

RECENTI ATTIVITÀ di MONITORAGGIO del GHIACCIAIO dello STELVIO

Matteo Fioletti ¹,
Susanna Grasso ¹, Luigi Bonetti ¹
Riccardo Scotti ², Paolo Gallo ²

Tecnici che hanno collaborato ai rilievi:
Paolo Gallo, Giovanni Prandi, Valentino Sosio,
Matteo Fioletti, Luigi Bonetti, Eraldo Meraldi,
Alfredo Praolini, Flavio Berbenni, Vittorio Ortelli, Isacco Sala
Con la collaborazione di: Spektra S.r.l., S.I.F.A.S. S.p.a

¹ Centro Nivometeorologico ARPA Lombardia, Bormio (SO)
² Servizio Glaciologico Lombardo

Primi risultati di indagini integrate in ambito nivologico, glaciologico e geofisico

RECENT MONITORING ACTIVITIES ON THE STELVIO GLACIER

First results of integrated investigations in the field of snow science, glaciology and geophysics. The recession of glaciers is nowadays a known and evident phenomenon. In particular, in the recent thirty-year period, alpine glaciers are experiencing a substantial and severe shrinking due to rising temperatures. From a scientific perspective, monitoring the variations of glaciers provides evidence and helps in determining the impacts of the ongoing climate change on a global scale; on the other hand, at a local scale, this represents an essential activity to evaluate the water resource related to the glacier and to forecast effects on the mountain environment, local communities and ecosystems. Moreover, the Stelvio Glacier represents an important economic and touristic resource linked to summer alpine skiing activities at amateur and professional level. In 2019 a Stelvio Glacier monitoring project has been started in collaboration among ARPA Lombardia, Servizio Glaciologico Lombardo (SGL) and Polytechnic University of Torino. Such project aims at evaluating the variations in time of the glacial complex related to the ongoing climate change and the effects on human activities. For this purpose several quantitative methods have been (and will be) employed, and have been made easier with respect to traditional ones thanks to new technology (as the use of drones for remote sensing) for monitoring glaciological parameters. In this article, the performed activities and the results of the first two years (2019 and 2020) of investigation will be presented, allowing to define the "present state" of the Stelvio Glacier in the area dedicated to summer alpine skiing activities. Thanks to Ground Penetrating Radar (GPR) method performed in collaboration with the Politecnico di Torino and to the photogrammetric and topographic survey carried out with the SGL, it has been possible to elaborate a digital surface model (DSM) and to estimate the reduction of mass comparing it to a DSM dating back to 2011. For the whole studied area it has been concluded that, overall, in the last 9 years there has been an average loss of 6.85 mt corresponding to a volume of 10,635,825 m³. In addition, satellite images have been employed to modify the existing glacier outlines and to estimate the surface glacier area variations by calculating the difference in the spatial extent in 2006, 2007 and 2020. The relative area loss is estimated to be of 18.7% for the Vitelli Glacier, of 19% for the Madaccio Glacier and of 18% for the Vedretta Piana Glacier. In September 2020 two ice ablation trackers have been placed in the ablation area and near the summit of the glacier; in the next years they will help in estimating the surface mass balance of the glacier. The accomplished activities in this first field campaign allowed a first reconstruction of the evolution of the glacier and they aim at being the beginning of a monitoring programme for the Stelvio Glacier, especially for the fraction used as an alpine skiing resort, making it possible to observe the autumn glacier mass variations, and so to get a picture of its "health state" and of the available water resource.

La recessione dei ghiacciai è ormai un fenomeno tanto noto quanto evidente. In particolare nell'ultimo trentennio, i ghiacciai alpini stanno subendo un incisivo e rapido ridimensionamento dovuto principalmente all'innalzamento delle temperature.

Se da un punto di vista scientifico monitorare le variazioni glaciali consente di documentare e quantificare l'impatto delle variazioni climatiche in atto a scala globale, a livello locale rappresenta un'attività fondamentale per valutare la risorsa idrica a questo legata e per prevedere effetti sul territorio montano, sulle comunità e sugli ecosistemi. Il Ghiacciaio dello Stelvio assume anche una notevole valenza economica e turistica legata alla pratica dello sci estivo sia di tipo turistico sia indirizzata alla preparazione atletico-sportiva a livello professionistico. Nel 2019 è stato avviato il progetto di monitoraggio dei ghiacciai dello Stelvio in collaborazione tra ARPA Lombardia, Servizio Glaciologico Lombardo (SGL) e il Politecnico di Torino con l'obiettivo di valutare le variazioni nel tempo del complesso glaciale in relazione ai cambiamenti climatici in atto e agli effetti delle attività umane. A tal fine sono stati impiegati diversi metodi quantitativi, resi più speditivi rispetto ai metodi tradizionali, quale l'uso dei droni per il telerilevamento.

In questo articolo vengono dunque presentate le attività svolte ed i risultati ottenuti nei primi due anni di indagine, 2019 e 2020, che hanno permesso di definire lo "stato di fatto" del Ghiacciaio dello Stelvio in quella che è l'area dedicata allo sci estivo. Grazie alle indagini georadar per la stima dello spessore di ghiaccio effettuate in collaborazione con il Politecnico di Torino ed ai rilievi fotogrammetrici e topografici svolti con l'SGL è stato possibile riprodurre un modello digitale della superficie (DSM) e stimare una riduzione di massa confrontandolo con un DSM del 2011. Per l'intera porzione di studio si è desunto che complessivamente negli ultimi 9 anni vi è stata una perdita media di di spessore di 6,85 m, per un volume complessivo di -10.625.825 m³. In termini di variazioni areali della superficie, l'aggiornamento dell'estensione all'anno 2020 ha permesso di individuare una perdita percentuale totale del 18,7% per quanto riguarda il Ghiacciaio Vitelli, del 19% per il Ghiacciaio del Madaccio e del 18% per il Ghiacciaio di Vedretta Piana. Nel mese di settembre 2020 sono state posizionate 2 paline ablatometriche che nei prossimi anni permetteranno di quantificare il bilancio di massa superficiale del ghiacciaio.

Le attività svolte in questa campagna di misura hanno quindi permesso una prima ricostruzione dell'evoluzione del ghiacciaio ma vogliono essere l'inizio di un programma di monitoraggio del Ghiacciaio dello Stelvio che consentirà di osservare le variazioni annuali di massa fornendo un quadro del suo "stato di salute" e della risorsa idrica.



INTRODUZIONE

La riduzione dei ghiacciai è fatto tanto assodato quanto evidente. In particolare nell'ultimo trentennio, i ghiacciai alpini stanno subendo un incisivo e violento ridimensionamento dovuto principalmente all'innalzamento delle temperature [2][3][4][5].

I ghiacciai sono entità naturali fortemente dinamiche che rispondono in modo rapido e diretto al cambiamento climatico modificando le proprie dimensioni e le proprie caratteristiche morfologiche. Monitorare le variazioni glaciali consente quindi da un lato di documentare e quantificare l'impatto delle variazioni climatiche e dall'altro di valutarne gli effetti sul territorio montano, sulle comunità e sugli ecosistemi (es. ripercussioni sull'approvvigionamento idrico, sulla produzione di energia idroelettrica, sulla produttività agricola delle zone a valle e sul turismo montano).

Il Ghiacciaio dello Stelvio assume, oltre agli aspetti appena citati, anche una importante valenza economica e turistica legata alla pratica dello sci estivo. Sviluppata a partire dal 1930 come attività prevalentemente di tipo turistico, a partire dagli anni '80 è stata sempre più indirizzata alla preparazione atletico-

sportiva a livello professionale.

Nonostante l'importanza che la risorsa nivale che tale ghiacciaio riveste e l'osservata deglaciazione complessiva delle Alpi, sono molto rari sia lavori scientifici che attività di monitoraggio glaciologici. Risalgono infatti agli anni 1999-2000 lavori pubblicati [7][8] e i rilievi condotti (mediante tecnica di telerilevamento GPS RTK -*Real Time Kinematics*) per determinare la stima volumetrica della porzione di ghiacciaio chiamata localmente *Vedretta Piana*.

Per quel che riguarda la copertura nevosa, dal 2005/2006 il Centro Nivometeorologico di ARPA Lombardia (CNM) effettua invece con sistematica periodicità, nel periodo estivo, puntuali registrazioni di altezza del manto nevoso [1]. Questo parametro risulta utile e indicativo a livello glaciologico per quantificare l'innnevamento annuo residuo.

Nel 2019 è stato avviato il progetto di monitoraggio dei ghiacciai dello Stelvio. La collaborazione tra ARPA Lombardia, Servizio Glaciologico Lombardo (SGL) e il Politecnico di Torino si prefigge l'obiettivo di valutare le variazioni nel tempo del complesso glaciale in relazione ai cambiamenti climatici in atto e agli effetti delle attività umane. Tutto ciò sfrut-

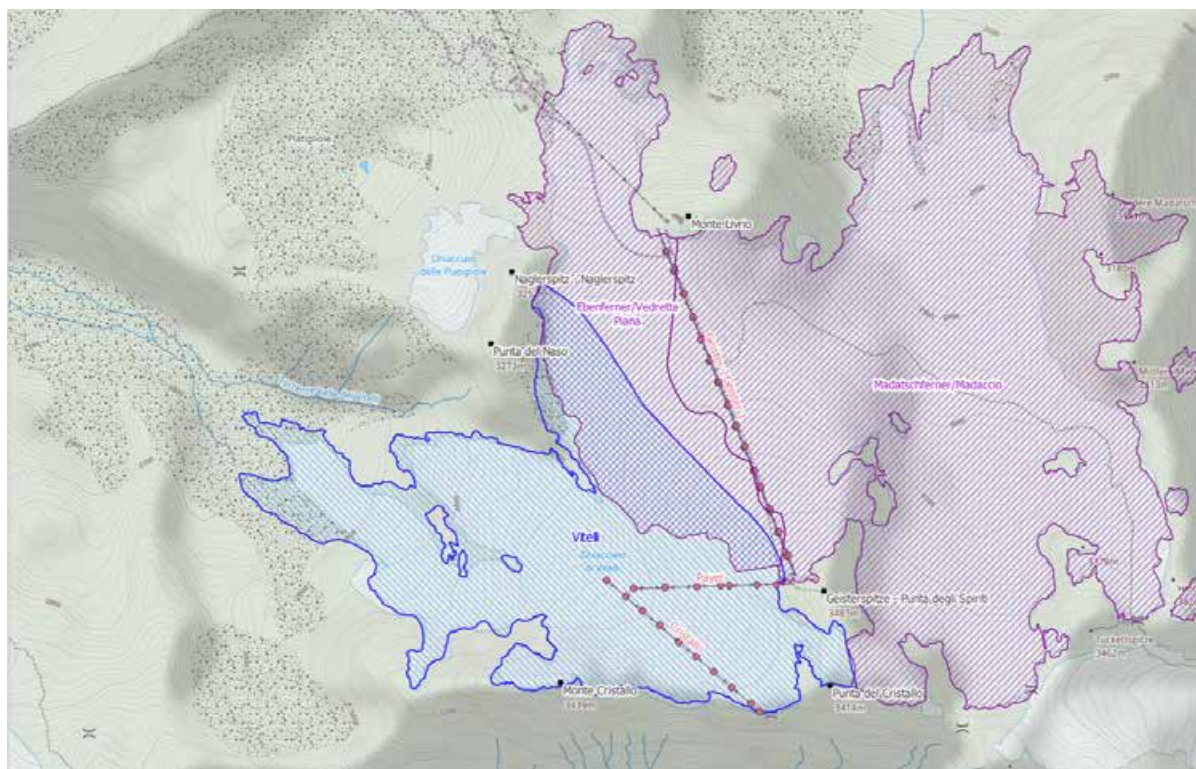
tando nuove tecnologie di monitoraggio, quale l'uso dei droni, che rendono più accessibile e speditiva la mappatura e il telerilevamento dei ghiacciai.

QUALCHE
PREMESSA: PILLOLE
INTRODUTTIVE DI
GLACIOLOGIA

Per valutare lo "stato di salute" di un ghiacciaio, in particolare se questo sia in fase di accrescimento o diminuzione, occorre considerare il delicato equilibrio tra apporti nevosi e perdite per ablazione (fusione di neve e ghiaccio, sublimazione, deflazione eolica) ovvero valutare le variazioni di volume del ghiacciaio studiando il "bilancio" tra questi due fattori. Il *bilancio di massa*, calcolato nell'arco dell'anno idrologico (convenzionalmente da inizio ottobre a fine settembre) ed espresso come volume equivalente di acqua (w.eq.), è quindi uno dei parametri più significativi e maggiormente utilizzati nello studio e nel monitoraggio di un ghiacciaio.

Operativamente, il bilancio di massa può essere stimato utilizzando diversi metodi e strumentazioni. Con *bilancio glaciologico* si fa riferimento alla più tradizionale delle misure, la quale si basa sull'estra-

Fig. 1 - Mappa del Ghiacciaio dello Stelvio con la suddivisione nei tre apparati di cui è composto. Il Ghiacciaio dello Stelvio suddiviso nei tre apparati glaciali congiunti tra loro e catalogati dal CGI [8] come: Ghiacciaio Vitelli (ID: 480) in blu, Madaccio (ID: 771) e Vedretta Piana / Ebenferner (ID: 772) in viola. Per offrire un quadro d'insieme dei tre apparati glaciali, sono stati utilizzati per produrre la presente mappa: la geometria del Ghiaccio Vitelli con l'estensione rilevata da ortofoto nel 2007 consultabile tramite servizio WMS dal Geoportale della Lombardia e, per i ghiacciai del Madaccio e di Vedretta Piana, le geometrie del Catasto dei Ghiacciai aggiornato al 2006 e reso disponibile tramite il Geocatalogo della Rete Civica dell'Alto Adige. In rosa gli impianti "ski-lift" sciovie Geister1 e Geister2, Payer e Cristallo. Scala: 1:20000. Basemap: OCM Landscape.



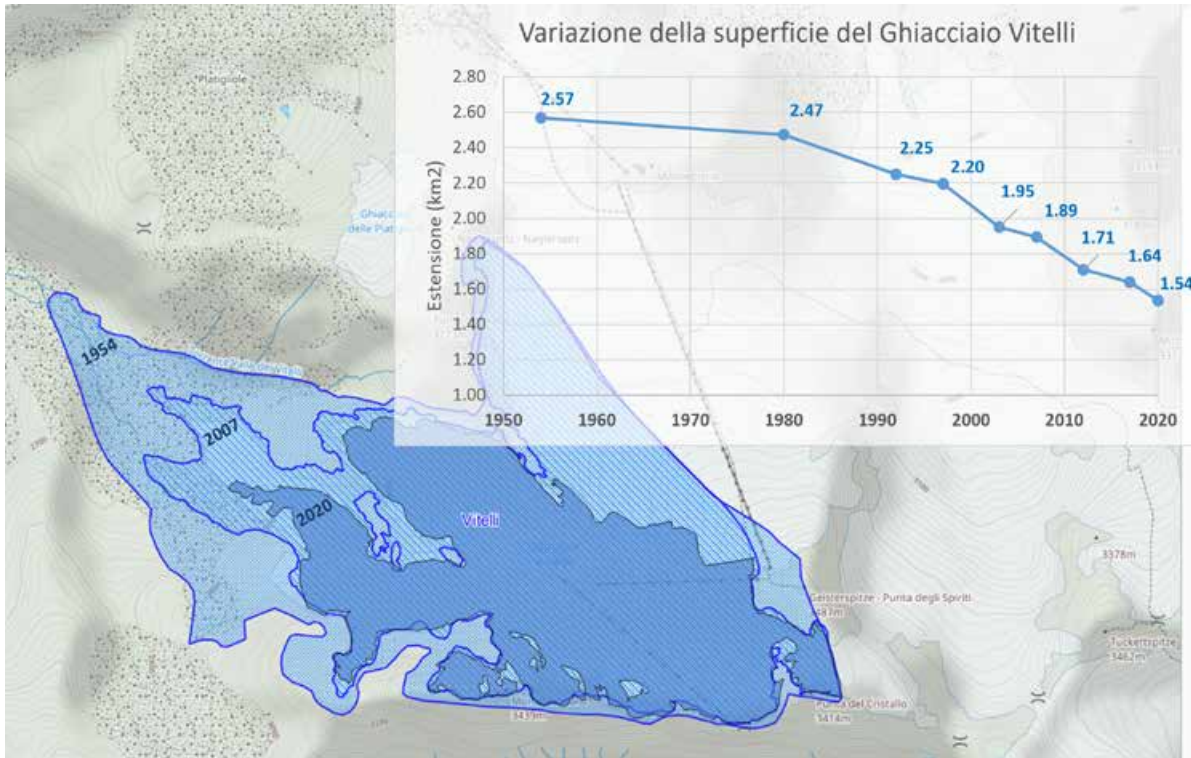


Fig. 2 - Infografica riportante la variazione dell'estensione del Ghiacciaio Vitelli dal 1954 al 2020. Fonte dati: Geoportale della Lombardia. Aggiornamento estensione del 2020 tratto dal presente studio.

polazione di periodiche misure puntuali (misure di valori di accumulo e di ablazione¹) eseguite in corrispondenza di paline ablatometriche infisse nel ghiaccio. Questo metodo, largamente utilizzato a scala globale da decine di anni, porta con sé alcuni limiti sia dal punto di vista pratico (difficoltà di accesso al ghiacciaio, necessità di svolgere frequenti misurazioni, rottura/perdita delle paline) oltre a possibili inaccurately dovute a problemi di interpolazione causati dalla scelta di punti poco rappresentativi in fase di collocazione delle paline.

Il metodo che attualmente fornisce i risultati più solidi, sia dal punto di vista dell'accuratezza che della praticità in termini logistici è il *metodo geodetico*. Quest'ultimo prevede il rilevamento (fine settembre) della superficie del ghiacciaio mediante rilievi topografici diretti o aerofotogrammetrici che, confrontati con modelli di superficie riferiti a epoche diverse, consente di ottenere una variazione di volume. Questo metodo, presenta una valida alternativa al metodo tradizionale glaciologico soprattutto se integrato con analisi in buca del manto nevoso che consentono di attribuire il valore di densità al volume e calcolare quindi il valore netto del bilancio di

massa in termini di w.eq. [2].

Il rilievo della superficie e la costruzione del modello digitale di elevazione può essere condotto utilizzando diverse tecniche e strumentazioni:

- elaborazione di immagini satellitari;
- rilievi fotogrammetrici da aereo, elicottero, drone;
- rilievi laser scanner da aereo, elicottero o da terra;
- rilievi topografici diretti della superficie glaciale con metodi tradizionali o tecnica GPS differenziale;
- rilievi georadar per la determinazione degli spessori del ghiaccio.

INQUADRAMENTO GEOGRAFICO DELL'AREA OGGETTO DI STUDIO

L'area oggetto di studio è rappresentata dall'attuale superficie sciabile della stazione sciistica estiva del Ghiacciaio dello Stelvio situata a cavallo tra Lombardia e Alto Adige.

L'area sciistica ricade su 3 apparati glaciali congiunti tra loro, la parte superiore del *Ghiacciaio dei Vitelli* situato in territorio lombardo e appartenente al bacino dell'Adda, l'intero ghiacciaio di Vedretta Piana situato in parte in

Lombardia e in parte in Alto Adige e la porzione più occidentale del ghiacciaio del *Madaccio* in territorio Altoatesino appartenente al bacino dell'Adige (nomenclatura dal "Nuovo Catasto dei Ghiacciai" (Fig. 1) [8].

L'area oggetto di studio ricopre una superficie di 1.550.386 m² e si estende dai 2983 m. s.l.m. (fronte del ghiacciaio di Vedretta Piana) fino ai 3369 m. s.l.m. (quota relativa all'arrivo delle sciovie *Geister1* e *Geister2*).

AGGIORNAMENTO ESTENSIONE GHIACCIAI

Come punto di partenza per aggiornare l'estensione dei ghiacciai coinvolti sono stati utilizzati i dati del Geoportale dell'Alto Adige (<http://geokatalog.buergernetz.bz.it/>) dov'è possibile scaricare le geometrie dei ghiacciai del Madaccio e di Vedretta Piana aggiornati all'anno 2006. Mentre per il ghiacciaio dei Vitelli si è partiti dalla mappatura "Ghiacciai della Lombardia", aggiornata al 2018, consultabile tramite il Geoportale della Lombardia (<https://www.geoportale.regione.lombardia.it/>).

Le geometrie sono state successivamente aggiornate al 2020 tramite fotointer-

GLACIOLOGIA

pretazione di immagini satellitari. Al fine di individuare le immagini più idonee a tale scopo è stata fatta una selezione tra quelle disponibili delle costellazioni Landsat e Sentinel nel periodo compreso tra il 15 agosto 2020 e il 15 settembre 2020 selezionando ed utilizzando le due seguenti:

- Sentinel2 S2A_MSIL2A_20200826T101031_N0214_R022_T32TPS del 26 agosto 2020 -fonte Copernicus Sentinel data 2020 <https://scihub.copernicus.eu/>
- Sentinel2 S2A_MSIL1C_20200905T101031_N0209_R022_T32TPS del 5 settembre 2020 - fonte Copernicus Sentinel data 2020 <https://scihub.copernicus.eu/>

Su queste immagini è stata eseguita una classificazione per oggetti distinguendo le aree coperte da neve e da ghiaccio rispetto ad altri usi del suolo. Questa operazione, assieme ad un controllo visivo, ha permesso di definire ed aggiornare l'estensione dei ghiacciai coinvolti a fine stagione di ablazione 2020 (Fig.2). I dati calcolati dalle suddette geometrie per gli anni 2006 e 2007 si trovano in linea con quanto riportato nel Nuovo Catasto dei Ghiacciai (2015) [9] e in Carlo D'Agata Et Daniele Bocchiola et.al, 2014 [6] (tabella di Fig. 3).

Fig. 3 - Estensione dei ghiacciai calcolata in questo studio per il 2020 e variazione rispetto agli anni 2006 o 2007.

Ghiacciaio	Area 2006	Area 2007	Area 2020	Variazione dal 2006/2007 al 2020
Vedretta Piana	1,08 Km ²	-	0,88 Km ²	-18%
Madaccio	3,31 Km ²	-	2,68 Km ²	-19%
Vitelli		≈1,89 Km ²	1,54 Km ²	-18,7%

Fig. 4 - Antenna da 40 MHz agganciata alla parte posteriore della motoslitte.



I RILIEVI E GLI STUDI CONDOTTI NEL BIENNIO 2019-2020

Con lo scopo di arricchire i dati tutt'oggi disponibili ed iniziare un progetto di più approfondito monitoraggio del ghiacciaio, nel settembre 2019, il CNM di Bormio ha condotto in collaborazione con il Politecnico di Torino, indagini geofisiche sperimentali con tecnologia georadar volte alla determinazione della profondità del ghiacciaio e alla produzione del modello digitale (DEM) del substrato roccioso (*bedrock*).

Nel mese di settembre 2020, in collaborazione con l'SGL, al fine di studiare le variazioni degli spessori e quindi dei volumi dei ghiacciai coinvolti nell'area di studio sono invece stati effettuati:

- rilievi fotogrammetrici da drone con impiego di punti di controllo a terra (GCP);
- rilievo topografico GPS con correzione in Real Time Kinematics (RTK);
- produzione del modello digitale DSM 2020 e confronto con DSM 2011 dell'Alto Adige (bilancio di massa geodetico 2011-2020);
- aggiornamento dell'estensione dei ghiacciai tramite fotointerpretazione di immagini satellitari;

I presenti rilievi non sono stati effettuati

esclusivamente allo scopo di confrontare lo stato attuale con epoche precedenti ma con l'obiettivo di permettere anche nei prossimi anni di valutare la variazione dinamica dei ghiacciai ed i loro bilanci di massa attraverso diversi metodi. Sono state quindi installate con l'SGL a settembre 2020 delle paline ablatometriche per il calcolo del bilancio di massa puntuale netto.

INDAGINI GEORADAR PER LA STIMA DELLO SPESSORE DI GHIACCIO

Le misure georadar sono state effettuate i giorni 25 e 26 settembre 2019 dal personale del Laboratorio di Geofisica Applicata del DIATI (Politecnico di Torino) in collaborazione il CNM ed hanno interessato una lunghezza complessiva di circa 32 km.

Lo scopo delle indagini era quello di stimare lo spessore di ghiaccio dell'apparato glaciale; a tale scopo si è proceduto a realizzare 55 profili georadar, utilizzando antenne a diversa frequenza (40, 70 e 200 MHz). L'indagine è stata condotta con un sistema georadar IDS K2 equipaggiato con antenne *IDS* e *Subecho* con frequenza centrale 40, 70 e 200 MHz in modalità bistatica a *constant offset*.

L'acquisizione dei dati con le antenne da 40 MHz e 70 MHz è stata realizzata dopo aver posizionato l'antenna nella parte posteriore di una motoslitte (Fig. 4) mentre i profili con antenna da 200 MHz sono stati realizzati con trascinamento manuale dell'antenna.

Dai dati rilevati risulta che la zona antistante al rifugio Livrio, a ridosso della partenza della sciovia denominata *Geister*, gli spessori di ghiaccio sono attorno ai 20 m (Fig. 5). Nel rilievo GPR condotto nel 1999 [7][8], gli spessori di ghiaccio nella stessa zona erano di 30 m (Fig. 15). Più a monte, nella zona di sgancio dell'omonima sciovia (quota di 3300 m circa), gli spessori risultano intorno ai 40 m; in questa zona sommitale il ghiacciaio ha mantenuto gli stessi spessori misurati nel rilievo del 1999.

La zona con profondità maggiori è risultata essere quella sommitale del ghiacciaio dei Vitelli, al di sotto della parete nord del Monte Cristallo, con spessori variabili tra 80 e 100 m (Fig. 6).

RILIEVO GPS CON CORREZIONE RTK

Le misurazioni sono state effettuate

mediante l'impiego di 2 antenne GNSS multifrequenza e multi costellazione Trimble, una Base ed un Rover, comunicanti tra loro mediante ponte radio. Questa tecnologia ha consentito di rilevare le coordinate e la quota di punti sulla superficie dei ghiacciai con precisione verticale di $\pm 0,025$ metri ed orizzontale di $\pm 0,023$ metri. Il fine del rilievo è stato

ricostruire l'andamento altimetrico della superficie dei ghiacciai mediante la produzione di un modello digitale della superficie (DSM).

Le 2 antenne GNSS sono state utilizzate anche per marcare i Ground Control Point (GCP) necessari per la corretta georeferenziazione delle immagini scattate durante il rilievo fotogrammetrico da drone.

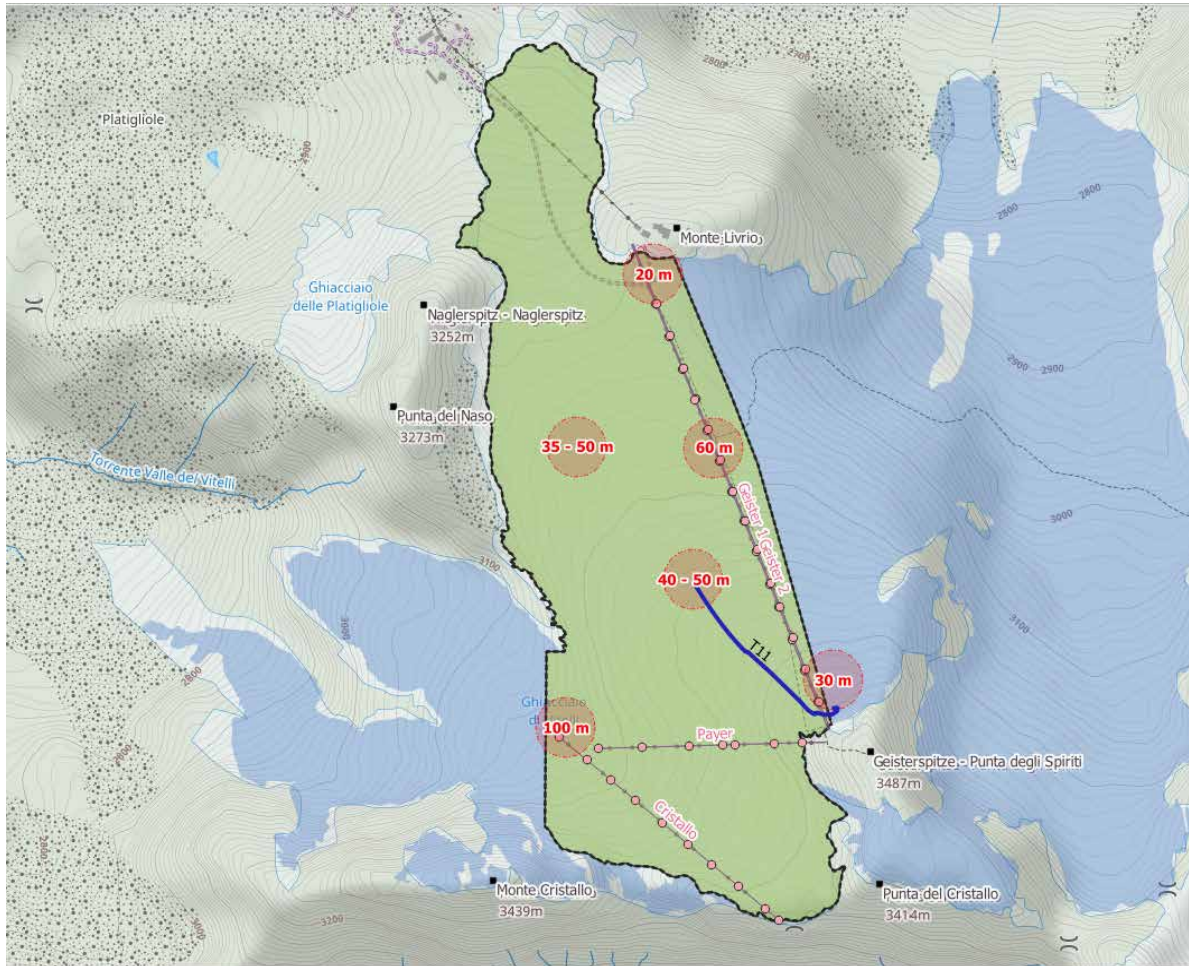


Fig. 5 - Indicazione qualitativa degli spessori di ghiaccio rilevati tramite indagini georadar eseguite a settembre 2019. Indicata come T11 una delle tracce effettuate. Scala 1:18000. Basemap: OCM Landscape. Geometrie ghiacciai relative all'anno 2020.

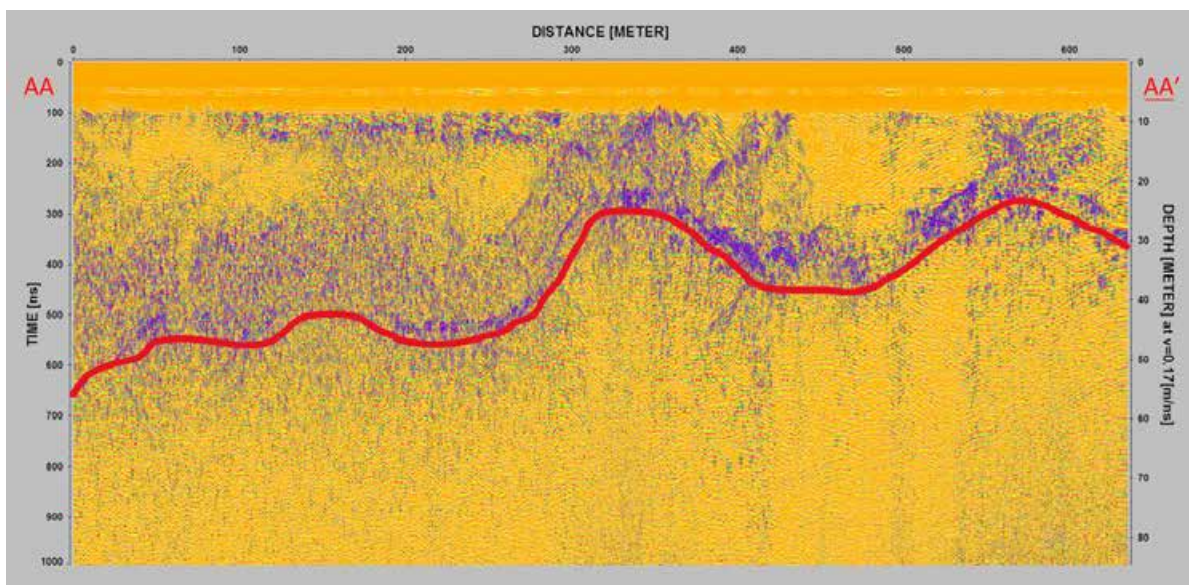


Fig. 6 - Diagramma della traccia georadar, riportata in Figura 5 come T11, acquisita con antenna 40MHz.

Fig. 7 - Posizione dell'antenna Base GPS. Sullo sfondo il ghiacciaio dei Vitelli. (a) Vista verso la parte sommitale (Pista Cristallo), (b) Vista verso la parte centrale (Pista Payer).



In data 17 settembre 2020 è stato materializzato, tramite rilievo GPS statico con correzione in Real Time Kinematics (RTK), il punto della base GPS. Il punto è ubicato sulla cresta rocciosa poco sopra l'arrivo della sciovvia Geister sotto Punta degli Spiriti, coordinate piane WGS 84/UTM 32 NORD 5150615,123 EST 612970,871 (Fig. 7).

Nelle due giornate di rilievi sono stati misurati 5.976 punti sparsi su un'area di 1.091.965 m² il 70% di tutta l'area oggetto di studio. I punti sono stati battuti utilizzando due metodologie: posizionamento cinematico RTK e posizionamento statico RTK. Il primo metodo è stato impiegato per compiere delle tracce lungo la superficie del ghiacciaio sfruttando una motoslitte, messa gentilmente a disposizione dalla direzione degli impianti e muovendosi con gli sci. I punti sono stati battuti in automatico ogni 4 secondi (Fig. 8).

Il posizionamento statico RTK con un periodo di 90 secondi è stato usato per battere 36 punti di controllo (GCP). Le coordinate di questi punti sono servite per correggere e quindi georeferenziare correttamente i modelli derivanti dal rilievo fotogrammetrico con drone (Fig. 9).

L'alta densità dei punti misurati, in particolare lungo le piste da sci e le sciovvie, ha permesso d'interpolare e generare un buon modello digitale della superficie (DSM) con una griglia di 1x1 metro.

RILIEVO FOTOGRAMMETRICO DA DRONE

Il rilievo fotogrammetrico è stato realizzato mediante l'impiego di un drone *DJI Phantom 4 Pro* e un drone *DJI Mavic Air2* interessando un'area complessiva pari a 668.354 m². Nello specifico il 17 settembre i voli hanno coperto 421.980 m² nella zona centrale del ghiacciaio di Vedretta Piana e una piccola area del Madaccio, mentre il 30 settembre i voli hanno rilevato 246.374 m², la quasi totalità dell'area sciistica del ghiaccio dei Vitelli (Fig. 10).

Fig. 8 - In giallo l'area di studio, in azzurro l'area coperta dal rilievo topografico GPS. I punti verdi rappresentano le misurazioni fatte il 30 settembre mentre quelli rossi il 17 settembre. Basemap Sentinel2 26/08/2020.

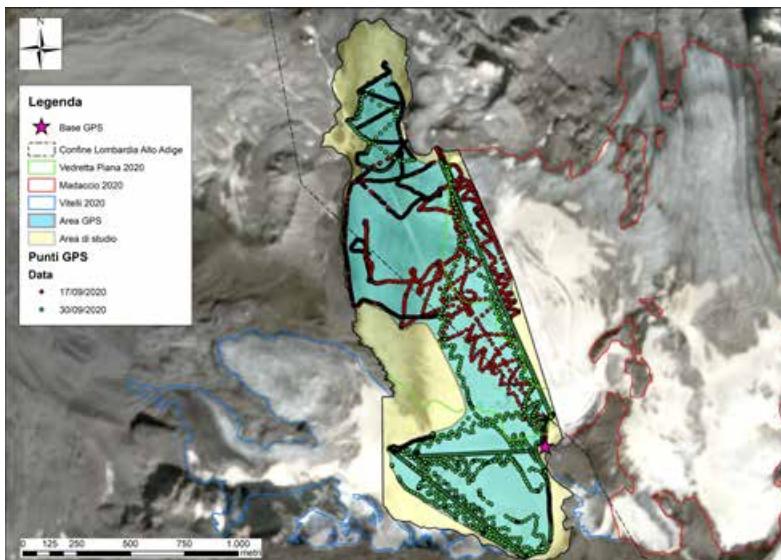
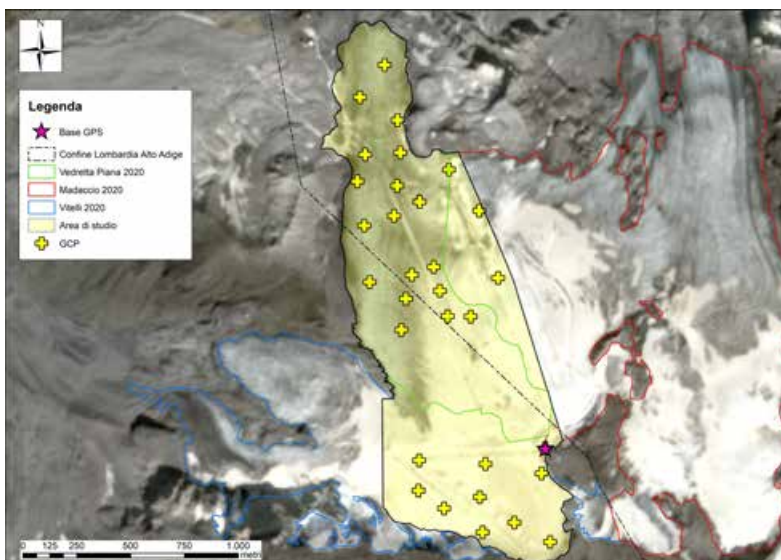


Fig. 9 - In giallo i marker che indicano l'ubicazione dei 36 GCP battuti durante il rilievo topografico GPS. Basemap Sentinel2 26/08/2020.



Le immagini raccolte sono state corrette nella loro georeferenziazione mediante i GCP battuti congiuntamente al rilievo topografico GPS. Al seguito dell'elaborazione delle immagini raccolte sono stati prodotti: il modello digitale della superficie DSM, la nuvola di punti e l'ortofoto (Fig. 11) con risoluzione 0,03 x 0,03 ed errore $\pm 0,04$ m.

PRODUZIONE DEL MODELLO DIGITALE DELLA SUPERFICIE (DSM 2020) E CONFRONTO CON DSM 2011 ALTO ADIGE

Al fine di costruire un modello digitale della superficie (DSM) che sia il più vicino possibile a quella che è la reale superficie dei ghiacciai ricadenti nell'intera area oggetto di studio, il DSM derivato dall'interpolazione dei dati topografici GPS è stato integrato, mediante tecniche GIS, con i 2 DSM prodotti dal rilievo fotogrammetrico.

La superficie prodotta, DSM 2020, è stata confrontata con il DSM dell'Alto Adige risoluzione 2,5x2,5 metri rilevato tra settembre e ottobre 2011 e disponibile sul Geoportale Altoatesino (<http://geokatalog.buergernetz.bz.it>).

Lo scopo è stato studiare e valutare le variazioni degli spessori e quindi dei volumi dei ghiacciai coinvolti all'interno dell'area di studio.

Poiché il DSM 2011 non copre l'intera area di studio (Fig. 12), i dati ottenuti dal confronto sono stati successivamente interpolati nell'area mancante tramite tecniche GIS assegnando il valore alle celle in funzione della loro distanza rispetto ai punti noti. L'area mancante è una piccola fascia di 102.706 m² (6,6% dell'area di studio) localizzata nella parte meridionale del ghiacciaio dei Vitelli sotto il Monte Cristallo.

La superficie di confronto ottenuta, riportata in Fig. 13, mostra sia l'entità e sia le zone nelle quali i ghiacciai hanno perso o guadagnato massa rispetto al 2011.

Complessivamente negli ultimi 9 anni

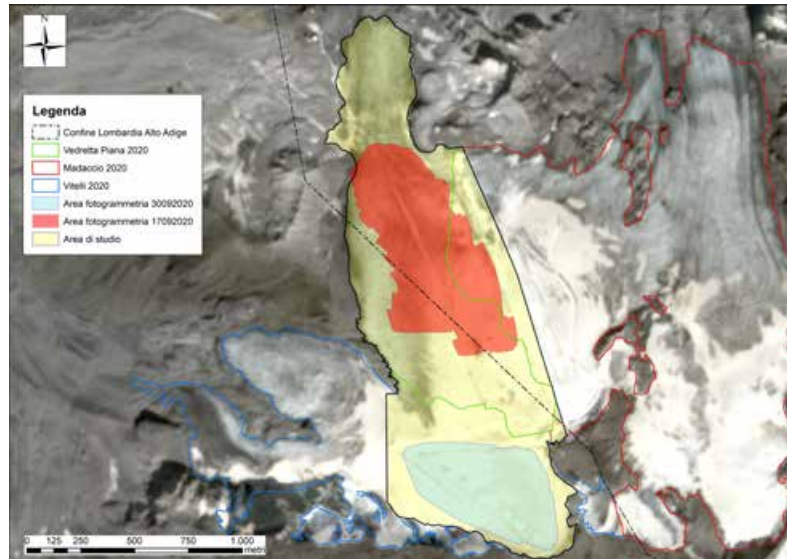


Fig. 10 - In evidenza le zone coperte da fotogrammetria da drone. In rosso l'area coperta sui ghiacciai di Vedretta Piana e Madaccio, in azzurro sul ghiacciaio dei Vitelli. Basemap Sentinel2 26/08/2020.

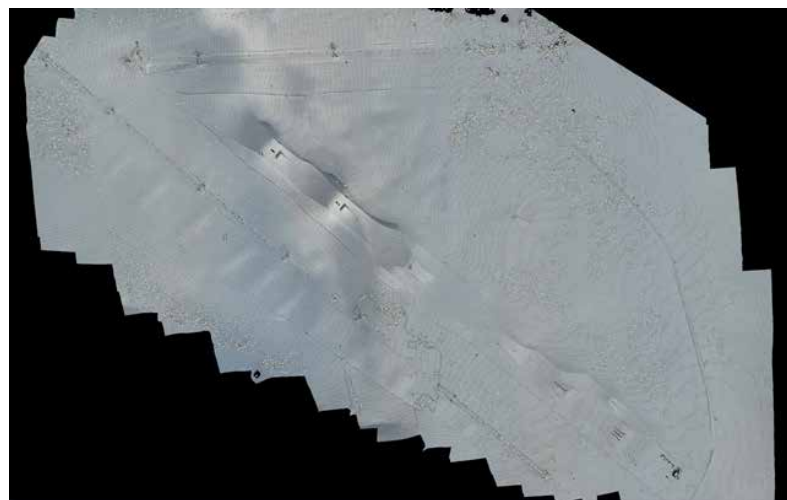


Fig. 11 - DMS prodotto sul ghiacciaio dei Vitelli nella zona scivola Cristallo.

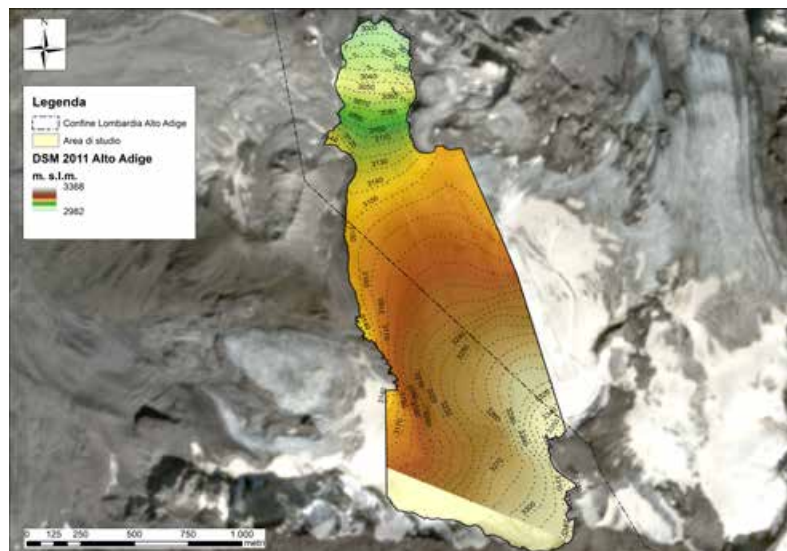


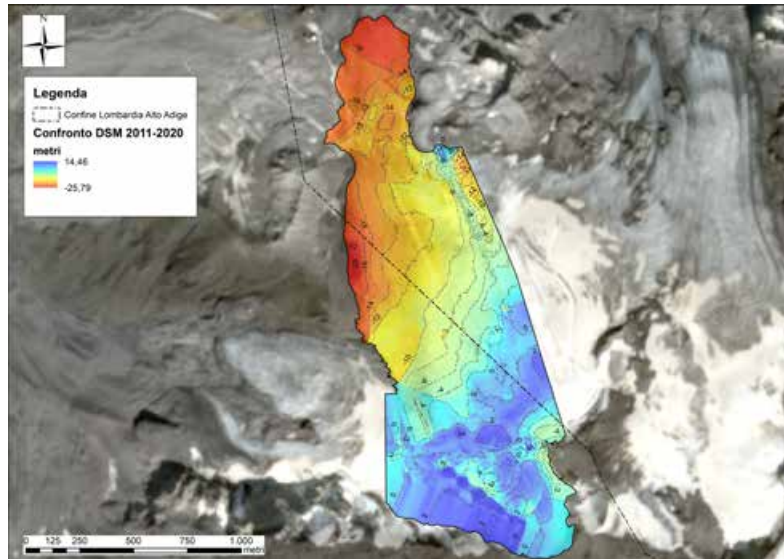
Fig. 12 - DSM 2011 scaricato dal Geoportale dell'Alto Adige, in giallo l'area oggetto di studio non coperta. Basemap Sentinel2 26/08/2020.

vi è stata una perdita media di 6,85 metri per un volume complessivo di -10.625.825 m³.

L'ablazione misurata ricalca bene l'andamento altimetrico aumentando al diminuire della quota. Si nota inoltre anche un gradiente positivo est-ovest.

Le perdite più marcate sono state rilevate sulla Vedretta Piana, che all'interno dell'area di studio occupa le fasce altimetriche più basse. Le aree più critiche sono la sua fronte, dove negli ultimi 9 anni si sono persi quasi 19,8 metri di spessore, e la zona occidentale dell'ap-

Fig. 13 - Confronto tra il DSM 2011 e il DSM 2020. Le aree colorate dal giallo al rosso indicano una perdita crescente degli spessori. Le aree in blu indicano al contrario dove vi è stato un incremento. Basemap Sentinel2 26/08/2020.



Queste ricadono lungo una piccola striscia a monte del ghiacciaio di Vedretta Piana e soprattutto all'interno del ghiacciaio dei Vitelli in particolare lungo le piste Payer e Cristallo. Qui se si escludono le strutture dello snowpark che risultano sopraelevate rispetto alla superficie del ghiacciaio di una decina di metri (massimo 14,5 metri), il confronto con il DSM 2011 mostra valori positivi che sfiorano i 3 metri (Fig. 14).

Il bilancio di massa geodetico 2011-2020 dell'area studiata del ghiacciaio dei Vitelli è pari a -32.194 m^3 con una media di $-0,06$ metri (Fig. 15). Per quest'area del ghiacciaio, che rappresenta la sua zona di accumulo, il bilancio è quindi sostanzialmente neutro.

INSTALLAZIONE PALINE ABLATOMETRICHE

Durante il rilievo del 30 settembre 2020 sono state infisse all'interno dell'area di studio 2 paline ablatometriche di 10 metri. La lettura annuale dell'emersione delle paline rispetto alla superficie del ghiacciaio fornirà un dato preciso riguardo l'ablazione superficiale e contestualmente consentirà una validazione di massima delle variazioni di spessore valutate con bilancio geodetico.

La prima palina è stata infissa sul ghiacciaio dei Vitelli a quota 3323 m. s.l.m. (Coordinate WGS84 LAT. 46,497254 LON. 10,473039), poco distante dal punto di rilievo denominato SASSO RONDONDO; la seconda palina è stata infissa sul ghiacciaio di Vedretta Piana a quota 3208 m. s.l.m. sulla sinistra orografica del casotto di manutenzione della pista Geister - Trincerone (Coordinate WGS84 LAT. 46,504219 LON. 10,464613) (Figg. 16 a,b).

ANALISI DELL'INNEVAMENTO

L'assenza, sino ad ora, di paline ablatometriche (installate i primi anni di rilevamento e in seguito rimosse perché di disturbo alle attività di battitura delle piste) non ha mai permesso un vero e

Fig. 14 - In evidenza in azzurro e blu le aree nelle quali rispetto al DSM 2011 si è registrato una variazione positiva della quota. Le piccole aree viola rappresentano le strutture dello snowpark.

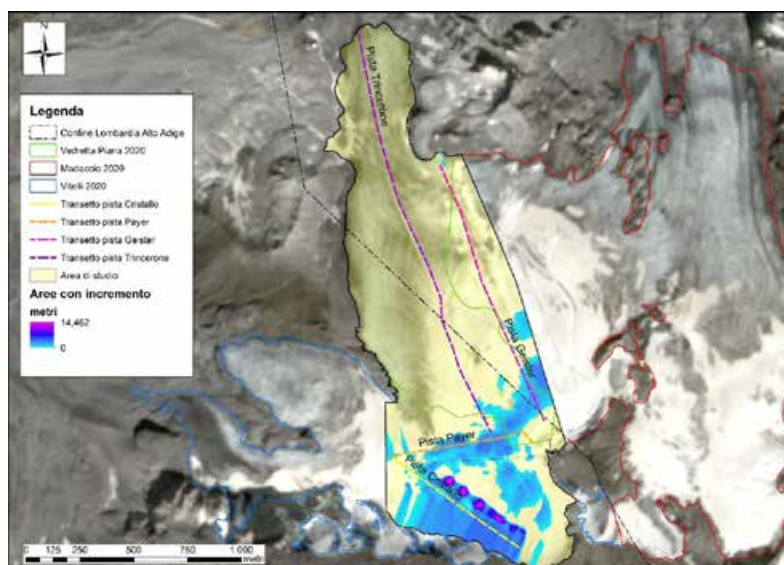
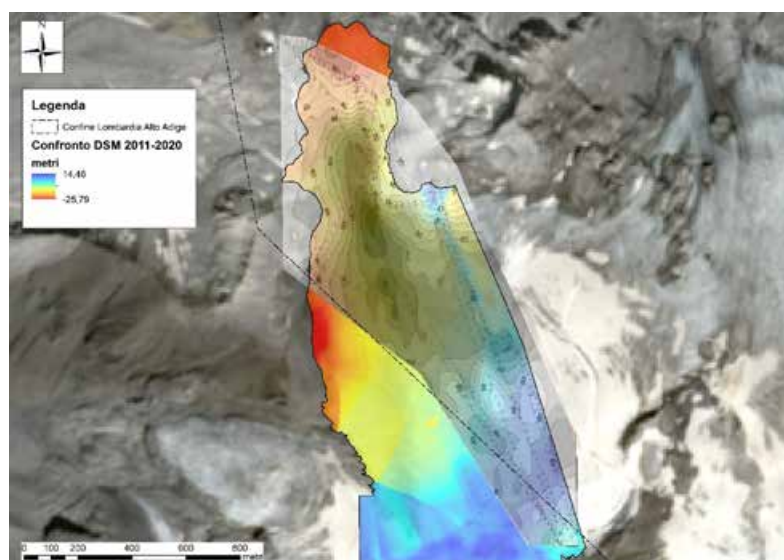


Fig. 15 - Indagine GPR (in grigio) del 1999 [7] dove le isolinee indicano gli spessori di ghiaccio misurati, sullo sfondo il confronto DSM 2011-2020.



parato a ridosso di Punta Nagler dove riscontriamo il valore più negativo $-25,7$ metri (Fig. 13). Nell'insieme il bilancio di massa geodetico 2011-2020 del ghiacciaio di Vedretta Piana è pari a $-9.473.981 \text{ m}^3$

con una media (bilancio geodetico specifico) di $-10,75$ metri di spessore. Lo studio ha evidenziato anche aree che negli ultimi 9 anni hanno avuto un incremento positivo della quota (313.336 m^2).

proprio monitoraggio circa la variazione dello spessore del ghiacciaio. Tuttavia, le puntuali registrazioni di altezza del manto nevoso, effettuate con sistematica periodicità estiva a partire dal 2005 dai tecnici e nivologi del CNM su 4 punti del Ghiacciaio dello Stelvio posti oltre i 3000 metri di quota (Fig. 17), ha potuto dare una indicazione riguardo il grado di salute in termini di copertura-scopertura nevosa del ghiacciaio e definire, con lo stato di innevamento residuo se il bilancio di massa annuale potesse essere positivo o meno.

Come viene in parte evidenziato nei grafici di Fig. 18, dai dati raccolti emergono alcune importanti considerazioni:

- mediamente all' inizio della stagione estiva l'accumulo sui 4 punti di rilievo si aggira intorno a 300 cm, ad esclusione del punto Livrio con poco più di 200 cm che trovandosi a quota leggermente inferiore è maggiormente esposto ad erosione eolica;
- solitamente, a fine ottobre, si denota una fase di nuovo accumulo autunnale compreso fra i 50 e i 100 cm per i punti più in quota, inferiore ai 50 cm per Livrio;

- durante l'estate 2012 si registra, per l'unica volta, la completa scomparsa del manto nevoso a tutte le quote interessate dai rilievi fin oltre i 3300 m di quota (SASSO ROTONDO);
- il decremento dello spessore del manto nevoso rilevato nell'estate 2020 risulta in linea con l'andamento della media quindicennale.

CONCLUSIONI

L'analisi della variazione degli spessori misurati lungo le piste da sci tra il 2011 e il 2020, grazie al confronto tra il modello digitale della superficie qui elabo-

rata (2020), ha evidenziato un bilancio di massa negativo lungo gran parte dei tracciati delle piste *Geister1* e *Geister2* e della pista di fondo Livrio.

La superficie di confronto ottenuta evidenzia le zone nelle quali i ghiacciai hanno perso sia quelle nelle quali risulta un incremento di massa rispetto al 2011. Per l'area oggetto di studio, complessivamente negli ultimi 9 anni vi è stata una perdita media di 6,85 metri per un volume complessivo di $-10.625.825 \text{ m}^3$. Va considerato che il bilancio di massa dell'intero complesso glaciale è sicuramente molto più negativo poiché l'area

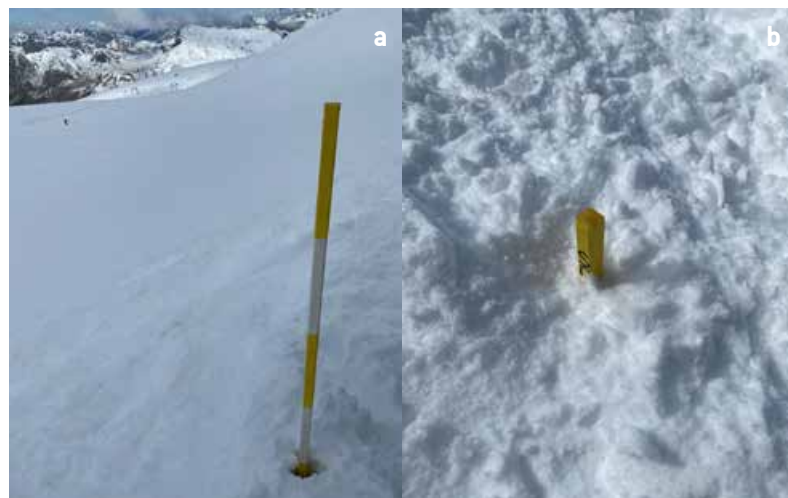


Fig. 16 - L'immagine di sinistra mostra la palina numero 1, come sfondo il ghiacciaio dei Vitelli. Nell'immagine di destra la palina numero 2 infissa sul ghiacciaio di Vedretta Piana.

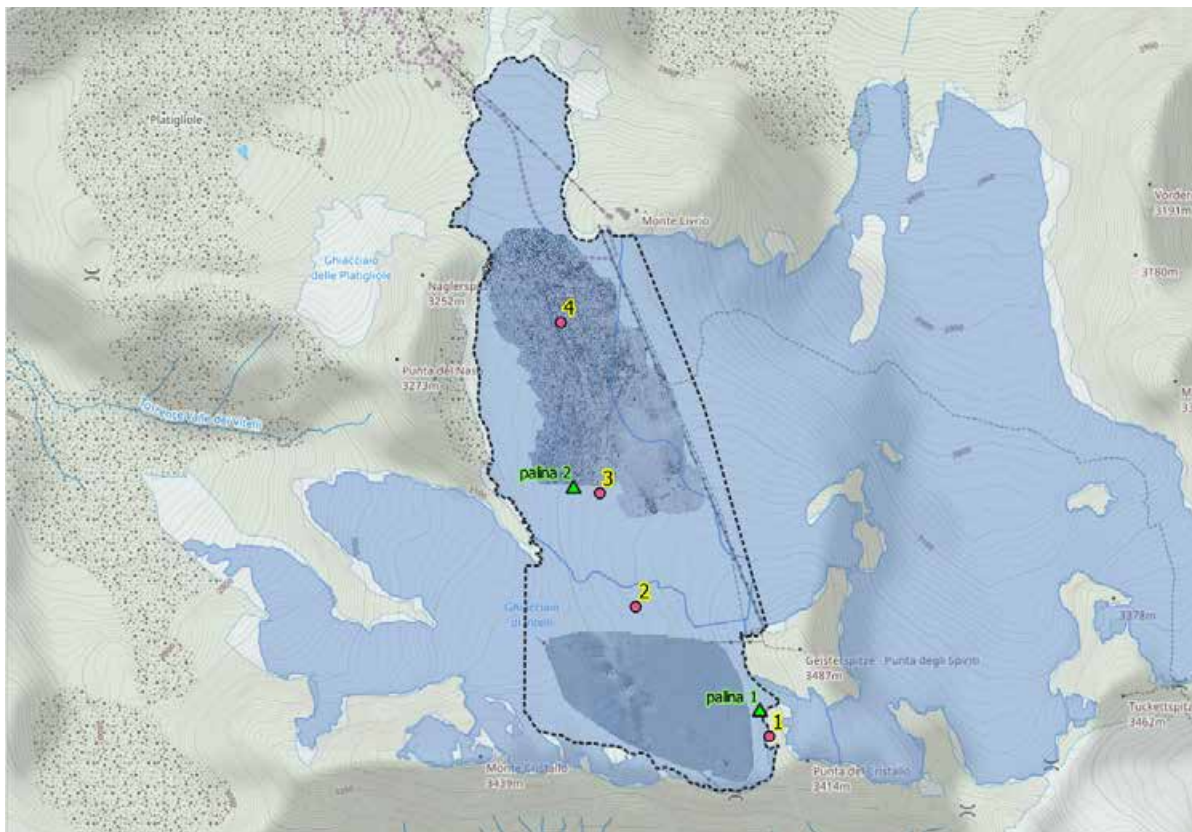
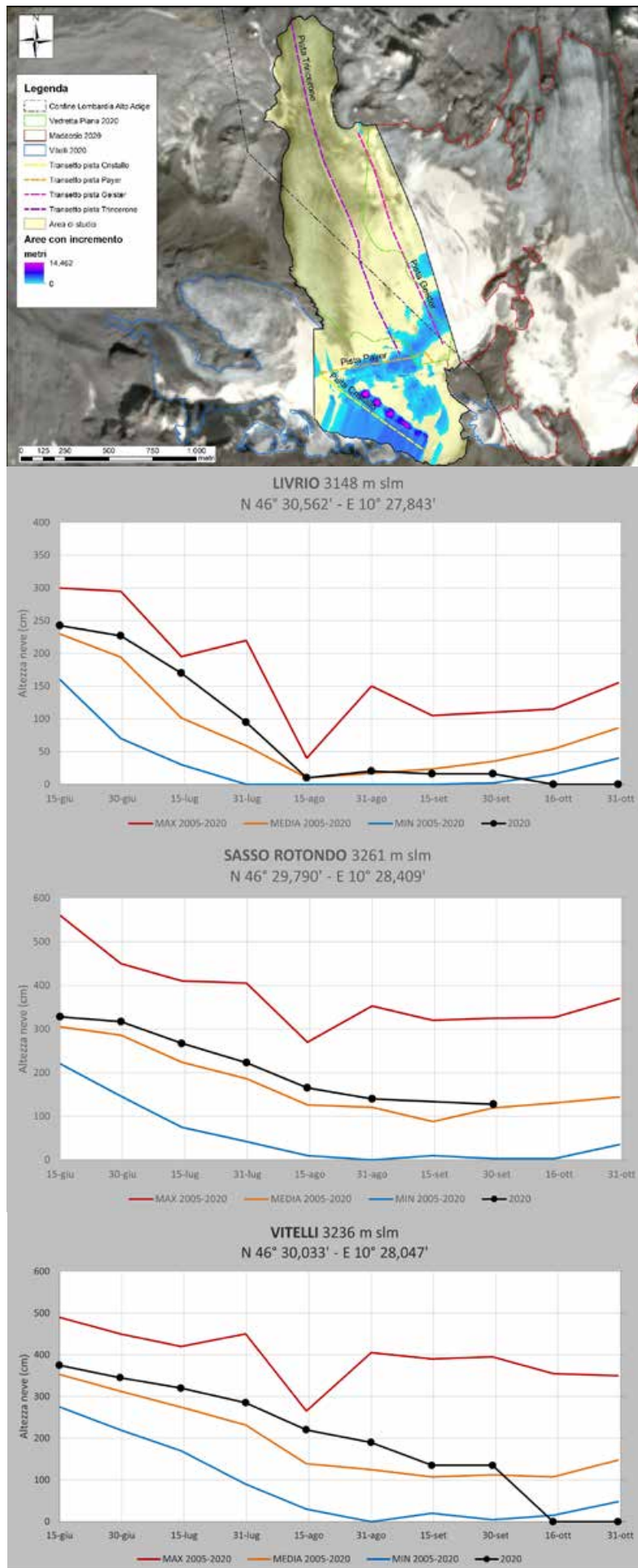


Fig. 17 - Indicati in fucsia e giallo i punti di rilevamento degli spessori di manto nevoso effettuati periodicamente da ARPA Lombardia a partire dal 2005/2008: 1: SASSO ROTONDO, 2: VITELLI, 3: BARACCA, 4: LIVRIO. In verde le nuove paline ablatometriche installate a settembre 2020. Riportati anche i due rilievi fotogrammetrici realizzati. Tratteggiata in nero l'area di studio. Basemap: OCM Landscape. Scala 1:20000.

Fig. 18 - Interpolazione lineare dei valori medi (calcolati per il periodo 2005-2020) e di quelli misurati nel corso dell'estate 2020 degli spessori del manto nevoso misurati in campo assumendo come periodo di riferimento una cadenza quindicinale.



studio non comprende un'ampia porzione di zona di ablazione sia del ghiacciaio dei Vitelli che del Madaccio.

I dati derivati dal confronto tra il DSM 2020 e il DSM 2011 devono essere valutati sia in funzione della bontà del dato della Provincia di Bolzano sia in funzione della significativa redistribuzione della neve e del firn, in particolare il loro spostamento dalle aree del bacino di accumulo verso le aree di ablazione. Attività che risulta necessaria al mantenimento della pendenza e alla gestione delle piste da sci e delle sciovie.

Questi processi da un lato modificano continuamente l'altimetria, e ciò si riflette sui confronti fatti in tempi diversi, dall'altro riducono lo spessore del manto



nevoso annuale nel bacino d'accumulo e rallentano la fusione nelle aree a valle di esso dove viene portata la neve.

Cercando di individuare le variazioni di estensione e di volume dei singoli apparati glaciali, potremmo trarre le seguenti osservazioni:

- Per quanto riguarda il Ghiacciaio Vitelli (così come catalogato nel Catasto Dei Ghiacciai[9]) l'estensione è passata dai 1.894 Km² del 2007 ai 1.536 Km² del 2020 per una perdita percentuale totale del 18,9%. Sempre in termini percentuale totale negli ultimi 8 anni, ovvero dal 2012 (1.703 Km²) al 2020, si parla di una perdita areale del -9,77%. La riduzione dell'estensione del ghiacciaio è sintetizzata in Fig 2.



- Per quanto riguarda il Ghiacciaio di Vedretta Piana, confrontando l'estensione riportata per l'anno 2006 dal Geoportale dell'Alto Adige, si può stimare una perdita percentuale totale del 18% dal 2006 al 2020. Sarà tra gli obiettivi futuri ricostruire a partire da ortofoto, come già effettuato per il Ghiaccio

Vitelli, l'evoluzione dell'estensione del Ghiacciaio Vedretta Piana anche per altri anni.

Parlando di riduzione volumetrica, il bilancio di massa geodetico 2011-2020 è risultato pari a -9.473.981 m³ con una media (bilancio geodetico specifico) di -10,75 metri.

Bibliografia

Riferimenti citati

- [1] PRAOLINI A., MERALDI E., BERBENNI F., Cumulo nevoso stagionale sul Ghiacciaio dello Stelvio - 10 anni di rilevamento, AINEVA - Neve e Valanghe n°84, pp. 42-49, 2015.
 - [2] BONARDI L., ROVELLI E., SCOTTI R., TOFFALETTI A., URSO M. & VILLA F. - SERVIZIO GLACIOLOGICO LOMBARDO, I ghiacciai della Lombardia. Evoluzione ed attualità, Hoepli, Milano, 2012.
 - [3] ISPRA - Rapporto: Gli indicatori del clima in Italia - Anno XVI, 2021, ISBN: 978-88-448-1062-7
 - [4] TORETI A., DESIATO F., Temperature trend over Italy from 1961 to 2004, Theor. Appl. Climatol., pp.91 e pp. 51-58, 2007, DOI: 10.1007/s00704-006-0289-6.
 - [5] L. DEI CAS, Analisi dei dati meteorologici del periodo 1987-2007 rilevati in territori di alta montagna della provincia di Sondrio, Terra glacialis n°11, pp. 53-70, 2008.
 - [6] D'AGATA, C., BOCCHIOLA, D., MARAGNO, D. et al., Glacier shrinkage driven by climate change during half a century (1954-2007) in the Ortles-Cevedale group (Stelvio National Park, Lombardy, Italian Alps), Theor Appl Climatol 116, pp. 169-190, 2014, DOI: 10.1007/s00704-013-0938-5.
 - [7] DIOLAIUTI G., D'AGATA C., PAVAN M., et al., The physical evolution of and the anthropic impact on a glacier subjected to a high influx of tourists: Vedretta Piana Glacier (Italian Alps), Geografia Fisica e Dinamica Quaternaria 24, pp. 199-201, 2001
 - [8] DIOLAIUTI G., SMIRAGLIA C., PELFINI M., BELÒ M., PAVAN M., VASSENA G., The recent evolution of an Alpine glacier used for summer skiing (Vedretta Piana, Stelvio Pass, Italy, Cold Regions Science and Technology, 44, 206-216, 2006
 - [9] Smiraglia C. & Diolaiuti G. (a cura di). Il Nuovo Catasto dei Ghiacciai Italiani. Bergamo, Ev-K2-CNR Ed., 2015. ISBN: 9788894090802
- Riferimenti bibliografici
- [10] Risorsa online: "Eniscuola - Ghiacciai delle Alpi". <http://www.eniscuola.net>
 - [11] LEGAMBIENTE, Rapporto: La carovana dei ghiacciai, 2020. Risorsa online: <https://www.legambiente.it/wp-content/uploads/2020/12/caronava-dei-ghiacciai-report-2020.pdf>

Banche dati utilizzate

- DSM 2011 Alto Adige - fonte <http://geokatalog.buergernetz.bz.it>
- Ortofoto 2017 Alto Adige - fonte <http://geokatalog.buergernetz.bz.it>
- Ghiacciai 2006 Alto Adige - fonte <http://geokatalog.buergernetz.bz.it>
- Ghiacciai 2018 Regione Lombardia - fonte Servizio Glaciologico Lombardo
- Ghiacciai 2007 Regione Lombardia - fonte Servizio Glaciologico Lombardo
- Ortofoto AGEA 2018 Regione Lombardia - fonte <http://www.geoportale.regione.lombardia.it>
- DTM 5x5 ed.2015 Regione Lombardia - fonte <http://www.geoportale.regione.lombardia.it>
- Limiti Amministrativi 2020 Regione Lombardia - fonte <http://www.geoportale.regione.lombardia.it>
- Immagine satellitare Sentinel2 S2A_MSIL2A_20200826T101031_N0214_R022_T32TPS del 26 agosto 2020 - fonte Copernicus Sentinel data 2020 <http://land.copernicus.eu>
- Immagine satellitare Sentinel2 S2A_MSIL1C_20200905T101031_N0209_R022_T32TPS del 5 settembre 2020 - fonte Copernicus Sentinel data 2020 <http://land.copernicus.eu>
- Rilievo GPR 2019 Politecnico di Torino
- Rilievo GPR 1999 (Guglielmina et al. 2005)

Note

¹ La maggior parte dell'ablazione, almeno nei ghiacciai alpini, è dovuta alla fusione del ghiaccio. Per la misura di questo parametro, si dispongono sulla superficie del ghiacciaio delle serie di paline ablatometriche che, numerate e contrassegnate, vengono infisse con un'apposita trivella per una profondità nota. Periodicamente, nel periodo estivo anche giornalmente, si misura l'altezza della palina che rimane scoperta via via che il ghiaccio si fonde. [10]