

Il permafrost nelle Alpi Ticinesi (2015/2016 e 2016/2017)

Rapporto No. 4 del Gruppo Permafrost Ticino

Cristian Scapozza¹, Marco Antognini² e Christian Ambrosi¹

¹ Istituto scienze della Terra (IST), Scuola universitaria professionale della Svizzera italiana (SUPSI), Campus Trevano, CH-6952 Canobbio

² Museo cantonale di storia naturale, Viale Carlo Cattaneo 4, CP 5487, CH-6901 Lugano

cristian.scapozza@supsi.ch

Riassunto: È discussa l'evoluzione del permafrost nei due anni idrologici 2015/2016 e 2016/2017, biennio seguente l'anno idrologico 2014/2015 che ha presentato le temperature e le velocità di spostamento dei ghiacciai rocciosi più alte di tutto il periodo di misura. L'inverno 2015/2016 senza precipitazioni nevose di rilievo ha permesso un raffreddamento significativo della temperatura della superficie del suolo (compreso fra 1.6-2.5 °C) tra il 5 settembre 2015 e metà agosto/fine settembre 2016. L'inverno 2016/2017 di nuovo asciutto ha permesso alla temperatura della superficie del suolo di rimanere stabile senza riscaldamenti significativi fino a maggio-giugno 2017. Ne consegue una diminuzione compresa tra il 39% e il 64% della velocità orizzontale della superficie dei ghiacciai rocciosi dal 2015 al 2017. Per Stabbio di Largario (lobo E), Piancabella e Ganoni di Schenadüi, le velocità medie misurate nel 2017 sono le più basse dal 2009. Si è quindi stabilita una relazione matematica di tipo esponenziale tra le temperature della superficie del suolo e le velocità medie dei ghiacciai rocciosi. Le velocità dei ghiacciai rocciosi calcolate sulla base di immagini aeree riprese con il drone nel 2014 e 2016 si sono rivelate coerenti con quanto misurato a terra con il GPS differenziale. La radice dell'errore quadratico medio (RMSE) delle misure acquisite con i due metodi è di soli 6 cm, mentre la correlazione è di 0.99, indicando che i due approcci possono essere considerati complementari o alternativi.

Parole chiave: ghiacciaio roccioso, cinematica, temperatura della superficie del suolo, dGPS, drone, Alpi svizzere.

Permafrost in the Ticino Alps (2015/2016 and 2016/2017). Report No. 4 of the Gruppo Permafrost Ticino

Abstract: The permafrost evolution occurring during the two hydrological years 2015/2016 and 2016/2017 is discussed. This biennium follows the hydrological year 2014/2015, which presented the highest rock glacier temperatures and creeping velocities of the entire measurement period. The winter 2015/2016 lacked of snow precipitations, that allowed a significant cooling of the ground surface temperatures (ranging between 1.6 and 2.5 °C) between the 5th September 2015 and mid-August/end of September 2016. The dry 2016/2017 winter conditions also kept the ground surface temperature stable, without a significant warming until May-June 2017. As a result, from 2015 to 2017, a decrease ranging between 39% and 64% of the rock glacier horizontal surface velocity was observed. For Stabbio di Largario (lobe E), Piancabella and Ganoni di Schenadüi, the mean velocities measured in 2017 are the lowest since 2009. It was possible to establish an exponential mathematical relationship between ground surface temperatures and mean rock glacier velocities. Rock glacier velocities derived from aerial images collected with an Unmanned Aerial Vehicle (UAV) in 2014 and 2016 were in accordance with terrestrial values measured using a differential GPS. A root mean square error (RMSE) between measurements acquired with the two mentioned methods of only 6 cm and a correlation of 0.99 indicate that both approaches can be considered complementary or alternative.

Key words: rock glacier, kinematics, ground surface temperature, dGPS, Unmanned Aerial Vehicle, Swiss Alps.

INTRODUZIONE

Dieci anni di monitoraggio del permafrost in Ticino

Il monitoraggio dello stato e dell'evoluzione del permafrost nelle Alpi Ticinesi ha raggiunto nel 2016 il decennio di attività, con le prime misurazioni sistematiche della temperatura della superficie del suolo (GST) iniziate durante l'estate del 2006. Dall'estate del 2009, è inoltre misurata la cinematica di sei degli otto ghiacciai rocciosi monitorati nelle Alpi Ticinesi (Fig. 1 e Tab. 1). Lo sviluppo e l'evoluzione della rete di monitoraggio

del permafrost sono ben documentati nei tre rapporti biennali precedenti (Mari *et al.*, 2012; Scapozza *et al.*, 2014a; Scapozza *et al.*, 2016), mentre i lavori di ricerca svolti sui siti studiati sono elencati nella bibliografia di questi rapporti. Per i siti di Piancabella e Stabbio di Largario, i dati sono presentati e discussi nei rapporti della rete svizzera di monitoraggio del permafrost PERMOS (PERMOS, 2013, 2016, 2018). Questi due siti, unitamente a quello dei Ganoni di Schenadüi, sono stati integrati in uno studio di sintesi svolto sull'intero arco alpino (Kellerer-Pirklbauer *et al.*, 2017, 2018). L'obiettivo di questo contributo è di fare il punto sul-

Tabella 1: Caratteristiche e tipo di misure svolte nei nove siti di monitoraggio del permafrost gestiti dalla SUPSI. Per la localizzazione e le principali caratteristiche dei siti, vedi Fig. 1.

No.	Sito	Regione	Altitudine [m slm]	No. sensori MAGST	No. punti GPS	No. punti per valori di riferimento
29	Pizzo Nero	Val Bedretto	2600-2700	0	36	25
29b	Pizzo Gallina	Val Bedretto	2660-2760	4	26	20
30	Passo di Grandinagia	Val Bavona	2560-2800	4	32	16
30b	Lago Nero	Val Bavona	2570-2600	10	–	–
31	Ganoni di Schenadüi	Val Cadlimo	2480-2640	4	36	18
32	Piancabella ⁽¹⁾	Val Malvaglia	2440-2550	10	22	20
33	Stabbio di Largario ⁽¹⁾	Val Soi	2240-2550	4 + 2 ⁽²⁾	33 (2) ⁽³⁾	21 + 4 ⁽²⁾
33b	Alpe Pièi	Valle di Blenio	2340-2500	0	35	6 + 12 ⁽⁴⁾
–	Ghiacciaia di Rambött	Valle di Blenio	1350	2	–	–

⁽¹⁾ Sito PERMOS. ⁽²⁾ Lobo E + lobo W. ⁽³⁾ Antenne GPS mono-frequenza fisse. ⁽⁴⁾ Lobo inferiore + lobo superiore.

la condizione del permafrost nei due anni idrologici 2015/2016 e 2016/2017, biennio seguente l'anno idrologico 2014/2015 eccezionalmente caldo, che ha presentato le temperature e le velocità di spostamento dei ghiacciai rocciosi più alte di tutto il periodo di misura (Scapozza *et al.*, 2016). Oltre ai classici dati di temperatura e velocità dei ghiacciai rocciosi misurati con il GPS differenziale (dGPS), saranno presentati anche i primi dati desunti dall'analisi di riprese aeree effettuate con droni nel 2014 e 2016 sui ghiacciai rocciosi di Piancabella e Stabbio di Largario.

Siti di studio

Ai sette ghiacciai rocciosi monitorati dall'Istituto scienze della Terra SUPSI dal 2012, si è aggiunto nel 2016 il nuovo sito del Lago Nero, in alta Val Bavona, oggetto di un monitoraggio pluridisciplinare di tutte le componenti del ciclo dell'acqua, inclusa quindi la criosfera (Bruder *et al.*, 2016; Scapozza *et al.*, 2017; Pozzoni *et al.*, 2018; Scapozza *et al.*, 2018). Oltre ai ghiacciai rocciosi, è oggetto di monitoraggio dal 2011 (con un lungo periodo senza dati tra il 2012 e il 2016 per ragioni tecniche), una ghiacciaia naturale situata a Rambött, a monte di Olivone (Valle di Blenio). Si tratta di una fessura situata nella parte inferiore di un deposito di versante a grossi blocchi plurimetrici, dove si è formata una cavità con l'apertura orientata a nord-est e con una profondità di circa 20 metri. Questi elementi, unitamente al fatto che l'entrata della ghiacciaia sia protetta dall'irradiazione solare diretto grazie alla presenza di conifere, permettono alla neve di accumularsi nella cavità e di preservarsi fino a estate inoltrata. Questa ghiacciaia era sfruttata fino ai primi decenni del Novecento, quando la neve riusciva a riempirla ogni anno, per approvvigionare in ghiaccio i ristoranti di Olivone (Scapozza *et al.*, 2008).

Le osservazioni svolte sulla maggior parte dei siti includono il monitoraggio in continuo della temperatura della superficie del suolo (GSTM) e la misura della velocità media annua della superficie dei ghiacciai rocciosi (a eccezione del sito del Lago Nero). A queste misure, si aggiungono, da settembre 2014: (a) il monitoraggio in continuo dei movimenti grazie a due GPS fissi mono-frequenza installati sul ghiacciaio roccioso

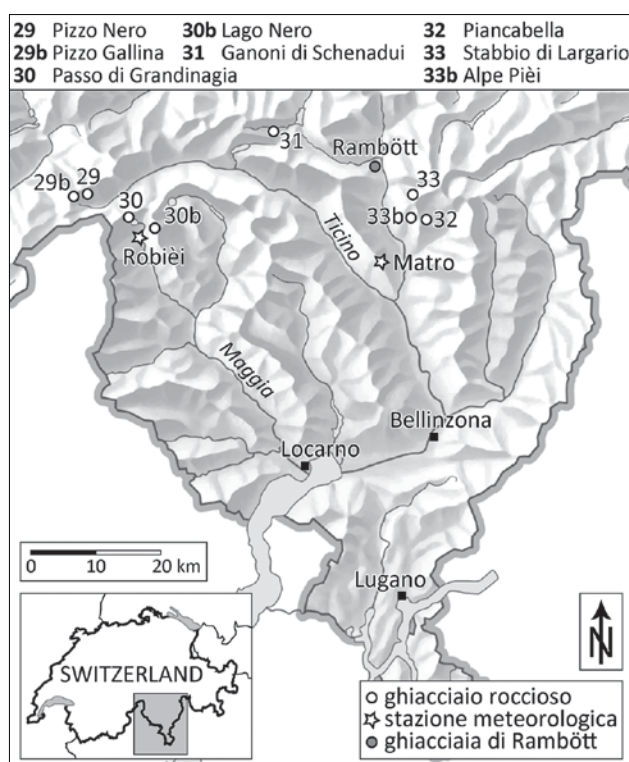


Figura 1: Localizzazione degli otto ghiacciai rocciosi monitorati dalla SUPSI nelle Alpi Ticinesi e delle stazioni climatiche di riferimento. Base cartografica: © swisstopo.

di Stabbio di Largario in collaborazione con la Scuola Politecnica Federale di Zurigo e l'Ufficio federale dell'ambiente (Wirz *et al.*, 2016); (b) la misura degli spostamenti superficiali tramite analisi multi-temporale di ortofoto ottenute da riprese aeree da drone, svolte a cadenza biennale sui ghiacciai rocciosi di Piancabella e Stabbio di Largario.

MATERIALI E METODI

Indicatori utilizzati

I due indicatori principali utilizzati per valutare lo stato e l'evoluzione del permafrost nei ghiacciai rocciosi delle Alpi ticinesi sono la temperatura media annua della superficie del suolo (MAGST – *Mean Annual Ground*

Surface Temperature) (Fig. 2A) e la velocità media annua di riferimento della superficie dei ghiacciai rocciosi (*reference value*) (Fig. 2B) (Scapoza et al., 2014a, 2016). MAGST è calcolata mediante una media mobile su 365 giorni delle temperature medie giornaliere, a loro volta computate sulla base di misure biorarie (12 misure giornaliere tra la 1.00 e le 23.00). I dati di temperatura sono misurati con mini-logger UTL-3 (Geotest AG), con un'accuratezza di ± 0.1 °C. Il valore di riferimento della velocità media annua è calcolato sulla base della media degli spostamenti, trasposta su un periodo di 365 giorni, di una serie di punti di misura che sono rappresentativi del movimento di insieme di un ghiacciaio roccioso (Tab. 1). La misura a terra è stata esegui-

ta con un sistema dGPS SR530 (Leica Geosystems). Le riprese aeree sono state realizzate con un drone ad ala fissa eBee (senseFly SA).

Nel caso di ghiacciai rocciosi composti da più lobi, che possono essere giustapposti (per es. Stabbio di Largario e Ganoni di Schenadüi) o addirittura sovrapposti (per es. Alpe Pièi), i punti di misura utilizzati per calcolare MAGST media e il valore di riferimento della velocità di spostamento sono attinenti al lobo principale, sia dal punto di vista morfologico, sia delle velocità. Per Stabbio di Largario e Alpe Pièi, da questo rapporto, i dati inerenti entrambi i lobi saranno presentati separatamente (non era il caso, soprattutto per il sito di Stabbio di Largario, per i rapporti precedenti).

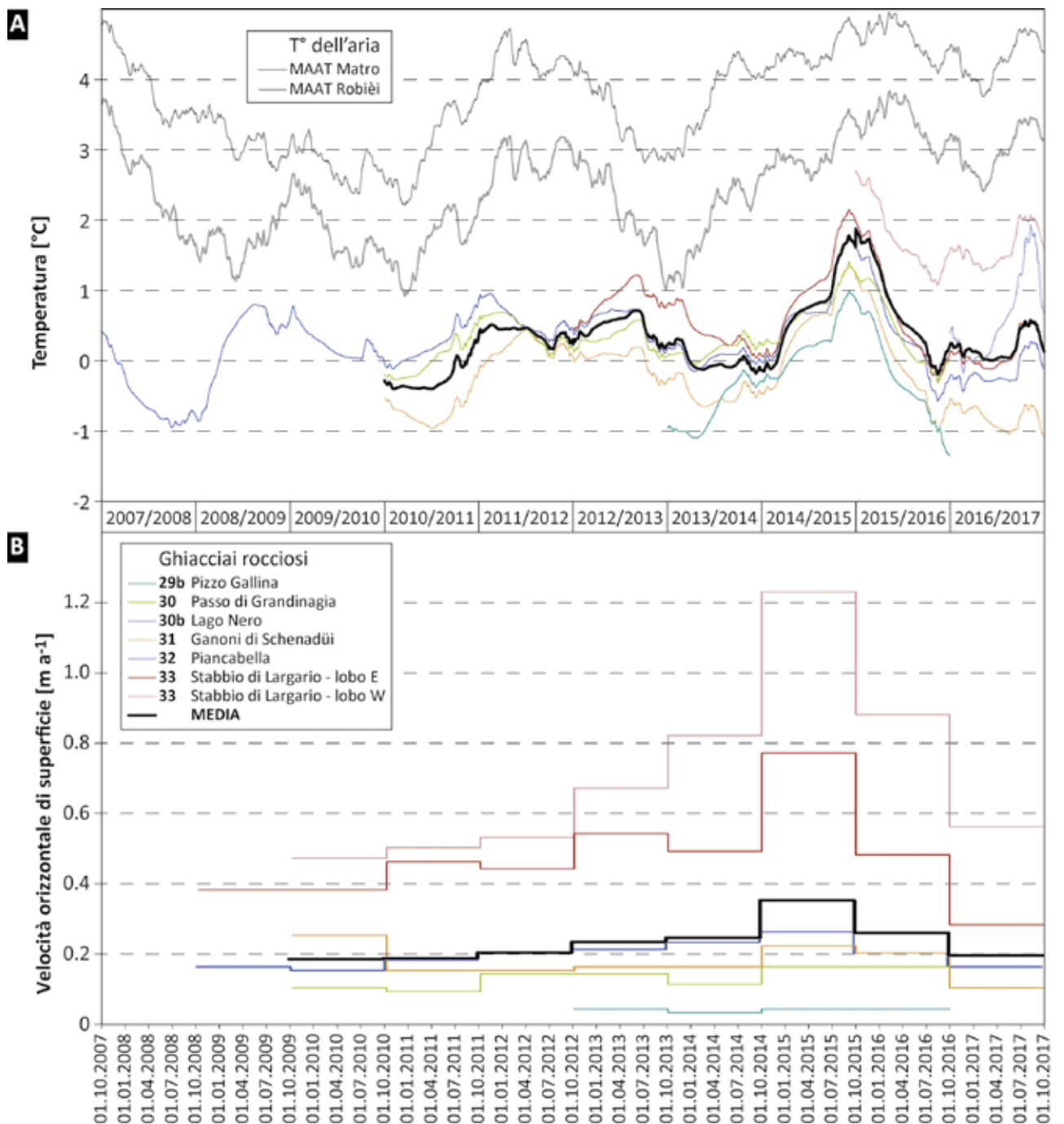


Figura 2: Evoluzione dei parametri monitorati dal 2007 al 2017. A) Temperatura media annua della superficie del suolo (MAGST – Mean Annual Ground Surface Temperature) dei ghiacciai rocciosi (dati: IST-SUPSI e PERMOS) e temperatura media annua dell'aria (MAAT – Mean Annual Air Temperature) per le stazioni del Matro (2'171 m slm) e di Robièi (1'896 m slm) (dati: MeteoSvizzera). B) Velocità orizzontale media di superficie dei ghiacciai rocciosi monitorati nelle Alpi Ticinesi (dati: IST-SUPSI e PERMOS).

Tabella 2: Evoluzione della temperatura media annua del suolo (MAGST) e della velocità media annua di riferimento della superficie dei ghiacciai rocciosi tra il 2015 e il 2017.

No.	Sito	MAGST [°C]					Velocità di riferimento [m·a ⁻¹]			
		MAX	Data	MIN	Data	Diff.	2015	2016	2017	Δ 2015-2017
29	Pizzo Nero	No misure GSTM					0.07	0.07		(1)
29b	Pizzo Gallina	1.01	5.9.2015	-1.35	28.9.2016 ⁽²⁾	-2.36	0.04	0.04	(3)	
30	Passo di Grandinaglia	1.39	5.9.2015	-0.31	14.8.2016	-1.70	0.16	0.16	(3)	
30b	Lago Nero ⁽⁴⁾	1.94	8.8.2017	-0.18	21.11.2016	+2.12	No misure dGPS			–
31	Ganoni di Schenadüi	1.42	5.9.2015	-1.10	30.9.2017	-2.52	0.22	0.20	0.10	-54.5%
32	Piancabella	1.77	5.9.2015	-0.57	14.8.2016	-2.34	0.26	0.20	0.16	-38.5%
33	Stabbio di Largario, lobo E	2.15	5.9.2015	-0.28	14.8.2016	-2.43	0.77	0.48	0.28	-63.6%
	Stabbio di Largario, lobo W	2.71	1.10.2015 ⁽⁵⁾	1.07	13.8.2016	-1.64	1.23	0.88	0.56	-54.5%
33b	Alpe Pièi, lobo inferiore	No misure GSTM					0.04	0.04	0.04	(6)
	Alpe Pièi, lobo superiore	No misure GSTM					0.03	0.03	0.03	(6)

(1) Velocità media calcolata su spostamenti quadriennali tra il 2015 e il 2016.

(2) Ultimo valore di MAGST disponibile.

(3) Velocità media calcolata su spostamenti biennali tra il 2015 e il 2016.

(4) MAGST disponibile solo da 1.10.2016.

(5) MAGST disponibile solo da 1.10.2015.

(6) Velocità media calcolata su spostamenti quinquennali tra il 2012 e il 2017.

Acquisizione di fotografie aeree con drone

L'acquisizione di fotografie aeree con drone sui ghiacciai rocciosi di Stabbio di Largario e di Piancabella nel 2014 e nel 2016 ha permesso di ottenere, sia fotografie aeree verticali che consentono di produrre fotografie ortorettificate (ortofoto o ortomosaici), sia modelli numerici di terreno (MNT). Entrambi i modelli fotogrammetrici sono stati correttamente georeferenziati impiegando punti di controllo materializzati artificialmente alla superficie del suolo (GCP – *Ground Control Points*; 13 per Stabbio di Largario, 11 per Piancabella), rilevati sul e attorno al ghiacciaio roccioso in occasione delle misure dGPS annuali. L'acquisizione di GCP misurati a terra è particolarmente importante poiché l'immagine aerea fa riferimento a un oggetto in movimento (Dall'Asta *et al.*, 2017). Per questa ragione, i voli con il drone sono stati eseguiti a un intervallo massimo di sette giorni rispetto alle misure dGPS al suolo (Tab. 3). Le ortofoto consentono di calcolare i valori di spostamento di un certo numero di blocchi per confronto multi-temporale, mentre i MNT permettono di calcolare gli spostamenti verticali (dovuti alla componente verticale del movimento orizzontale lungo un pendio e all'eventuale perdita di volume per fusione del ghiaccio) e rappresentare la morfologia come rilievo ombreggiato, particolarmente efficace per il confronto diretto delle variazioni avvenute alla superficie dei ghiacciai rocciosi (Fig. 3; vedi dettaglio delle immagini in Scapozza & Ambrosi, 2017).

La gestione autonoma del momento di acquisizione delle informazioni e la maggiore risoluzione geometrica consentite dal drone costituisce, da un lato, valore aggiunto per il monitoraggio e lo studio dei versanti, dall'altro, introduce eterogeneità nella rappresentazione della verità. Rispetto alle ortofoto SWISSIMAGE e al MNT swissALTI3D, forniti dall'Ufficio federale di topografia swisstopo e le cui risoluzioni al suolo sono rispettivamente di 25 e 200 cm, i prodotti foto-

Tabella 3: Confronto tra lo spostamento (dH) e la velocità (vH) orizzontale misurata a terra con il dGPS e derivata dal confronto tra le ortofoto da drone.

	Data acquisizione	dH [m]	vH [m·a ⁻¹]
Stabbio di Largario – lobo E			
dGPS	25.09.2014/23.09.2016	1.24	0.62
drone	02.10.2014/20.09.2016	1.31	0.65
Δ dGPS/drone [%]	–	6	5
Stabbio di Largario – lobo W			
dGPS	25.09.2014/23.09.2016	2.10	1.05
drone	02.10.2014/20.09.2016	1.96	0.98
Δ dGPS/drone [%]	–	-7	-7
Piancabella			
dGPS	22.09.2014/26.09.2016	0.46	0.23
drone	22.09.2014/28.09.2016	0.55	0.27
Δ dGPS/drone [%]	–	20	17

grammetrici ottenuti presentano rispettivamente risoluzioni comprese fra 5.1 e 6.4 cm per le ortofoto e tra 20 e 100 cm per i MNT e i relativi modelli ombreggiati (Fig. 3).

RISULTATI E INTERPRETAZIONE

Evoluzione della temperatura della superficie del suolo

L'anno idrologico 2014/2015 estremamente caldo aveva portato a un innalzamento di MAGST molto pronunciato. In tutti i siti monitorati si erano registrati, a inizio settembre 2015, i valori più alti dall'inizio delle misurazioni (Scapozza *et al.*, 2016). Nell'anno seguente, si assiste a una significativa diminuzione delle temperature, che tra metà agosto e fine settembre 2016 hanno

raggiunto valori simili a quelli registrati nell'autunno del 2014 (Fig. 2A).

L'inverno 2015/2016 è stato estremamente mite, con temperature da primato, ed è risultato il secondo più caldo, dopo quello del 2006/2007, dall'inizio delle misurazioni nel 1864 (MeteoSvizzera, 2017). Nonostante questo fatto, la mancanza estrema di precipitazioni nevose a dicembre 2015 e, in generale, le scarse precipitazioni nevose lungo tutto l'inverno, hanno permesso al suolo di raffreddarsi in maniera significativa. Basti pensare che, a fine dicembre, le Alpi erano ancora libere da neve fino a circa 2'000 m slm e lo spessore dello strato nevoso a 2'500 m slm era di appena 20-30 cm (MeteoSvizzera, 2017). Di conseguenza, il raffreddamento di MAGST tra il 5 settembre 2015 (valore massimo di tutta la serie di misure per tutti i siti) e metà agosto/fine settembre 2016 è stato superiore a 1.6 °C, per raggiungere i 2.5 °C sul ghiacciaio roccioso dei Ganoni di Schenadüi (Tab. 2). In generale, il raffreddamento è

stato tanto più marcato quanto più il ghiacciaio roccioso è elevato in altitudine, segno che è proprio venuto a mancare l'effetto isolante del manto nevoso, normalmente più efficace per i siti situati più in altitudine dove le precipitazioni nevose sono più abbondanti.

Sebbene a Sud delle Alpi le condizioni estive siano giunte tardivamente solo a partire da luglio, esse si sono prolungate fino a fine settembre, che è stato il più caldo mai misurato dal 1864 (Gaia *et al.*, 2017). Questo spiega il leggero riscaldamento di MAGST tra fine settembre e inizio ottobre 2016. L'inverno 2016/2017, nuovamente asciutto, in particolare con innevamento molto scarso tra dicembre e febbraio (MeteoSvizzera, 2018), ha fatto sì che MAGST sia rimasta stabile senza riscaldamenti significativi fino a maggio-giugno 2017. L'effetto combinato della primavera ed estate calde (entrambe le terze più calde dal 1864; MeteoSvizzera, 2018) ha portato a un innalzamento di MAGST, con i valori massimi dell'anno idrologico 2016/2017 regi-

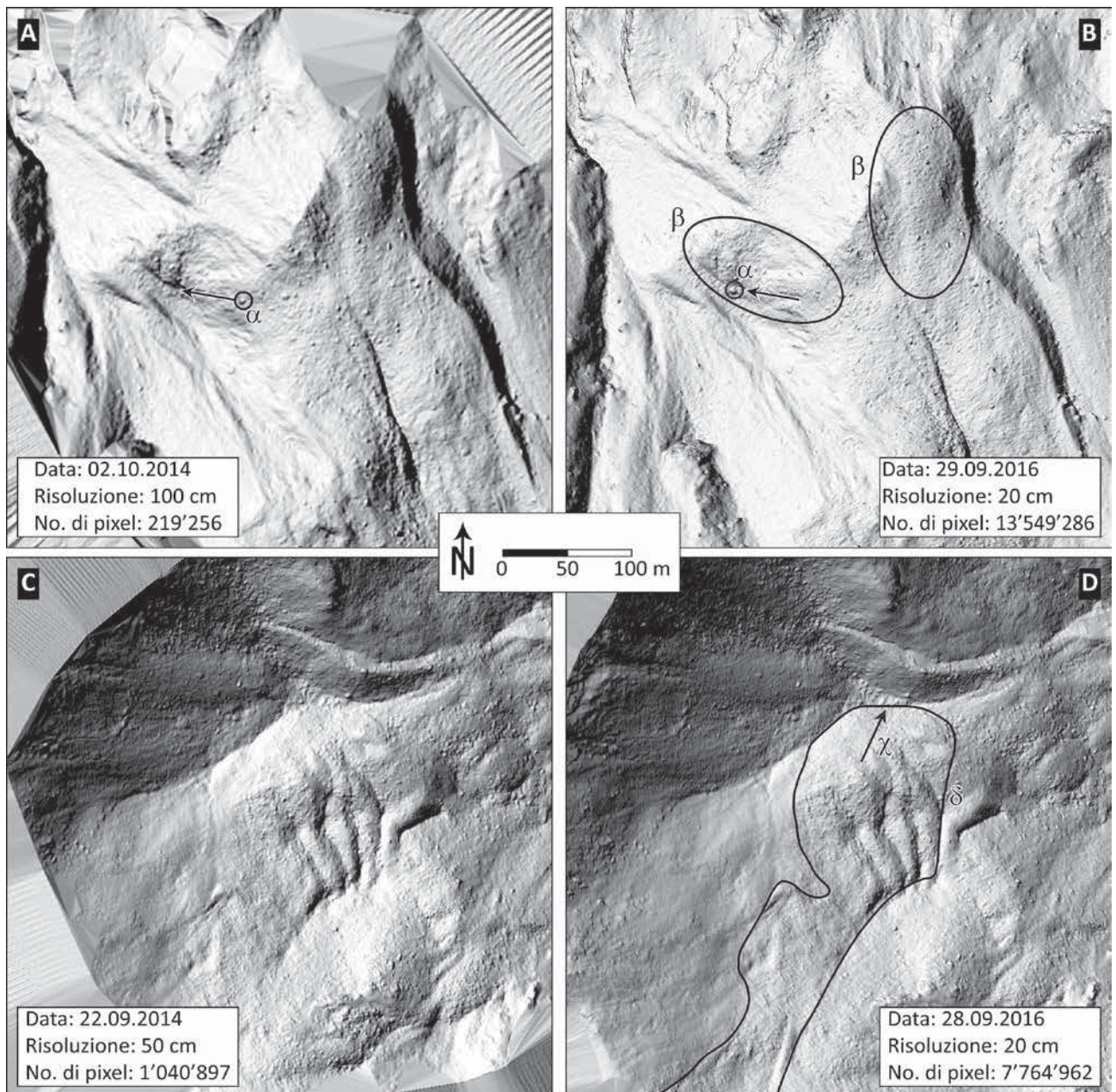


Figura 3: Rilievi ombreggiati ottenuti dai modelli numerici di terreno calcolati tramite fotogrammetria da drone. A) e B) Ghiacciaio roccioso di Stabbio di Largario. C) e D) Ghiacciaio roccioso di Piancabella. Vedi il testo per i dettagli.

strati ad agosto (Fig. 2A). Questo riscaldamento è stato particolarmente marcato sul ghiacciaio roccioso del Lago Nero, con MAGST che è aumentata di più di 2 °C tra fine novembre 2016 e agosto 2017 (Tab. 2), con ben +1.83 °C tra il 4 marzo e l'8 agosto 2017 (più di 0.01 °C al giorno in media).

Evoluzione della cinematica dei ghiacciai rocciosi

Dopo le velocità orizzontali di superficie eccezionalmente alte del 2014/2015, che avevano terminato la fase di costante accelerazione dei movimenti in atto dal 2011 (Scapozza *et al.*, 2016), nel 2015/2016 e nel 2016/2017 si assiste a una rilevante diminuzione delle velocità, riscontrata per tutti i ghiacciai rocciosi misurati annualmente (Fig. 2B). Dal 2015 al 2017 questa diminuzione è stata compresa tra il 39% di Piancabella e il 64% del lobo E del ghiacciaio roccioso di Stabbio di Largario (Tab. 2); in media si è misurata una diminuzione delle velocità del 53%, corrispondente a un dimezzamento della media annua rispetto al 2015. Per i ghiacciai rocciosi di Stabbio di Largario (lobo E), Piancabella e Ganoni di Schenadüi, le velocità medie misurate nel 2017 sono le più basse di tutta la serie di misure iniziata nel 2009. Questa è una conseguenza diretta dello scarso innevamento durante gli inverni 2015/2016 e 2016/2017 che, da una parte, ha portato a una riduzione di MAGST (vedi capitolo precedente), dall'altra, ha limitato la quantità d'acqua di fusione nivale che riscalda il corpo del permafrost all'inizio dell'estate e che favorisce una crescita delle deformazioni quale conseguenza dell'aumento di plasticità del ghiaccio (Lambiel, 2011; Scapozza & Lambiel, 2013).

Acquisizione di fotografie aeree con drone

Dalle immagini acquisite sui ghiacciai rocciosi di Stabbio di Largario e Piancabella è possibile trarre diverse informazioni generali o puntuali sulle deformazioni che avvengono alla loro superficie (vedi Scapozza & Ambrosi, 2017). Nel caso specifico di Stabbio di Largario, è possibile osservare il trasferimento verso valle di singoli blocchi, che in prossimità del fronte normalmente sono soggetti a processi di crollo (Fig. 3A-B, lett. α), e pertanto non sono direttamente utilizzabili come riferimento per la misura della velocità. Il movimento in massa di interi settori, soprattutto nelle zone che presentano gli spostamenti superficiali maggiori, è ben visibile dal confronto tra i rilievi ombreggiati del 2014 e del 2016 (Fig. 3A-B, lett. β). Per il sito di Piancabella, la concentrazione del movimento lungo un singolo vettore di spostamento sta avendo l'effetto di accentuare la pendenza del fronte del ghiacciaio roccioso (Fig. 3C-D, lett. χ). Un attento confronto tra le immagini del 2014 e del 2016 permette inoltre di delimitare con precisione il settore che presenta dei movimenti significativi della superficie del ghiacciaio roccioso (Fig. 3C-D, lett. δ), analisi che si avvantaggia inoltre dell'impiego di tecniche automatiche di analisi dei MNT (Dall'Asta *et al.*, 2017).

DISCUSSIONE E CONCLUSIONI

Relazioni tra la temperatura e la cinematica dei ghiacciai rocciosi

Dopo dieci anni di misurazioni sistematiche, il legame tra l'evoluzione di MAGST e della cinematica dei ghiacciai rocciosi, già evidenziato qualitativamente da Scapozza *et al.* (2016), può essere ora espresso in maniera quantitativa anche per i ghiacciai rocciosi delle Alpi Ticinesi. I dati degli ultimi due anni idrologici non fanno che confermare tale relazione. Dopo l'anno idrologico 2014/2015 estremamente caldo, la marcata diminuzione delle velocità orizzontali dei ghiacciai rocciosi è la diretta conseguenza di un significativo raffreddamento di MAGST causato dagli inverni 2015/2016 e 2016/2017 contrassegnati da una mancanza estrema di precipitazioni nevose. Vale quindi la pena soffermarsi su tale relazione per definire quantitativamente la velocità di reptazione (*creep*) dei ghiacciai rocciosi in funzione della temperatura. La relazione teorica che descrive la velocità di reptazione (v) in funzione della temperatura del permafrost (T) è conosciuta da diversi anni e segue la funzione esponenziale seguente (Arenson, 2002; in Staub, 2015a: 25):

$$v = a \cdot e^{bT} \quad (1)$$

dove: a è un parametro variabile dipendente dalla geometria del ghiacciaio roccioso, della sua composizione interna e dalla pendenza del versante; b caratterizza le reattività del ghiacciaio roccioso ai cambiamenti di temperatura del permafrost T [k].

Sulla base di questa funzione, ma considerando la temperatura dell'aria invece di quella del permafrost (non misurata direttamente in nessun sito ticinese), nello scorso rapporto è stato possibile proporre una variante dell'eq. 1 che esprimesse, per il ghiacciaio roccioso di Stabbio di Largario, la relazione tra la velocità massima (v_{max}) e la temperatura media annua dell'aria ($MAAT$) dalla forma seguente (Scapozza *et al.*, 2016: 42):

$$v_{max} \approx a \cdot e^{b \cdot MAAT} \quad (2)$$

dove: $a = 0.53$; $b = 0.71$; v_{max} [$m \cdot a^{-1}$]; $MAAT$ [$^{\circ}C$].

I dati di movimento del ghiacciaio roccioso, poi convertiti in velocità medie, erano stati ottenuti grazie alla monofotogrammetria digitale tra il 1901 e il 2008 (Scapozza *et al.*, 2014b) e misurati con il dGPS tra il 2009 e il 2015. Grazie ai nuovi dati per gli anni idrologici 2015/2016 e 2016/2017, è possibile proporre la relazione tra la velocità orizzontale di superficie media (vH) del ghiacciaio roccioso e la temperatura della superficie del suolo ($MAGST$) seguente (Fig. 4A):

$$vH \approx a \cdot e^{b \cdot MAGST} \quad (3)$$

dove: a varia tra 0.17 e 0.27; b varia tra 0.38 e 0.95; vH [$m \cdot a^{-1}$]; $MAGST$ [$^{\circ}C$]. Una relazione analoga è stata ritrovata anche per il ghiacciaio roccioso della Gemmi, nelle Alpi Bernesi, con $a = 1.25$ e $b = 0.9$ (Staub, 2015b: 11).

Questa relazione esponenziale tra velocità e temperatura dei ghiacciai rocciosi è visibile sia considerando tutti i dati a disposizione sia quantificando distintamente le relazioni per i ghiacciai rocciosi di Stabbio di Largario e dei Ganoni di Schenadüi/Piancabella (Fig. 4A). Considerando tutti i valori, è interessante notare come, indipendentemente dal ghiacciaio roccioso, più MAGST è elevata, più la velocità orizzontale di superficie è anche elevata. In altre parole, indipendentemente dalla geometria del ghiacciaio roccioso e dalla pendenza del versante, più il ghiacciaio roccioso si trova a quote elevate, più MAGST è fredda, più la velocità di reptazione è lenta. Questo indica quindi che, a dominare la velocità media misurata, è la composizione interna del ghiacciaio roccioso; in particolare, lo stato termico e la quantità di ghiaccio del permafrost, almeno fino a quando le condizioni non varieranno in modo significativo determinando dei cambiamenti repentini della cinematica (collasso del ghiacciaio roccioso o cessazione del movimento di reptazione).

Siccome i dati per i ghiacciai rocciosi dei Ganoni di Schenadüi e di Piancabella sono coerenti, la relazione tra vH e $MAGST$ è stata computata considerando entrambi i siti congiuntamente. I dati di Stabbio di Largario sono invece stati considerati separatamente (Fig. 4A). Sia per Ganoni di Schenadüi + Piancabella, sia per Stabbio di Largario, la relazione quantificata tra vH e $MAGST$ è risultata significativa, mostrando come questi due parametri siano fortemente dipendenti ($R > 0.7$): il coefficiente di determinazione (R^2) ottenuto è infatti di 0.56, rispettivamente 0.85, corrispondente a un coefficiente di correlazione (R) di 0.75, rispettivamente 0.92. È dunque ulteriormente rafforzata l'importanza della velocità media di superficie quale parametro fondamentale che riassume, integra ed esprime le variazioni di cinematica, reologia e stato termico di un ghiacciaio roccioso e permette quindi, indirettamente, di monitorarle (Kellerer-Pirklbauer *et al.*, 2017, 2018; PERMOS, 2018).

Apporto dei droni al monitoraggio del permafrost

L'utilizzo di immagini aeree scattate con il drone è stato introdotto per due ragioni. Da una parte, per ottenere informazioni distribuite a complemento e perfezionamento di quanto realizzabile tramite misurazioni dGPS terrestri e, di conseguenza, disporre di numerosi vettori di spostamento per definire campi di velocità (spazializzazione dell'informazione); sul ghiacciaio roccioso di Stabbio di Largario sono stati computati 364 vettori di spostamento, contro i 33 misurati annualmente con il dGPS (vedi Scapoza & Ambrosi, 2017: 23). D'altra parte, per testare questo metodo di acquisizione di dati di spostamento da immagini aeree e confrontarlo con le misure geodetiche terrestri (Eltner *et al.*, 2016). Un confronto tra le velocità orizzontali di superficie dei ghiacciai rocciosi di Stabbio di Largario e Piancabella derivate dalle immagini da drone e misurate a terra con il dGPS è quindi presentato per il periodo 2014-2016 (Fig. 4B). Per compiere un confronto significativo, i dati misurati con il dGPS sono stati accoppiati con il valore desunto dalle immagini aeree nello stesso settore; in altre parole, il confronto è basato sui valori

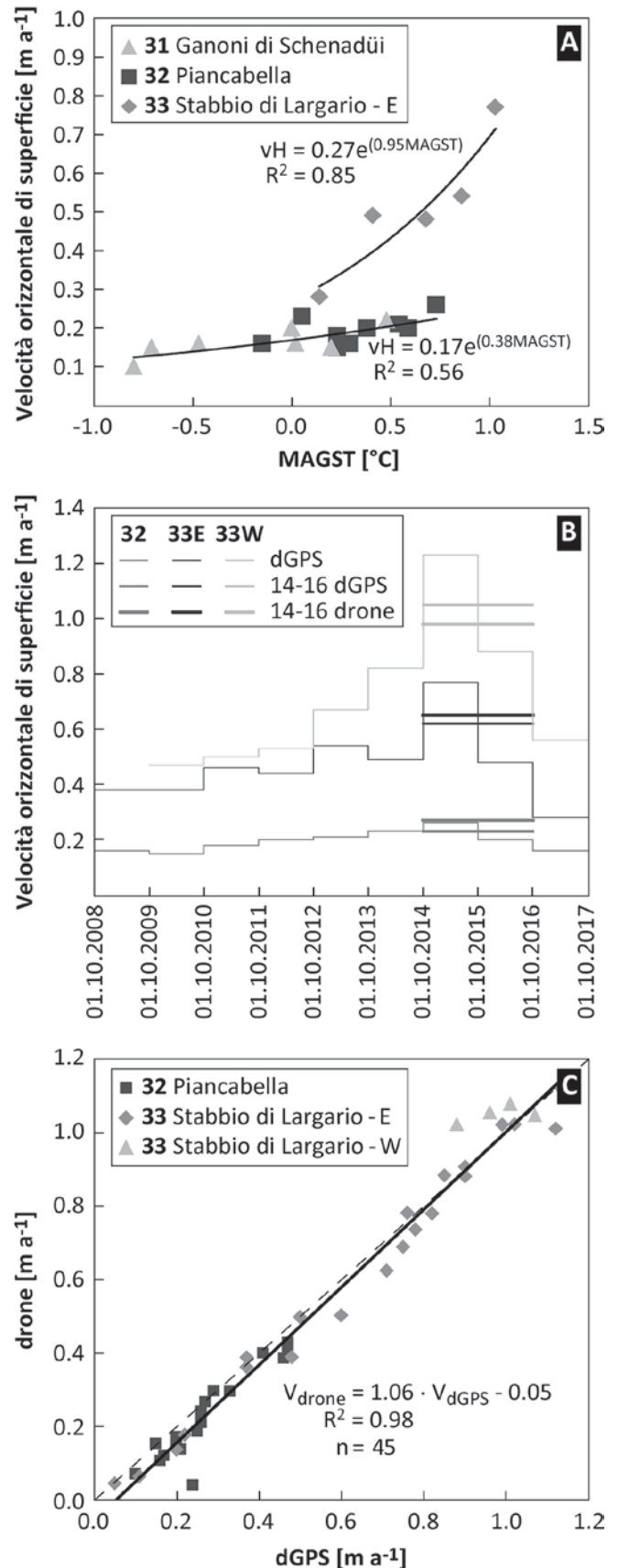


Figura 4: Evoluzione della cinematica dei ghiacciai rocciosi. A) Relazione tra la velocità orizzontale media di superficie e la media annua della temperatura della superficie del suolo ($MAGST$). B) Confronto tra la velocità orizzontale di superficie misurata a terra con il dGPS e derivata dal confronto tra le ortofoto acquisite con il drone. C) Grafico di dispersione (*scatter plot*) delle velocità misurate con il dGPS *versus* derivate dalle immagini del drone.

acquisiti dai due metodi nello stesso punto e per lo stesso numero di punti (considerando i punti che permettono di definire la velocità media annua di riferimento; vedi Tab. 1).

La differenza tra la velocità media 2014-2016 misurata con il dGPS o calcolata sulla base delle immagini da drone è compresa tra 0.03 e 0.07 m (Fig. 4B), quindi non si discosta di molto dall'accuratezza di 0.02-0.05 m delle misure con il dGPS (Scapozza *et al.*, 2014b). Le variazioni percentuali possono sembrare più ampie (tra 5 e 20% secondo i siti; vedi Tab. 3), ma i valori relativamente elevati per il ghiacciaio roccioso di Piancabella si spiegano dalle velocità di spostamento più basse che, di fatto, fanno sì che la differenza di velocità sia di soli 0.04 m/a.

Le differenze tra i due metodi non sono sistematiche, quindi non vi è una sovrastima o una sottostima delle velocità ricavate dall'analisi delle ortofoto. Il confronto tra i 45 singoli punti di misura usati per confrontare i due metodi mostra una differenza massima di 0.20 m per il ghiacciaio di Piancabella (Fig. 4C). Questo valore diminuisce a 0.15 m per il lobo W del ghiacciaio roccioso di Stabbio di Largario, rispettivamente 0.11 m per il lobo E. La differenza media su tutte le misure è di soli 0.02 m (media di 0.49 m·a⁻¹ per le misure dGPS, 0.51 m·a⁻¹ per il drone), mentre la radice dell'errore quadratico medio (RMSE – *Root Mean Square Error*) è di 0.06 m. Questo valore è nettamente inferiore a quanto ottenuto dal confronto di 48 misure di spostamento compiute tra il 2012 e il 2014 su un ghiacciaio roccioso della Valtournenche (Valle d'Aosta), che presentava un RMSE di 0.16 m (Dall'Asta *et al.*, 2017). Il coefficiente di determinazione (R²) tra le due variabili di 0.98, corrispondente a un coefficiente di correlazione (R) di 0.99, permette di concludere che le misure ottenute con i due metodi sono perfettamente correlate. Il drone ad ala fissa si è quindi rivelato particolarmente efficace per il monitoraggio della cinematica dei ghiacciai rocciosi, situati spesso in situazioni di difficile accessibilità logistica e su versanti impervi. Tuttavia, la necessità di dover posizionare e misurare un certo numero di GCP destinati all'appoggio del blocco fotogrammetrico limita, almeno in parte, tale beneficio. Il recente sviluppo e miglioramento di mezzi ad ala fissa o ad ala rotante dotati di ricevitore RTK (*Real-time kinematics*) potrebbe aumentare in modo significativo l'accuratezza nella produzione di MNT, costituendo un elemento di rilevante interesse per il futuro del monitoraggio in ambienti remoti (Forlani *et al.*, 2018).

A livello di confronto tra la cinematica dei ghiacciai rocciosi e il clima, però, le sole velocità medie calcolate dalle fotografie aeree scattate con il drone nel 2014 e nel 2016 non permetterebbero di cogliere l'eccezionalità dell'anno idrologico 2014/2015. La media biennale presenta sì i valori di spostamento più alti di tutto il periodo di misure disponibili, ma non permette di osservare l'eccezionale incremento avvenuto tra il 2013/2014 e il 2014/2015 e la seguente rilevante diminuzione di velocità nel 2016 (Fig. 4A).

L'approccio multi-metodi (nell'esempio presentato qui tra drone e dGPS), è quindi necessario per l'acquisi-

zione dei GCP, per la validazione incrociata dei dati, per la spazializzazione di dati puntuali nell'ottica di disporre di una migliore continuità spaziale delle misure, e per la composizione di serie temporali semi-continue per ottenere una migliore continuità temporale del monitoraggio. L'utilizzo di droni ad ala fissa rappresenta pertanto un ottimo complemento ai dati di terreno in grado soprattutto di migliorare la continuità spaziale (ma anche quella temporale, in caso di più voli ripetuti nel corso di un anno) dei dati di monitoraggio della cinematica dei ghiacciai rocciosi, nell'ottica di una sempre migliore comprensione della loro reazione ai cambiamenti climatici in atto nella criosfera alpina.

RINGRAZIAMENTI

I primi dieci anni di monitoraggio sistematico del permafrost nelle Alpi Ticinesi hanno beneficiato di numerosi aiuti finanziari e logistici nell'acquisizione dei dati. Le prime ricerche sono state finanziate dalle Università di Losanna (2007-2013) e di Friburgo (2009-2013), mentre il monitoraggio è proseguito grazie al contributo della rete svizzera di monitoraggio del permafrost PERMOS, del Museo cantonale di storia naturale di Lugano e della Fondazione Avv. Dott. Angelo Berla, console generale, e Teresita Berla nata Veglio. L'acquisizione e l'analisi delle immagini acquisite con il drone è stata finanziata in parte nell'ambito del progetto Arge Alp EVADAR "Emergenze gestite con Velivoli a pilotaggio remoto in Aree di Difficile Accesso e a Rischio" ed è stata svolta in collaborazione con lo Studio di geomatica Lehmann-Visconti (Daniele Righetti, Rodolfo Visconti). Un ringraziamento particolare a Umberto Morra di Cella per la rilettura critica del manoscritto e alle Officine Idroelettriche della Maggia SA (Ofima) per il supporto logistico alle misurazioni compiute sul ghiacciaio roccioso del Passo di Grandinaglia. In dieci anni, l'acquisizione e il trattamento dei dati ha beneficiato del supporto di numerose persone: Stefano Mari (principale contributore nel periodo 2009-2013), Christian Ambrosi, Simona Bronzini, Andreas Bruder, Martin Brunati, Claudio Castelletti, Matteo Clerici, Dorota Czerski, Nicola Deluigi, Mattia Domenici, Simona Fratianni, Elisa Giaccone, Marcus Hoffmann, Vittorio Lepori, Ruggero Mari, Silvia Passardi, Maurizio Pozzoni, Giulia Ramelli-Grassi, Stefano Rioggi, Eliano Scapozza, Georgia Scapozza-Fontana, Filippo Schenker, Giorgio Valenti e Loris Vallenari.

BIBLIOGRAFIA

- Arenson L. 2002. Unstable alpine permafrost: a potentially important natural hazard - Variations of geotechnical behaviour with time and temperature. PhD Thesis, ETH Zürich, Diss. ETH No. 14801, 271 pp. [<https://doi.org/10.3929/ethz-a-004442393>].
- Bruder A., Lepori F., Pozzoni M., Pera S., Rioggi S., Scapozza C., Domenici M. & Colombo L. 2016. Lago Nero – a new site to assess the effects of environmental change on high-alpine lakes and their catchments. ICP-IM 25th Annual Report 2016. Reports of the Finnish Environment Institute, 29: 52-56. [<http://repository.supsi.ch/7706>].
- Dall'Asta E., Forlani G., Roncella R., Santise M., Diotri F. & Morra di Cella U. 2017. Unmanned aerial systems and DSM matching for rock glacier monitoring. ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing, 127: 102-114. [<http://dx.doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.10.003>].
- Eltner A., Kaiser A., Castillo C., Rock G., Neugirg F. & Abellán A. 2016. Image-based surface reconstruction in geomorphometry – merits, limits and developments. Earth Surface Dynamics, 4: 359-386. DOI: 10.5194/esurf-4-359-2016.
- Forlani G., Dall'Asta E., Diotri F., Morra di Cella U., Roncella R. & Santise M. 2018. Quality Assessment of DSMs Produced from UAV Flights Georeferenced with On-Board RTK Positioning. Remote Sensing, 10: 311. DOI: 10.3390/rs10020311.
- Gaia M., Spinedi F. & Altoni E. 2017. Bilancio meteorologico dell'anno 2016. Bollettino della Società ticinese di Scienze naturali, 105: 89-91.
- Kellerer-Pirklbauer A., Bodin X., Delaloye R., Fischer A., Gärtner-Roer I., Hartl L., Kaufmann V., Krainer K., Lambiel C., Mair V., Marcer M., Morra di Cella U., Scapozza C., Schoeneich P. & Staub B. 2017. Interannual variability of rock glacier surface velocities and its relationship to climatic conditions on a decadal scale: Some insights from the European Alps. Geophysical Research Abstract, 19: EGU2017-13912.
- Kellerer-Pirklbauer A., Delaloye R., Lambiel C., Gärtner-Roer I., Kaufmann V., Scapozza C., Krainer K., Staub B., Thibert E., Bodin X., Fischer A., Hartl L., Morra di Cella U., Mair V., Marcer M. & Schoeneich P. 2018. Interannual variability of rock glacier velocities in the European Alps. Proceedings of the 5th European Conference on Permafrost, 23 June-1st July 2018, Chamonix/Mont-Blanc, France, in press.
- Lambiel C. 2011. Le glacier rocheux déstabilisé de Tsaté-Moiry (VS): caractéristiques morphologiques et vitesses de déplacement. In: Lambiel C., Reynard E. & Scapozza C. (éds), La géomorphologie alpine : entre patrimoine et contrainte. Actes du colloque de la Société Suisse de Géomorphologie, Olivone, Suisse, 3-5.9.2009. Université de Lausanne, Institut de Géographie, Géovisions, 36, pp. 211-224. [https://serval.unil.ch/resource/serval:BIB_B1C7B78A8BD2.P001/REF].
- Mari S., Scapozza C., Delaloye R. & Lambiel C. 2012. Il permafrost nelle Alpi Ticinesi (2006-2011). Rapporto No. 1 del Gruppo Permafrost Ticino. Bollettino della Società ticinese di Scienze naturali, 100: 135-139. [<http://repository.supsi.ch/2147>].
- MeteoSvizzera 2017. Rapporto sul clima 2016. Zurigo, Ufficio federale di meteorologia e climatologia MeteoSvizzera, 80 pp.
- MeteoSvizzera 2018. Bollettino del clima dell'anno 2017. Locarno-Monti, Ufficio federale di meteorologia e climatologia MeteoSvizzera, 12 pp.
- PERMOS 2013. Permafrost in Switzerland 2008/2009 and 2009/2010. Noetzi J. (ed.), Glaciological Report (Permafrost) No. 10/11 of the Cryospheric Commission of the Swiss Academy of Sciences, 80 pp.
- PERMOS 2016. Permafrost in Switzerland 2010/2011 to 2013/2014. Noetzi J., Luethi R. & Staub B. (eds.), Glaciological Report (Permafrost) No. 12/15 of the Cryospheric Commission of the Swiss Academy of Sciences, 85 pp.
- PERMOS 2018. Permafrost in Switzerland 2014/2015 to 2015/2016. Noetzi J., Pellet C. & Staub B. (eds.), Glaciological Report (Permafrost) No. 16/17 of the Cryospheric Commission of the Swiss Academy of Sciences, in press.
- Pozzoni M., Bruder A., Bulgheroni M., Pera S., Scapozza C., Rioggi S., Domenici M. & Colombo L. 2018. Lago Nero: monitoraggio della risposta di un ecosistema all'inquinamento atmosferico. Bollettino della Società ticinese di Scienze naturali, 106: 23-33.
- Scapozza C. & Lambiel C. 2013. Structure interne et répartition du pergélisol dans l'éboulis «à galets» de Tsaté-Moiry (VS). In: Graf C. (red.), Mattertal – ein Tal in Bewegung. Publikation zur Jahrestagung der Schweizerischen Geomorphologischen Gesellschaft, 29.6-1.8.2011, St. Niklaus, Schweiz. Birnensdorf, Eidg. Forschungsanstalt WSL, pp. 33-45. [<http://repository.supsi.ch/3156>].
- Scapozza C. & Ambrosi C. 2017. Monitoraggio sistematico del permafrost con il drone ad ala fissa (Cantone Ticino, Svizzera). Droni nel settore pubblico fra presente e futuro, 11.12.2017, Milano, Italia. [<http://www.regione.lombardia.it/wps/portal/istituzionale/HP/DettaglioRedazionale/servizi-e-informazioni/Enti-e-Operatori/protezione-civile/progetti-europei-protezione-civile/convegno-droni-evadar/convegno-droni-evadar>].
- Scapozza C., Scapozza V. & Fontana G. 2008. Morfologia periglaciale delle Alpi Ticinesi orientali. GEA – Paesaggi, territori, geografie, 24: 14-22. [<http://repository.supsi.ch/9230>].
- Scapozza C., Mari S., Antognini M., Lepori V. & Ambrosi C. 2014a. Il permafrost nelle Alpi Ticinesi (2011/2012 e 2012/2013). Rapporto No. 2 del Gruppo Permafrost Ticino. Bollettino della Società ticinese di Scienze naturali, 102: 59-69. [<http://repository.supsi.ch/5420>].
- Scapozza C., Lambiel C., Bozzini C., Mari S. & Conedera M. 2014b. Assessing the rock glacier kinematics on three different time scales: a case study from the Southern Swiss Alps. Earth Surface Processes and Landforms, 39: 2056-2069. DOI: 10.1002/esp.3599.
- Scapozza C., Giaccone E., Mari S., Antognini M., Fratianni S. & Ambrosi C. 2016. Il permafrost nelle Alpi Ticinesi (2013/2014 e 2014/2015). Rapporto No. 3 del Gruppo Permafrost Ticino. Bollettino della Società ticinese di Scienze naturali, 104: 37-44. [<http://repository.supsi.ch/7891>].
- Scapozza C., Colombo L., Domenici M., Lepori F., Pera S., Pozzoni M., Rioggi S. & Bruder A. 2017. Lago Nero – an example of mountain lake monitoring in a changing Alpine cryosphere. ICP-IM 26th Annual Report 2017. Reports of the Finnish Environment Institute, 24: 43-49. [<http://repository.supsi.ch/8618>].

- Scapozza C., Bruder A., Lepori F., Pozzoni M., Pera S., Rioggi S., Domenici M. & Colombo L. 2018. Alpine cryosphere monitoring for mountain lake studies: the example of Lago Nero (Ticino Alps). *Geographica Helvetica*, in press.
- Staub B. 2015a. The evolution of mountain permafrost in the context of climate change: towards a comprehensive analysis of permafrost monitoring data from the Swiss Alps. PhD Thesis, Department of Geosciences, University of Fribourg, 207 pp. [oai:doc.rero.ch:20160725084614-JV].
- Staub B. 2015b. Key messages from observational mountain permafrost research. The Evolution of Mountain Permafrost in Switzerland (TEMPS), Final Symposium, 4-5.2.2015, Sion, Switzerland. [http://www.temps-symposium.ch/files/talks/Staub_Key_messages_observational_mountain_permafrost_research.pdf].
- Wirz V., Beutel J., Delaloye R., Gsell T., Gruber S., Gärtner-Roer I., Hasler A., Kenner R., Limpach P., Müller J., Phillips M., Raetzo H., Scapozza C., Vieli A. & Weber S. 2016. Short-term variability of rock glacier surface velocities in the Swiss Alps revealed by continuous GPS. In: Günther F. & Morgenstern A. (eds.), XI. International Conference On Permafrost – Book of Abstracts, 20-24.6.2016, Potsdam, Germany. Potsdam, Bibliothek Wissenschaftspark Albert Einstein, pp. 1064-1065. DOI: 10.2312/GFZ.LIS.2016.001.