

**ELABORAZIONE DI CARTOGRAFIA TEMATICA TRAMITE GIS PER LA
CONOSCENZA E LA VALORIZZAZIONE DI UNA RISORSA AMBIENTALE. I
GHIACCIAI ALPINI**

**THEMATIC MAPS BY MEANS OF GIS FOR UNDERSTANDING AND VALORISATION
OF AN ENVIRONMENTAL RESOURCE. ALPINE GLACIERS**

Carlo D'Agata, Guglielmina Diolaiuti, Claudio Smiraglia
carlo.dagata@unimi.it guglielmina.diolaiuti@unimi.it claudio.smiraglia@unimi.it

Riassunto

I ghiacciai, in quanto sistemi sensibili alle variazioni climatiche, sono attendibili ed efficaci indicatori delle modifiche ambientali passate ed in atto. L'elaborazione dei dati riguardanti la loro evoluzione nel tempo può essere oggi effettuata attraverso l'utilizzo di diverse moderne metodologie, fra le quali vi sono i GIS, strumenti che analizzano il territorio inteso come sistema dinamico. Come esempio di questa possibilità di applicazione si è costruito un Sistema Informativo Territoriale relativo ad un'area campione delle Alpi; in particolare si è realizzato un *database* (relazionale e georeferenziato) con dati relativi ad alcuni ghiacciai alpini ed alle zone limitrofe, anche con riferimento alle conseguenze che le variazioni ambientali in tale area possono avere sulla frequentazione antropica. Le variazioni di massa ed estensione dei ghiacciai, infatti, hanno provocato profonde modificazioni nelle aree montane, rendendole di volta in volta disponibili alla presenza umana (nei periodi di regresso delle lingue, quando vaste aree lasciate libere dai ghiacci si rendevano disponibili) o privando le popolazioni locali di prati e pascoli (a seguito dell'improvviso avanzare delle fronti glaciali). Parallelamente al problema della fruizione delle aree di alta montagna, le variazioni glaciali hanno comportato in tempi recenti l'accentuarsi del rischio; infatti, le aree deglacciate sono maggiormente sottoposte a processi di degradazione dei versanti (crioclastismo, termoclastismo, geliflusso, trasporto e deposito di materiale incoerente, fenomeni valanghivi, ecc...) che, se non censiti e identificati, possono rappresentare un grave pericolo per le popolazioni locali ed i turisti. Inoltre, va sottolineato che i ghiacciai rappresentano una risorsa ambientale in continua evoluzione, assimilabile a "acqua dolce in scatola", ovvero rappresentano importanti e delicate risorse idriche (a scopo irriguo ed idroelettrico) da gestire con attenzione nell'ottica di uno sviluppo sostenibile qualitativo e non solo quantitativo.

Lo studio di alcuni ghiacciai alpini particolarmente significativi per dimensioni, tipologia ed esposizione, con la ricostruzione delle loro variazioni storiche plurisecolari, della loro volumetria, estensione e spessore, viene effettuato da diversi anni dagli autori del presente contributo, sia con metodologie di terreno (misure frontali, bilanci di massa, rilievi geofisici e topografici) che di

laboratorio (confronti cartografici e iconografici, elaborazione di modelli fisici e matematici). Si dispone quindi di una serie di dati georeferenziati e di estensione temporale a volte secolare, che ben si presta all'applicazione di metodologie GIS per la loro gestione, per la formulazione di cartografia tematica e per l'allestimento di modelli evolutivi previsionali sul futuro di queste risorse. In conseguenza dell'elaborazione tramite GIS dei dati rilevati sugli apparati campione (ad esempio Ghiacciaio della Sforzellina nel Gruppo dell'Ortles Cevedale, Ghiacciaio del Belvedere nel Gruppo del Rosa e Ghiacciaio dell'Adamello) georeferenziati attraverso l'ausilio di metodologia GPS sono stati calcolati dei DEMs. Il confronto fra DEMs ha permesso di ottenere il bilancio di massa a diversi intervalli di tempo degli apparati studiati, di calcolare variazioni areali e volumetriche e di mappare con precisione le aree proglaciali modificate in tempi recenti e maggiormente sottoposte a dissesti e quindi potenzialmente pericolose per i frequentatori.

PAROLE CHIAVE: GIS, Ghiacciai alpini, GPS, variazioni ambientali.

Summary

Glaciers are reliable and efficient indicators of past and current environmental changes as systems that are sensitive to climatic fluctuations. The processing of data on their evolution over time can now be carried out through the use of various modern methods such as GIS, an instrument that analyzes the territory as a dynamic system. As an example of this type of application, a Geographic Information System was established for a sample area in the Alps. More specifically, a (relational and georeferenced) database was created with data on several Alpine glaciers and the surrounding areas, and also with reference to the consequences that environmental changes can have on man's use of such areas. In fact, variations in glacier mass and extension have brought about strong changes in the mountain areas, making them available to the presence of man time and again (during the periods of glacier tongue retreat when vast areas left free by the glaciers became available) or depriving the local populations of meadows and pasture land (following sudden advances of glacier fronts). Together with the problem of the utilization of high-mountain areas, these glacier fluctuations have accentuated risks in recent times. In fact, deglaciated areas are more affected by slope degradation processes (e.g. cryoclastism, thermal weathering, gelifluction, transport and deposition of incoherent material, landslide phenomena, etc.). If they are not inventoried and identified, they can represent serious hazards for local populations and tourists. In addition, it should be emphasized that glaciers represent a constantly changing environmental resource, something like "packed fresh water", that is, they represent essential and delicate water resources (for irrigation or hydroelectric purposes) to be managed carefully, within the logic of

Sustainable Development in terms of quality and not quantity only.

For several years, we have been studying several Alpine glaciers that are particularly significant in terms of their dimensions, typology and exposure, together with a re-constructive model of the historical variations over the course of centuries, their volume, extension and thickness. This research includes fieldwork (measurements of fronts, mass balances, geophysical and topographic surveying) and laboratory work (map and iconographic comparisons, preparation of physical and mathematical models). Therefore, there is now a set of georeferenced data with time intervals that sometimes span over a century. These data are well suited to the application of GIS methodologies for the purposes of data management, the preparation of thematic maps and to set up models of their evolution to forecast the future of these resources.

Several DEMs were compiled as a result of the GIS processing of the data on the sample glaciers, which were georeferenced by means of GPS methodology (for example Sforzellina Glacier in the Ortles Cevedale Group, Belvedere Glacier in the Mt. Rosa Group and Adamello Glacier). The comparison of the DEMs made it possible to obtain the mass balances in various times intervals for the glaciers examined, to compute the variations in area and volume and accurate mapping of the proglacial areas that have undergone changes recently, are most subject to instability and are thus potential hazards for visitors.

KEY WORDS: GIS, Alpine glaciers, GPS, environmental changes.

Introduzione

Per studiare i ghiacciai, soprattutto dal punto di vista applicativo, è indispensabile considerare che ci si trova di fronte ad un fenomeno estremamente dinamico. Il ghiacciaio è infatti un sistema aperto, caratterizzato da un incremento di massa (accumulo), dal trasferimento di quest'ultima (mediante un trasporto o flusso) e da una perdita di massa (ablazione). Quest'insieme di processi tende a portare il ghiacciaio in equilibrio con l'ambiente circostante, in particolare con gli elementi del clima, attraverso una serie di modificazioni dei suoi parametri dimensionali, soprattutto volume e lunghezza.

I ghiacciai, in quanto sistemi sensibili alle variazioni climatiche, sono attendibili ed efficaci indicatori delle modificazioni ambientali passate ed in atto. Inoltre essi rappresentano una risorsa ambientale in continua evoluzione, assimilabile a "acqua dolce in scatola"; essi rappresentano quindi importanti e strategiche risorse idriche (a scopo irriguo ed idroelettrico) da gestire con attenzione nell'ottica di uno Sviluppo Sostenibile qualitativo e non solo quantitativo.

Lo studio di alcuni ghiacciai alpini particolarmente significativi per dimensioni, tipologia ed

esposizione con la ricostruzione delle loro variazioni storiche plurisecolari, della loro volumetria, estensione e spessore viene effettuato da diversi anni dagli autori del presente contributo nell'ambito di progetti nazionali ed internazionali, sia con metodologie di terreno (misure frontali, bilanci di massa, rilievi geofisici e topografici) che di laboratorio (confronti cartografici e iconografici, elaborazione di modelli fisici e matematici).

Rilievi di terreno

Le fronti glaciali si modificano rapidamente come ultimo anello di una catena di fenomeni ambientali che inizia con le modificazioni climatiche globali. In Italia le misure delle variazioni frontali sono iniziate dalla fine del XIX secolo. La tecnica di misura più tradizionale, attuabile anche operatori non particolarmente esperti e poco dispendiosa dal punto di vista logistico ed economico, è quella che prevede l'utilizzo di strumenti topografici speditivi (come bindella e bussola) e successivamente di teodolite e distanziometro (fig. 1). Questi dati sono importanti soprattutto per la lunghezza della loro serie storica che in alcuni casi supera il secolo e permette di fare un primo bilancio della tendenza del glacialismo nel corso dei decenni. Attualmente questo tipo di misura viene realizzata anche con le moderne tecniche di tipo satellitare (apparecchi GPS).

Il secondo metodo utilizzato è quello del bilancio di massa che misura la differenza fra le entrate (accumulo) e le uscite (ablazione). Questo metodo si basa sull'utilizzo di aste appositamente infisse sul ghiacciaio lungo le quali vengono misurate le variazioni di spessore. A partire da questi dati puntuali si passa poi alla rappresentazione di aree di isoablazione o isoaccumulo e quindi a definire il bilancio di massa dell'intero ghiacciaio. La serie di dati più lunga disponibile sulle Alpi Italiane è quella del Ghiacciaio del Careser (Gruppo del Cevedale), che supera il trentennio di misure (fig. 2).

Di particolare importanza, come già accennato, è in tempi recenti l'uso del GPS. Questo strumento permette la ricostruzione dei caratteri geometrici (superficie, velocità superficiale, bilancio di massa) che caratterizzano un ghiacciaio e la loro ricostruzione nel tempo. I parametri geometrici e la loro corretta misurazione sono un elemento essenziale per studiare l'evoluzione degli apparati glaciali. Tutti questi parametri permettono inoltre di realizzare dei modelli che permettono anche di prevedere la tendenza evolutiva dei ghiacciai studiati analizzando le relazioni fra dinamica glaciale e dinamica climatica (fig. 3). Uno dei parametri geometrici più importanti di un ghiacciaio, anche ai fini applicativi, è lo spessore, che viene determinato mediante metodi geofisici. La prospezione geofisica più utilizzata da alcuni anni è il georadar, che permette di determinare in ogni punto lo spessore del ghiacciaio. Fino a qualche anno fa la tecnica geofisica più utilizzata e più precisa per il calcolo dello spessore glaciale era la sismica a riflessione che forniva sicuramente ottimi risultati,

riguardanti però un numero esiguo di punti. Ora si utilizza il georadar che è lievemente meno preciso della sismica, ma permette di poter ricostruire con maggiore velocità l'andamento del substrato roccioso di tutto il ghiacciaio. Questa tecnica ha infatti meno limiti per quanto riguarda la praticità e la maneggevolezza degli strumenti e può funzionare anche vicino alle pareti rocciose, dove la sismica non può essere effettuata. La riflessione dell'onda sismica viene infatti fortemente disturbata in quanto le pareti riflettono l'onda generata e ne disturbano fortemente la ricezione del segnale. Utilizzando un GPS accoppiato al georadar, si ottiene anche un corretto posizionamento del punto di misura e quindi si ricava contemporaneamente la posizione del punto in superficie e di quello sul fondo roccioso (fig. 4).

Gestione dati glaciologici tramite GIS

La dinamicità degli apparati glaciali e la continua esigenza di aggiornamento delle raccolte di dati, nonché la necessità di rappresentazioni cartografiche adeguate a questi veloci ritmi di trasformazione, fanno del GIS uno strumento essenziale in questo campo di ricerca, come emerge dagli esempi sotto riportati.

Anche le tradizionali misure delle variazioni frontali possono essere rielaborate con GIS dando luogo alla realizzazione di carte tematiche, ove è rappresentato il perimetro della fronte. In questo caso i dati possono essere raccolti con teodolite o con GPS, soprattutto per quanto riguarda la localizzazione dei segnali fissi esterni al ghiacciaio. Nell'esempio riportato nella fig. 5, è indicato il complesso delle variazioni frontali del Ghiacciaio Ventina (Alpi Retiche, Gruppo del Disgrazia) dal 1985 al 2000. E' agevole constatare come la fronte glaciale sia in continuo ritiro da 15 anni e come la rappresentazione cartografica permetta di cogliere esattamente le dimensioni del fenomeno.

Un altro utilizzo del GIS che attualmente si sta diffondendo in campo glaciologico è il confronto di carte topografiche rilevate in anni successivi, che permette di quantificare le variazioni di spessore e di volume nell'intervallo di tempo considerato e in pratica di realizzare un bilancio di massa. Si possono utilizzare, ad esempio, le numerose carte a grande scala, di molti ghiacciai italiani realizzate dal Comitato Glaciologico Italiano negli scorsi decenni e confrontarle con carte più recenti, realizzate appositamente da foto aeree oppure di normale commercializzazione come le CTR. Operativamente si procede alla georeferenziazione delle carte topografiche scannerizzate; il lavoro è più complesso quando le carte, specie quelle più antiche, sono realizzate attraverso sistemi di riferimento locali, più semplice il caso di cartografie inquadrare in sistemi di riferimento E' in ogni caso possibile georeferenziare anche le meno recenti attraverso il riconoscimento su entrambe le carte da confrontare di punti noti, quali cime, baite, rifugi ecc. Si può fare quindi una prima

valutazione sulla variazione areale e una seconda valutazione sulla variazione volumetrica. Questa seconda operazione è possibile attraverso la vettorializzazione delle isoipse. Le isoipse diventano quindi linee costituite da nodi che hanno in sé un'informazione relativa alle coordinate e alla quota. A questo punto, avendo a disposizione una serie sufficiente di punti, è possibile creare dei DEM delle cartografie esistenti. Se i DEM sono costruiti con gli stessi criteri (rappresentazione della medesima area, ugual maglia tra le intersezioni del DEM), si può procedere al confronto volumetrico di due o più DEM. Si ottiene quindi la variazione di volume di ghiaccio fra le cartografie così rappresentate che non è altro che il bilancio da massa dell'apparato glaciale considerato su scala temporale più grande di quella che si ottiene con il rilievo sul terreno attraverso l'utilizzo delle paline. In figura 6 è mostrato un esempio di questa tipologia di lavoro per quanto concerne il ghiacciaio principale dell'Adamello E' stata confrontata una cartografia del 1959 in scala 1:5000 realizzata da Comitato Glaciologico Italiano con la Carta Tecnica Regionale della Lombardia del 1982. Ne è risultata una carta delle isovariations che permette di verificare quali sono le aree con le maggiori variazioni di spessore di ghiaccio.

Un metodo più complesso è quello di ricavare le carte di confronto e i relativi DEM della superficie del ghiacciaio da strisciate aeree. Tramite software opportuni è possibile ricostruire la cartografia del ghiacciaio con la medesima tecnica con cui opera, ad esempio, la Regione Lombardia.

Come esempio della gestione dei dati raccolti sul terreno si mostrano i risultati ottenuti a proposito del Ghiacciaio della Sforzellina, un piccolo apparato di circo situato presso il Passo Gavia nel gruppo del Cevedale (Alpi Retiche). Nelle figure 7 e 8 sono presentati i due DEM riguardanti rispettivamente la topografia superficiale realizzata con GPS e la topografia del fondo roccioso realizzata mediante georadar servito da GPS. In entrambi i DEM si osservano le principali caratteristiche morfologiche della superficie del ghiacciaio e del fondo roccioso; per quest'ultima in particolare si nota la profonda e tipica sovraescavazione del settore centrale del circo, dovuta all'esarazione glaciale. La sovrapposizione dei due DEM ha permesso la realizzazione di una carta tematica degli spessori di ghiaccio (fig. 9), che evidenzia un massimo di circa 60 m nel settore centrale del ghiacciaio.

Il GIS permette anche la gestione dei dati sul bilancio di massa ottenuto con il classico metodo delle paline ablatometriche. Nella fig. 10 è indicata la localizzazione dei punti di misura sulla superficie del ghiacciaio, unitamente alla distribuzione per fasce omogenee di ablazione e accumulo.

Un ultimo esempio di carta tematica glaciologica realizzata con GIS è quello della fig. 11. Si tratta del Ghiacciaio del Belvedere, situato ai piedi del versante orientale del Monte Rosa. Il Belvedere è uno dei pochi ghiacciai alpini definito "nero" o *debris covered*; la sua lingua è quasi completamente

ricoperta da detriti morenici derivanti dal disfacimento crioclastico delle pareti rocciose circostanti. Sul terreno è stato misurato lo spessore del detrito in numerosi punti (circa 300) che sono stati georeferenziati con GPS; ciò ha permesso di costruire la carta tematica della figura 11, importante per la determinazione del bilancio termico, visto che il detrito superficiale modifica gli scambi energetici fra ghiaccio e atmosfera.

Conclusioni

Il GIS si è mostrato uno strumento di notevole interesse nell'elaborazione dei dati glaciologici; grazie infatti alla dinamicità ben si presta a supportare analisi di un fenomeno dinamico come quello glaciale, permettendo di integrare e di aggiornare le informazioni raccolte sul terreno, di effettuare elaborazioni complesse di analisi spaziale, quali l'applicazione di modelli matematici, le operazioni di intersezione tra tematismi diversi, i calcoli di distanze e di superfici, l'associazione o la selezione di elementi di diversa natura.

I vantaggi del sistema GIS in campo glaciologico si possono così sintetizzare:

- precisione del metodo
- velocità di esecuzione
- possibilità di rapido aggiornamento
- possibilità di quantificare i parametri morfometrici dei ghiacciai
- possibilità di confronto delle varie tipologie di dato
- modellizzazione

Riferimenti bibliografici

Barsanti M., Casartelli G., Guglielmin M., Pelfini M., Smiraglia C. & Stella G. (1995) - *Nove anni di bilancio negativo al ghiacciaio della Sforzellina (Alpi Lombarde), rapporti con il clima ed ipotesi di estinzione*. Geogr. Fis. Dinam. Quat., 18, pp 229-234.

Bogorodskiy V.V., Bentley C.R. & Gudmandsen P.E. (1985) - *Radioglaciology*. Reidel, Dordrecht.

Carabelli E. (1962 a) - *Misure sismiche di spessore del Ghiacciaio del Pian di Neve (Adamello)*. Boll. Comit. Glac. It., II, 11, pp. 51-60.

Carabelli E. (1962 b) - *Esplorazione geofisica al Ghiacciaio del Careser*, Boll. Comit. Glac. It., II, 11, pp. 61-69.

Cassinis R. & Carabelli E. (1954) - *Misure di spessore del ghiaccio con il metodo sismico al Ghiacciaio dei Forni*. Boll. Com. Glac. It., II, 5, 3-12.

Descloitres M., Guérin R., Ramirez E., Gallaire R., Ribstein P. & Valla F. (1999) - *Détermination*

de l'épaisseur des glaciers de Sarenne (Alpes) et de Chacaltaya (Bolivie) par prospection radar au sol à 50 MHz., Société Hydrotechnique de France, Section de Glaciologie, Réunion des 4 et 5 Mars, 1999, Grenoble, 10 pp.

Fiucci A., Gigante B., Rossi C., Smiraglia C. & Veggetti O. (1997) - *The Calderone Glacier (Gran Sasso d'Italia). Determination of ice thickness and bedrock morphology by means of Radio-Echo Sounding*. Geogr. Fis. Dinam. Quat., 20, 305-308.

Fountain A.G. & Jacobel R.W. (1997) - *Advances in ice radar studies of a temperate alpine glacier, South Cascade Glacier*, Washington, U.S.A.. Annals of Glaciology, 24, 303-308.

Frassoni A., Rossi G.C., & Tamburini A. (1999) - *Studio del Ghiacciaio dell'Adamello mediante indagini georadar*, Convegno "Risposta dei ghiacciai alpini ai cambiamenti climatici", Bormio, 9-12 Settembre 1999, Riassunti, 49.

Funk M., Bosch H. & Valla F. (1993) - *Mesures des épaisseurs de glace par la méthode radar au Glacier de Sarnes*. Société Hydrotechnique de France, Section de Glaciologie, Réunion des 11 et 12 mars, Grenoble, 13 pp.

Guglielmin M., Nardo A. & Smiraglia C. (1995) - *Spessore dei ghiacciai della Valfurva, misurazioni tramite Sondaggi Elettrici Verticali*. Neve e Valanghe, n.24, 58-67.

Haeberli W., Wachter H. P. Schmid W. & Sidler C. (1983) - *Erste Erfahrungen mit dem US Geological Survey monopuls Radioecholot im Firn, Eis und Permafrost der Schweizer Alpen*, Zeitschr. Gletscherk. Glazialgeol., 19, 61-72.

Iliceto V. & Andrieux P. (1965) - *Mesures électriques sur le Glacier de la Marmolada (Alpes Orientales)*. Boll. Com. Glac. It., II, 15, 71-90.

Lesca C. & Armando E. (1972) - *Determinazioni delle variazioni superficiali e volumetriche dal 1965 al 1970 e controllo della velocità di propagazione delle onde sismiche sul ghiacciaio de la Lex Blanche*. Boll. Com. Glac. It., II, 20, 65-86.

Merlanti F., Pavan M., Smiraglia C., Urbini S. (1995) - *Prospezione sismica a riflessione sul Ghiacciaio dei Forni (Alpi Lombarde, Gruppo del Cevedale)*, Atti del 14° Convegno annuale del Gruppo Nazionale di Geofisica della Terra Solida, Roma 23-25 Ottobre 1995, 639-942.

Pavan M., Diolaiuti G., Smiraglia C., Maggi V. & D'Agata C. (2000), *Prospezioni sismiche e radar sul Ghiacciaio della Sforzellina*, Neve e Valanghe, 41, 6-13.

Ringraziamenti

Gli studi sono stati realizzati nell'ambito del Cofinanziamento MURST 1999, Progetto di Ricerca: "Ghiacciai alpini e variazioni ambientali", responsabile nazionale Prof. A. Biancotti, responsabile

locale Prof. A. Bini e nell'ambito della convenzione CESI- Università di Milano (contratto n° P1211)
dal titolo : “I ghiacciai alpini : l’attuale fase di degradazione di una risorsa idrica fondamentale”,
responsabile Prof. C. Smiraglia.

Un ringraziamento particolare va a G. Stella del CESI di Segrate (MI).

Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Milano



Fig. 1 Misura di variazione frontale tramite l'utilizzo del teodolite.



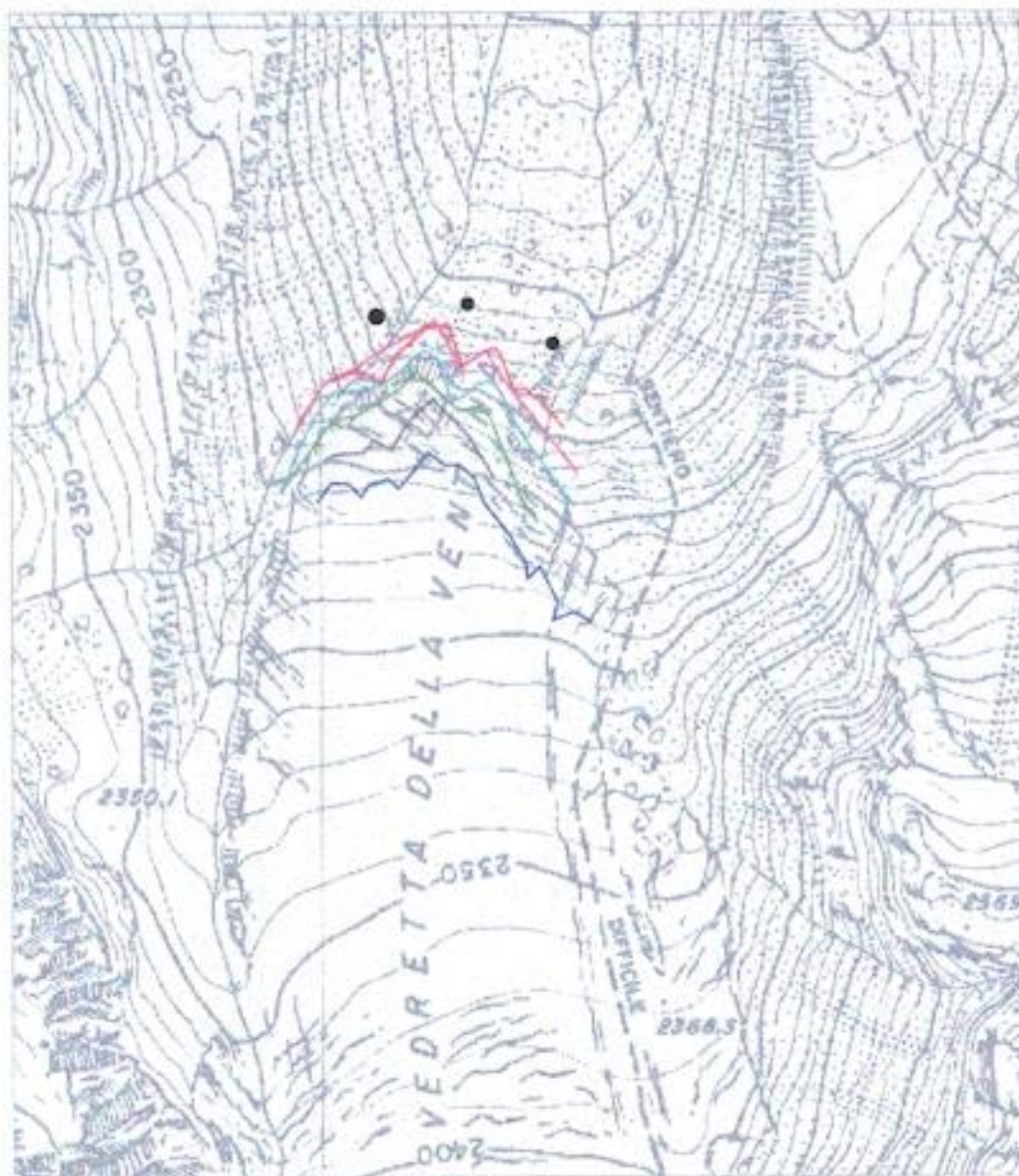
Fig. 2 Misurazione di una palina ablatometrica, utilizzata per il calcolo del bilancio di massa del ghiacciaio.



Fig. 3 Misurazione di un punto tramite la metodologia GPS.



Fig. 4 Esecuzione di sondaggi georadar su di un apparato glaciale.



LEGENDA:

LIMITI FRONTALI



Fig. 5 Evoluzione della fronte del Ghiacciaio del Ventina negli ultimi 15 anni. Base topografica: Carta Tecnica Regione Lombardia.

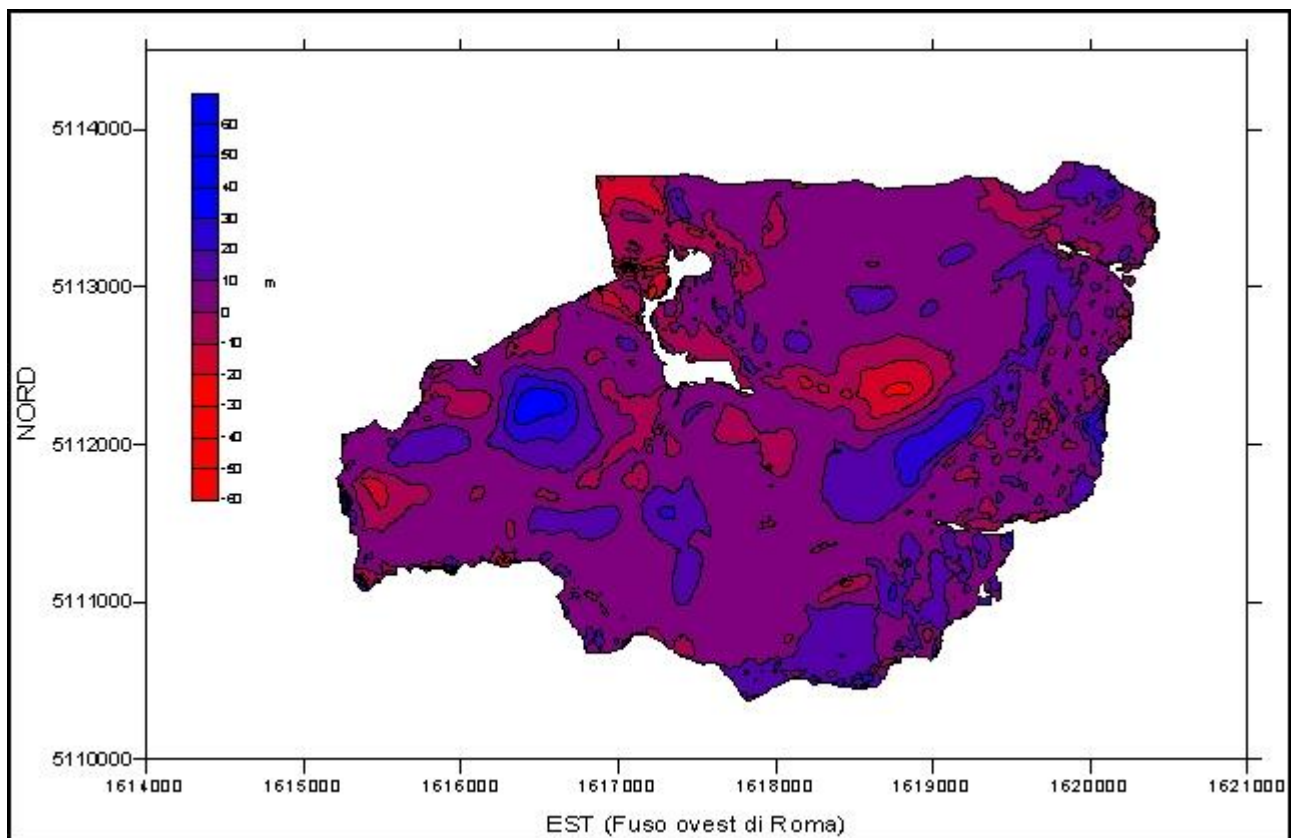


Fig. 6 Carta delle isovariazioni del Ghiacciaio centrale dell'Adamello (settore Passo Adamè) dal 1959 al 1982.

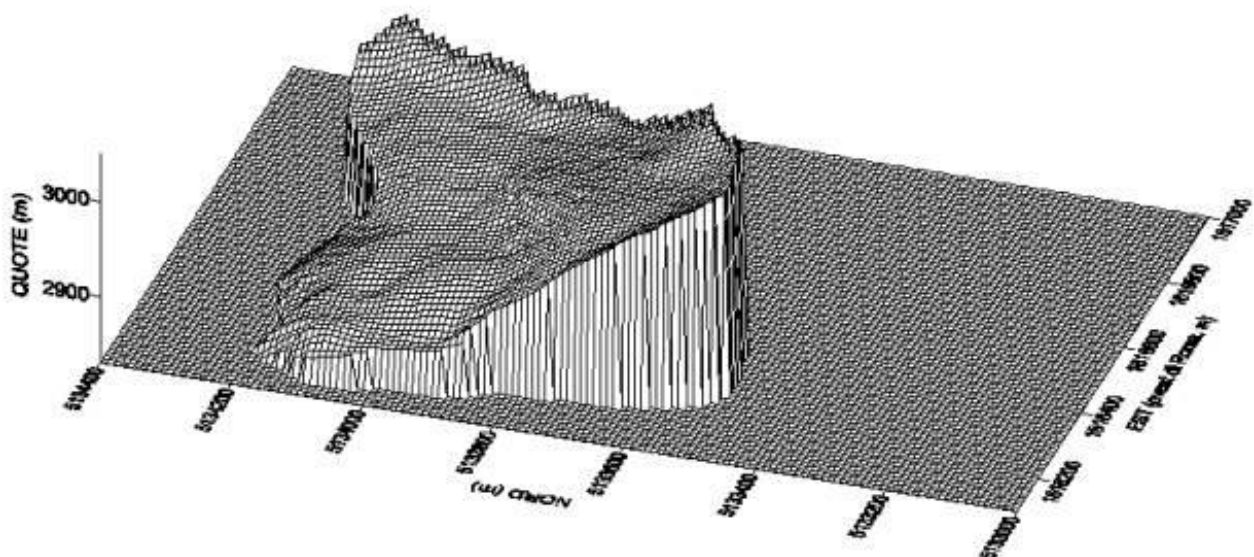


Fig. 7 DEM (digital elevation model) della superficie del Ghiacciaio della Sforzellina ottenuta da rilievi topografici (GPS) 1999.

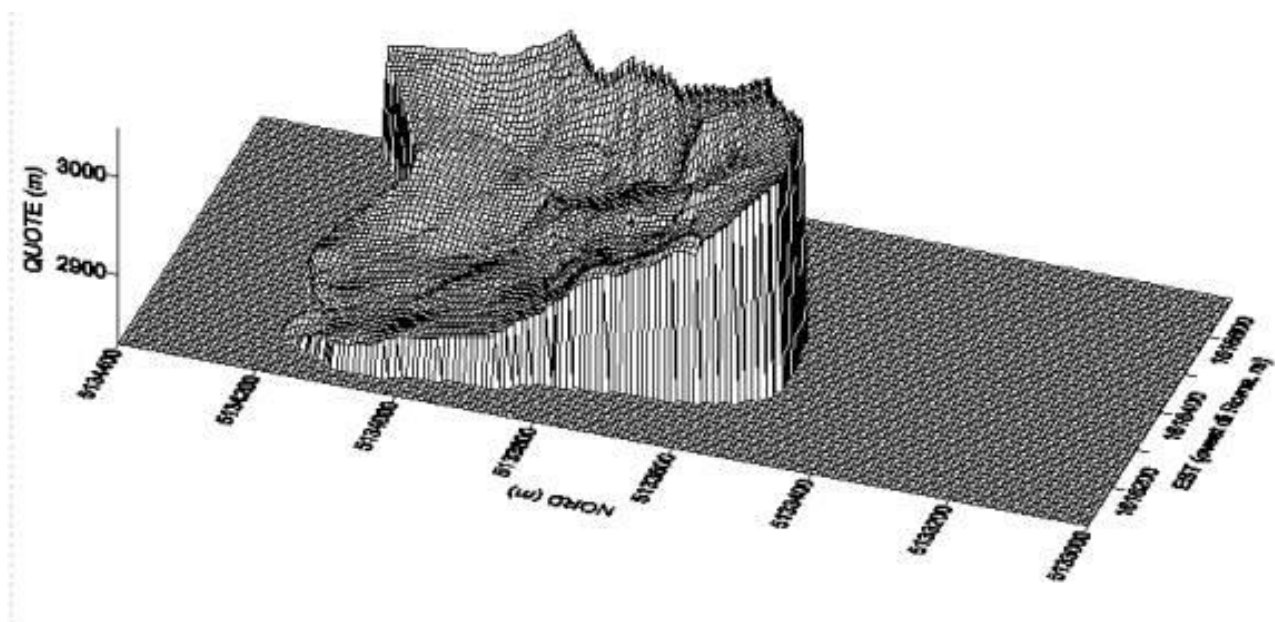


Fig. 8 DEM (digital elevation model) del Ghiacciaio della Sforzellina ottenuta da rilievi geofisici (prospezione radar).

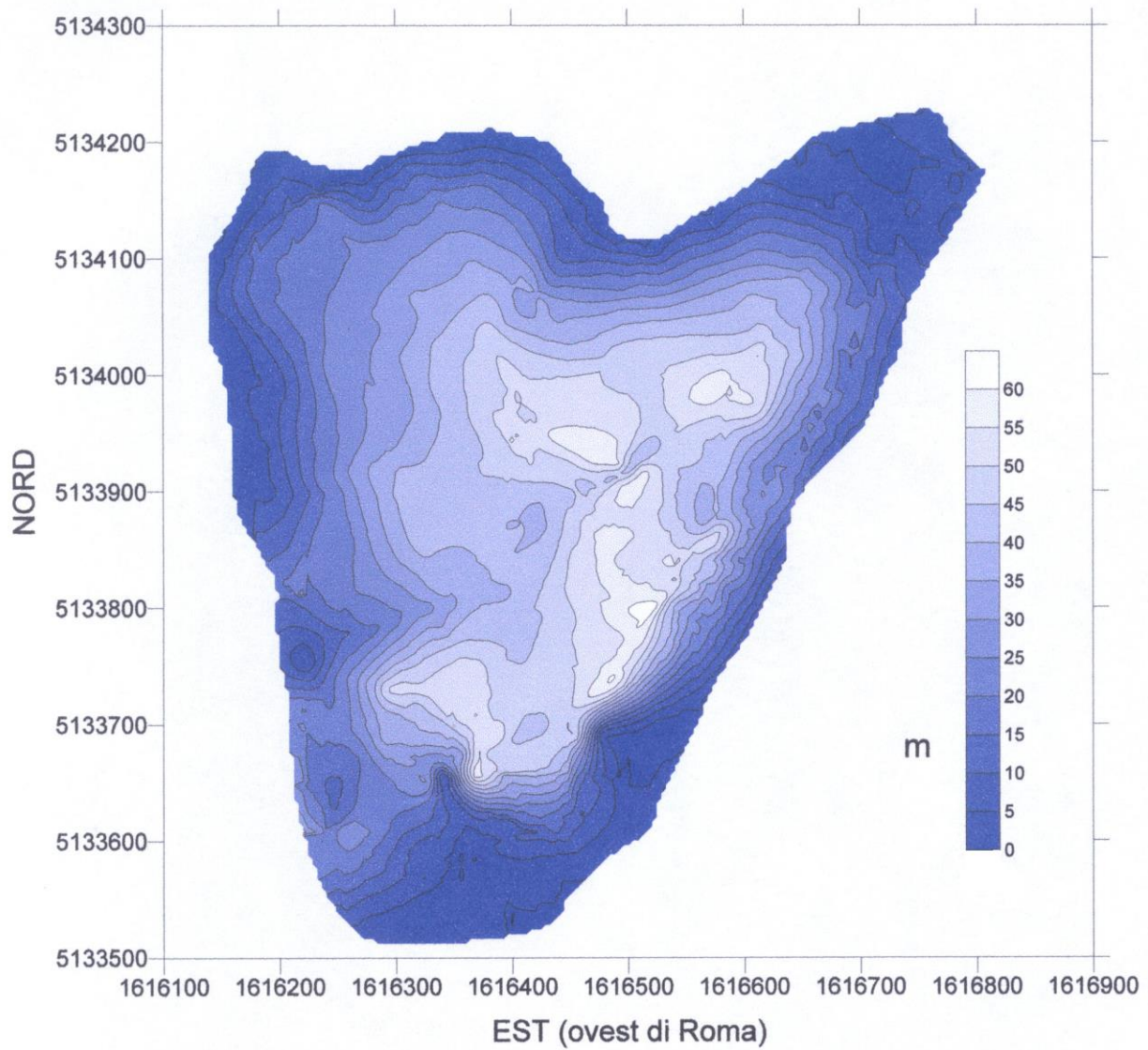


Fig. 9 Carta dello spessore di ghiaccio ottenuta dal confronto tra DEM della superficie e DEM del bed-rock (Ghiacciaio della Sforzellina- 1999).

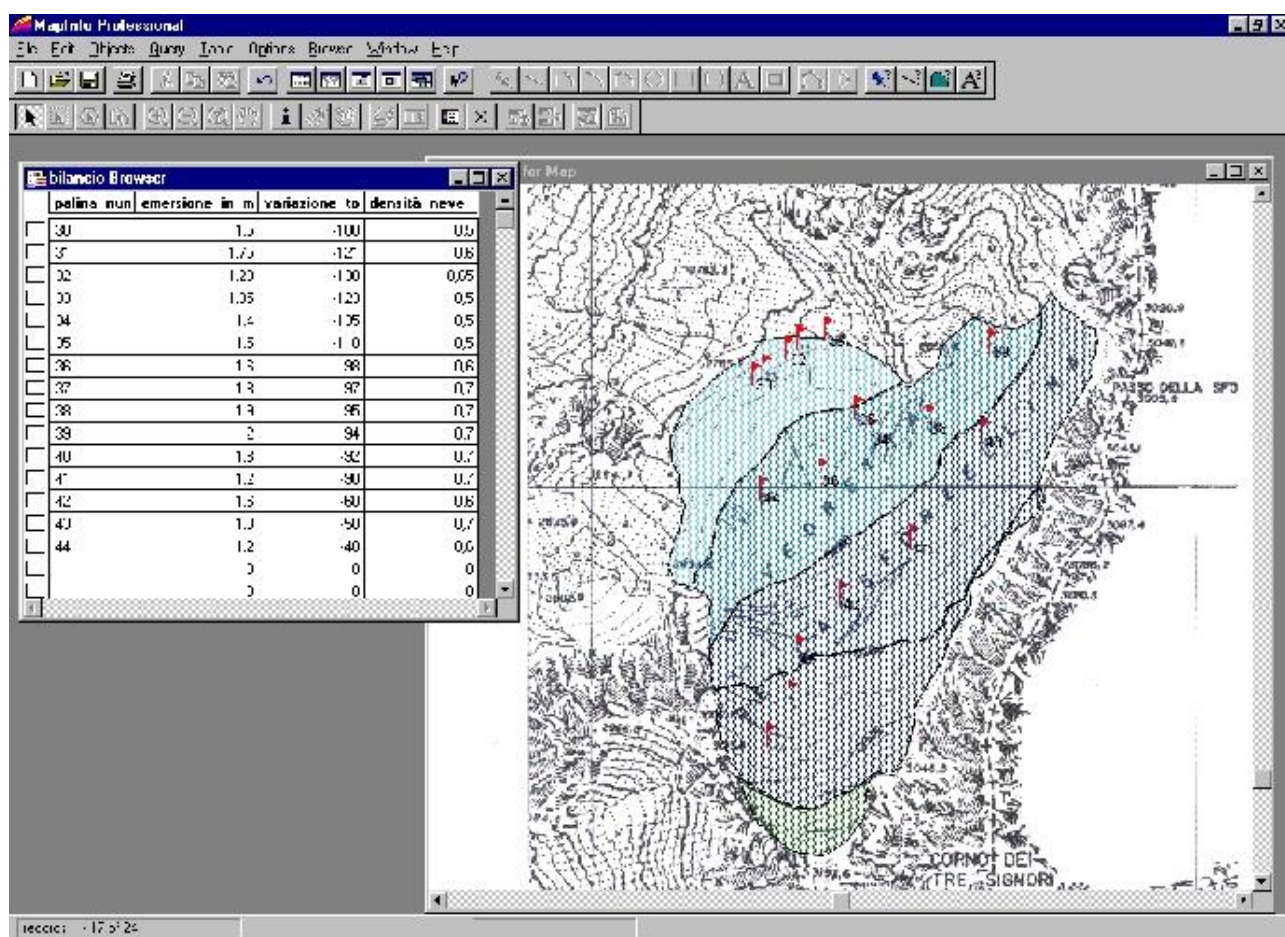


Fig 10 Applicazione del GIS per il calcolo del bilancio di massa del Ghiacciaio della Sforzellina.

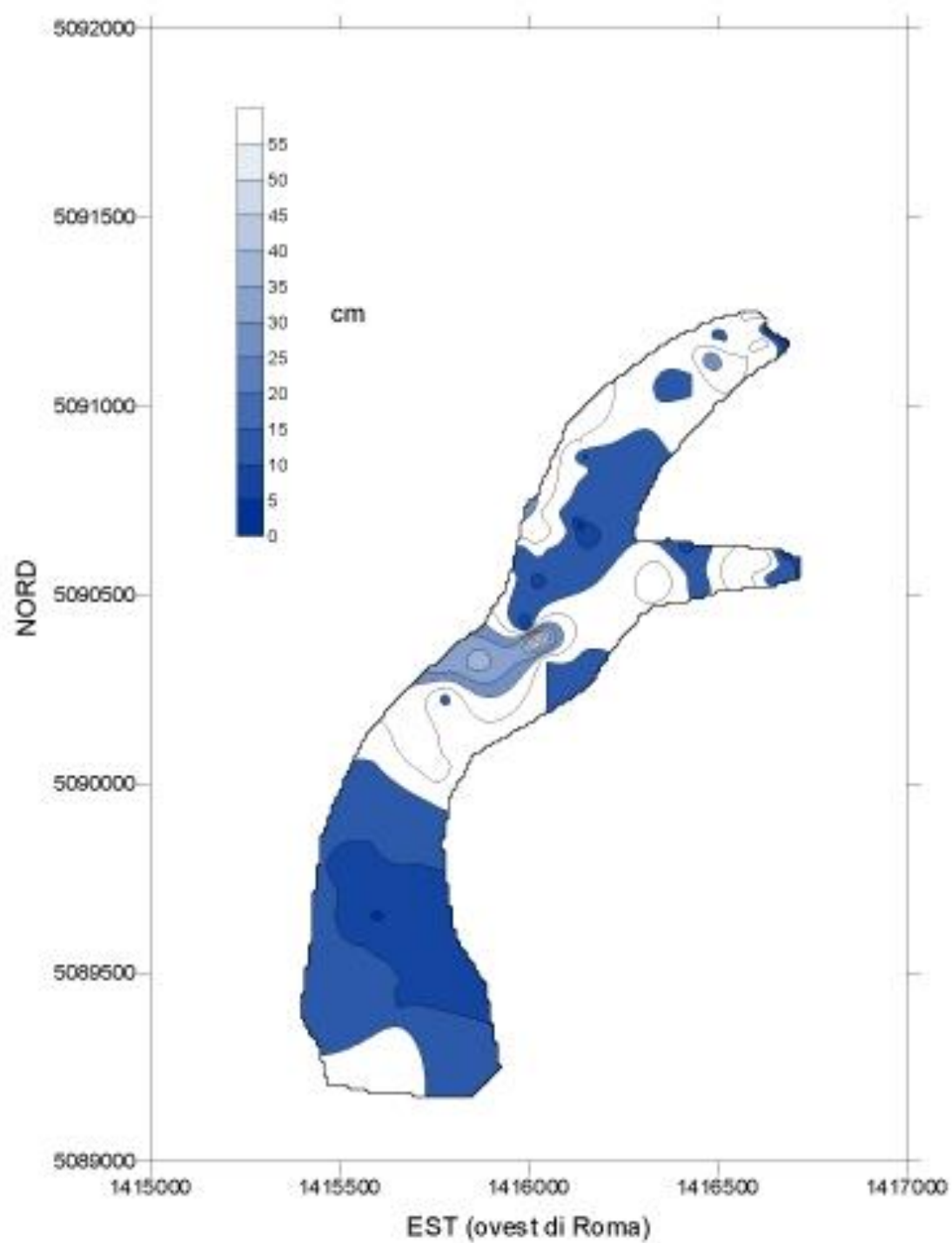


Fig. 11 Carta dello spessore del detrito (Ghiacciaio del Belvedere – Monte Rosa) ottenuta con l'ausilio del GPS.