione si trovano ad una distanza planimetrica di 115 cm rispetto al punto di culmine della neve, in direzione Nord. Nel punto di massima elevazione della roccia, la superficie della neve presenta una quota di 8851.80 m s.l.m. e pertanto uno spessore di 3.04 metri.

Riassumendo questi dati e le considerazioni precedenti nella Tabella 4 si può concludere che la quota sulla neve è stata calcolata a 8852.12 metri mentre quella rispetto alla roccia risulta di 8848.82 metri.

Interessante è il confronto (con i dati rilevati nel 1992 quando la profondità della neve, misurata con una sonda da valanga nel punto di vetta, risultò di 2.55 metri (Beinat et al., 1993). Come media delle misure classiche e satellitari, si ottenne un valore di quota sull'ellissoide molto vicino a quello attuale (13 cm di differenza) nonostante diversità della stagione. La maggiore discrepanza perciò stava nel valore dell'ondulazione del geode che differiva di 2.60 metri da quello odierno (Tab. 4).

Le coordinate della cima nevosa sono state determinate in base alle misure GPS. Quelle della cima rocciosa sono state stimate sulla digitalizzazione della superficie di interpolazione.

	Latitudine	Longitudine	Quota
Cima Nevosa	27°59'16,963"	85°55'31,736"	8852,12
Cima Rocciosa	27°59'16,998"	85°55'31,723"	8848,82



Figg. 16 e 17 - L'asta con mira e prismi sulla cima dell'Everest dopo le misure del georadar.

Errore specifico ed errore globale della misura

Una componente molto importante nella stima dell'altezza della montagna è la valutazione dell'errore probabile nel calcolo delle coordinate e della quota. Si deve infatti tenere conto dell'errore delle misure GPS del triangolo di base, dell'errore dal campo base alla stazione fissa, dalla stazione fissa al georadar e dell'errore nella misura georadar. Bisogna infine aggiungere l'errore del calcolo di interpolazione con best-fit polinomiale.

Partendo dalla stazione permanente IGS di Lhasa e dal punto G del Laboratorio Piramide possiamo determinare i seguenti errori desunti dai tabulati delle elaborazioni GPS effettuate con effemeridi precise, atmosfera standard:

- Triangolo Lhasa, Campo Base Nord: 0,019 m;
- Triangolo Campo Base, Campo Intermedio, Stazione Master 0,094 m;
- Stazione Master, georadar monofrequenza cinematico, 0,049 m;
- Nella stima della velocità di propagazione delle onde radar nella neve, senza taratura diretta si può ipotizzare un errore di 20 cm. Questo è superiore a quello rilevato nel 1992 con la misura mediante sonda da valanga, ma toglie le incertezze di una misura singola.
- C'è infine la indeterminazione del metodo di approssimazione delle superfici polinomiali che è stato calcolato in 1,5 cm per ciascuna superficie.

Globalmente pertanto si può stimare un errore di 0.23 m, a prescindere dall'errore intrinseco della stazione IGS di Lhasa e di quello del Geoide EGM96.

Si può quindi definire la quota della cima del Monte Everest sulla superficie nevosa in 8852.12 ± 0.12 m, mentre per la superficie rocciosa possiamo stimare 8848.82 ± 0.23 m.

Conclusioni

Gli strumenti classici e satellitari che vengono impiegati nella misura dell'altezza di una montagna sono diventati sempre più sofisticati e precisi, permettendo di misurare la profondità della neve in corrispondenza della cima nevosa e nella zona circostante. Lo strumento impiegato, un georadar abbinato ad un GPS ha fornito le coordinate e la profondità della neve lungo 8 profili sulla cima del Monte Everest. Questo ha permesso di ricostruire la cima nevosa e quella rocciosa e di distinguere tra misura della montagna "sulla neve" e misura "sulla roccia".

I risultati ottenuti potranno essere migliorati con una taratura diretta del radar e rilevando altri profili che intersechino lateralmente e sulla cresta sommitale quelli già ottenuti. Anche il calcolo del geode potrà essere migliorato con nuove misure di gravità e deviazione della verticale.

Ringraziamenti

I ricercatori che hanno partecipato alle misure ringraziano l'Istituto Nazionale per la Montagna, il Comitato Ev-K2-CNR e le ditte fornitrici degli strumenti che hanno permesso lo svolgimento della ricerca. In primo luogo l'Ing. Franco Bardelli della IDS Ingegneria dei Sistemi di Pisa ed i suoi collaboratori Ing. Guido Manacorda e Dott. Mario Miniati che hanno costruito i georadar impiegati nella ricerca. Si ringraziano l'Ing. Andrea Cabrucci e il Sig. Fritz Staudacher della Leica Geosystems che ha fornito i GPS Leica MX421L abbinati ai georadar e il nuovissimo Leica System 1200 posizionato sul punto di riferimento per le misure sulla vetta. Un ringraziamento anche agli alpinisti che hanno partecipato con entusiasmo e competenza a questo complesso esperimento scientifico.

Giorgio Poretti*
Roberto Mandler**
Marco Lipizer*

* Università di Trieste - Dipartimento di Matematica e Informatica - CER Telegeomatica

** SOGEST Geofisica - Trieste

Referenze

1. Burrard S. G. & Hayden H. H.; 1908: A sketch of the geography and geology of the Himalayan Mountains and Tibet. Survey of India Dehra Dun, 364 pp.
2. Caporali A.; 1994: La deflessione della verticale in Nepal. Bollettino di Geodesia e Scienze Affini, 4, 355-365.
3. Chen Jun Yong; 1994: Crustal movements, gravity field and atmospheric refraction in the Mt. Everest area. Zeitschrift für Vermessungswesen, 119, 389-400.
4. Chen Jun Yong; 1999: An improved local geoid in the Mt. Everest area. Zeitschrift für Vermessungswesen, 11, 362-368.
5. Gulatee B. L.; 1954: The height of Mount Everest. A new determination (1952-54). Survey of India Tech., paper n. 8, 32 pp.
6. Lipizer M., Marchesini C. and Poretti G.; 2001: ASTRA: un nuovo sistema di misura della deviazione della verticale. In: Atti del XX Convegno Nazionale GNTGS, 6-8 Novembre 2001, pp. 60-62.
7. Poretti G., Marchesini C. and Beinat A.; 1994: GPS Surveys Mount Everest. GPS World October 1994, 32-44.
8. Poretti G.; 1995: Quanto è alto il Monte Everest? Tessere, Geofisica, Ed. CUEN Napoli.
9. Poretti G.; 1998: Geophysical, geological and geographical features of the Himalayas. In: Ecovision World Monograph Series, Backhuys Publishers, Leiden, pp. 19-34.
10. Poretti G.; 2000: Das Mt. Everest Abenteuer - wie die neue Höhe errechnet würde. Der Vermessungsingenieur 2/2000, Verlag Chemielorz, Wiesbaden, 100-101.
11. Poretti G., Purrucherr R., Marchesini C., Beinat A., Eckart M. & Marchesini A.; 2000: Geodetic measurements in the Himalayas and new measurement of Mount K2. Bollettino Geof. Teor. Appl., 41, 219-231.
12. Tavernier G., Fagard H., Feissel-Vernier M., Lemoine F., Noll C., Ries J., Soudarin L., Willis P.; 2005: The International DORIS Service (IDS). Adv. Space Res, 36, 333-341.
13. Windley F. B.; 1986: The Evolving Continents. J. Wiley & Sons.