

Foto:

Uomo tra le montagne, in secondo piano la Capanna dell'Adula CAS. Sullo sfondo la Cima di Gana Bianca (2.843 m slm) con il ghiacciaio roccioso di Stabbio di Largario all'inizio del Novecento.

© Archivio Fotografico Roberto Donetta, foto DON2894.



IL PERMAFROST NELLE ALPI TICINESI: TEMPERATURA E MOVIMENTI DEI GHIACCIAI ROCCIOSI DAL 2006 AL 2014

Cristian Scapozza¹, Elisa Giaccone², Stefano Mari³, Marco Antognini⁴, Simona Fratianni^{2,5}, Christian Ambrosi¹

In questo contributo sono presentati i dati climatici e le velocità di spostamento di sette ghiacciai rocciosi delle Alpi Ticinesi. Per il periodo dal 2011 al 2014, si è assistito a un aumento significativo delle temperature del suolo in zone di permafrost, soprattutto a seguito dell'estate e autunno 2011 molto caldi. Questo riscaldamento ha causato un'accelerazione delle velocità di spostamento di quasi tutti i ghiacciai rocciosi, con valori fino al 50% superiori rispetto all'inizio delle misurazioni nel 2009.

Introduzione

È ormai riconosciuto che nelle Alpi è in corso un aumento delle temperature e un cambiamento nel regime nivometrico e delle precipitazioni (Faletto et al. 2013; Terzagò et al. 2013; Acquavota et al. 2014; Scapozza et al. 2014a; Giaccone et al. 2015). Negli ultimi decenni è quindi iniziato un monitoraggio sistematico della temperatura e dei movimenti dei ghiacciai rocciosi attivi nell'intero arco alpino (per la Svizzera, vedi Delaloye et al. 2010; PERMOS 2013) e dal 2006 sono studiati anche i ghiacciai rocciosi delle Alpi Ticinesi, che forniscono dati sull'evoluzione del permafrost nel contesto morfoclimatico sudalpino (Scapozza e Mari 2010; Mari et al. 2012; Scapozza et al. 2014b).

In questo contesto, dal 2013 l'Istituto scienze della Terra (IST) della SUPSI è diventato ufficialmente partner della rete svizzera di monitoraggio del permafrost PERMOS. Si è quindi colmata una lacuna geografica per quanto concerne le ricerche sul permafrost (ovvero il terreno permanentemente gelato di alta montagna) e sui ghiacciai rocciosi. In questo ambito le Alpi Ticinesi erano state finora un terreno di studio relativamente marginale rispetto ad altre regioni delle Alpi Svizzere.

Per seguire l'evoluzione a lungo termine del permafrost, l'IST-SUPSI studia sette ghiacciai rocciosi attivi disposti uniformemente sul territorio dell'Alto Ticino: dalla Valle Maggia alla Valle di Blenio, passando dalla regione del Gottardo [F. 1]. I ghiacciai rocciosi sono importanti indicatori dello stato del permafrost (temperatura, quantità di ghiaccio, struttura ecc.) e

quindi dell'influsso dei cambiamenti climatici sugli ambienti di alta montagna. Ricordiamo che si distinguono tre tipi di ghiacciai rocciosi: i ghiacciai rocciosi attivi, ovvero colate di materiale sciolto (detriti di roccia) che si muovono verso valle a causa della deformazione del ghiaccio in essi contenuto; i ghiacciai rocciosi inattivi, che contengono ghiaccio ma non si muovono e, infine, i ghiacciai rocciosi relitti, che non contengono più ghiaccio in quanto testimoni di fasi climatiche più fredde dell'attuale (Scapozza e Fontana 2009).

Le osservazioni svolte sui siti monitorati sono di due tipi [F. 1]: (1) la misura in continuo della temperatura della superficie del suolo (di seguito GST, per *Ground Surface Temperature*), ottenuta grazie a sensori autonomi di temperatura e, (2) dal 2009, la misura dei movimenti superficiali dei ghiacciai rocciosi, rilevata mediante GPS di precisione (GPS differenziale, di seguito DGPS, per *Differential GPS*). Per capire al meglio le variazioni di temperatura e di movimento dei ghiacciai rocciosi misurate, è stata condotta anche un'analisi climatica per comprendere l'andamento di temperature e precipitazioni medie in altitudine.

L'obiettivo di questo articolo è presentare i risultati dei primi cinque anni di monitoraggio sistematico (dal 2009 al 2014) delle temperature e dei movimenti del permafrost nelle Alpi ticinesi. Le analisi sono svolte per anno idrologico, che in Svizzera corrisponde al periodo tra il primo ottobre e il 30 settembre dell'anno successivo.

¹ Istituto scienze della Terra (IST), Scuola Universitaria Professionale della Svizzera Italiana (SUPSI)

² Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Torino

³ Département des Géosciences – Géographie, Université de Fribourg

⁴ Museo cantonale di storia naturale, Lugano

⁵ Centro di Ricerca sui Rischi Naturali in Ambiente Montano e Collinare (NatRisk), Grugliasco

Metodi

Analisi climatica

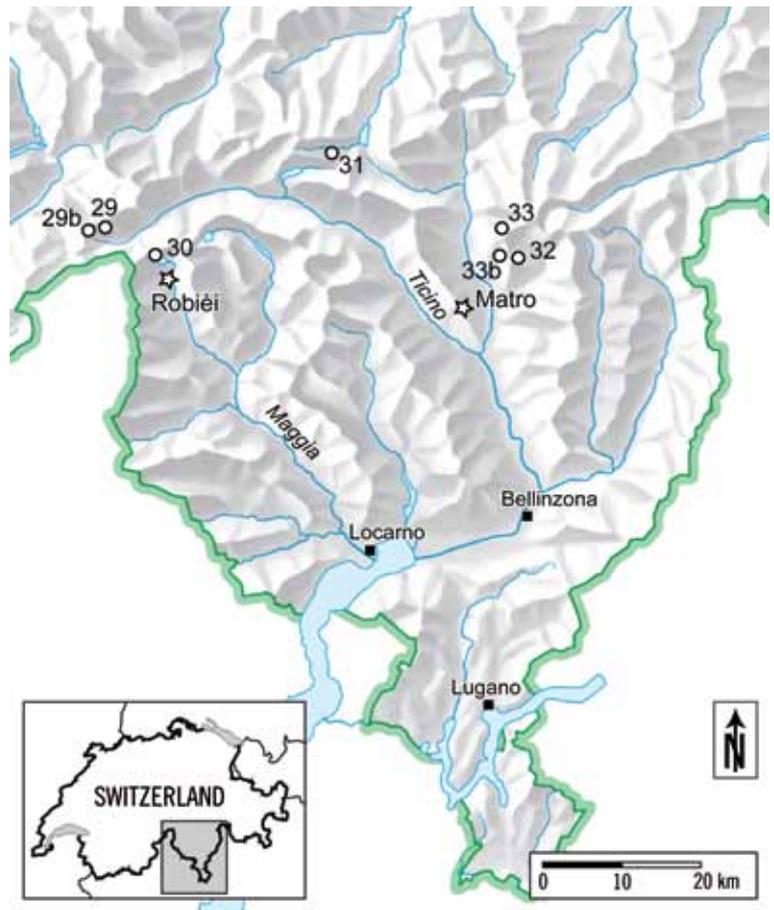
I dati di 16 stazioni automatiche e pluviometriche manuali collocate nei cantoni Ticino e Grigioni, comprese tra una quota minima di 273 m slm (Lugano) e una massima di 2.171 m slm (Matro), sono stati analizzati per l'attuale trentennio di riferimento (1981–2010) secondo gli standard dell'Organizzazione Meteorologica Mondiale [T. 2]. I dati meteorologici delle stazioni selezionate sono stati scaricati dalla banca dati dell'Ufficio federale di meteorologia e climatologia MeteoSvizzera tramite il portale IDAWEB (<https://gate.meteoswiss.ch/idaweb/login.do>). Successivamente, i dati di temperatura e precipitazione sono stati controllati e analizzati tramite il programma di elaborazione climatica RCLimDex (Zhang e Yang 2004) e sono stati omogeneizzati con la tecnica HOMER (*HOMologization softwarE in R*, vedi Venema et al. 2012), eliminando eventuali errori di fondo non dovuti a variazioni climatiche, al fine di ottenere un inquadramento climatico generale dell'area di studio.

Monitoraggio della temperatura della superficie del suolo

Il monitoraggio della temperatura della superficie del suolo o GSTM (*Ground Surface Temperature Monitoring*) consiste nella registrazione a intervalli regolari della temperatura tramite dei piccoli sensori autonomi (mini-logger). Questa procedura permette di ottenere delle informazioni sullo stato termico della superficie del suolo, che riflette in parte quello del sottosuolo, ad alta risoluzione temporale e a lungo termine. In particolare, si studiano l'evoluzione invernale della temperatura del suolo e l'influenza della stagione estiva sul regime termico del terreno, vale a dire sulla ripartizione della temperatura in funzione delle stagioni (Scapozza 2009). I siti di monitoraggio sono equipaggiati da mini-logger del tipo UTL-3 (Universal Temperature Logger, Geotest AG, per maggiori informazioni si veda <http://www.utl.ch/>) con una precisione di misura di $\pm 0,1^\circ\text{C}$ e una scheda di memoria che permette

F.1

Localizzazione dei sette ghiacciai rocciosi delle Alpi Ticinesi monitorati dalla SUPSI



○ Ghiacciaio roccioso ☆ Stazione meteorologica

Avvertenza: per le caratteristiche di ogni sito, v. la tabella [T. 1].
Fonte della base cartografica: ©swisstopo, Wabern

T.1

Caratteristiche dei sette ghiacciai rocciosi monitorati¹ dalla SUPSI

| No. | Sito | Regione | Altitudine [m s.l.m.] | Esp. | GSTM ² (No. logger) | DGPS ³ (No. misure) |
|-----|-----------------------|-----------------|-----------------------|------|--------------------------------|--------------------------------|
| 29 | Pizzo Nero | Val Bedretto | 2.600–2.700 | S | – | Quinquennale |
| 29b | Pizzo Gallina | Val Bedretto | 2.660–2.760 | SE | 4 | Annuale |
| 30 | Passo di Grandinaglia | Val Bavona | 2.560–2.800 | NE | 4 | Biennale |
| 31 | Ganoni di Schenadüi | Val Cadlimo | 2.480–2.640 | N | 4 | Annuale |
| 32 | Piancabella | Val Malvaglia | 2.440–2.550 | NE | 10 | Annuale |
| 33 | Stabbio di Largario | Val Soi | 2.240–2.550 | N | 4 | Annuale |
| 33b | Alpe Pièi | Valle di Blenio | 2.340–2.500 | S | – | Triennale |

Avvertenza: il No. fa riferimento a una classificazione a scala nazionale operata da Delaloye et al. (2010).

¹ Per la localizzazione, v. la figura [F. 1].

² Ground Surface Temperature Monitoring [monitoraggio della temperatura della superficie del suolo].

³ Differential Global Positioning System [GPS differenziale].

Fonte: IST-SUPSI, Canobbio

di acquisire fino a 65.000 misure di temperatura. Programmati con un intervallo di misura di due ore, sono stati piazzati a una profondità variabile da 10 a 50 cm, secondo le caratteristiche del terreno, per proteggerli dall'irradiazione solare. I dati sono presentati sia sotto forma di medie giornaliere, sia sotto forma di temperature medie annue della superficie del suolo (di seguito MAGST, per *Mean Annual Ground Sur-*

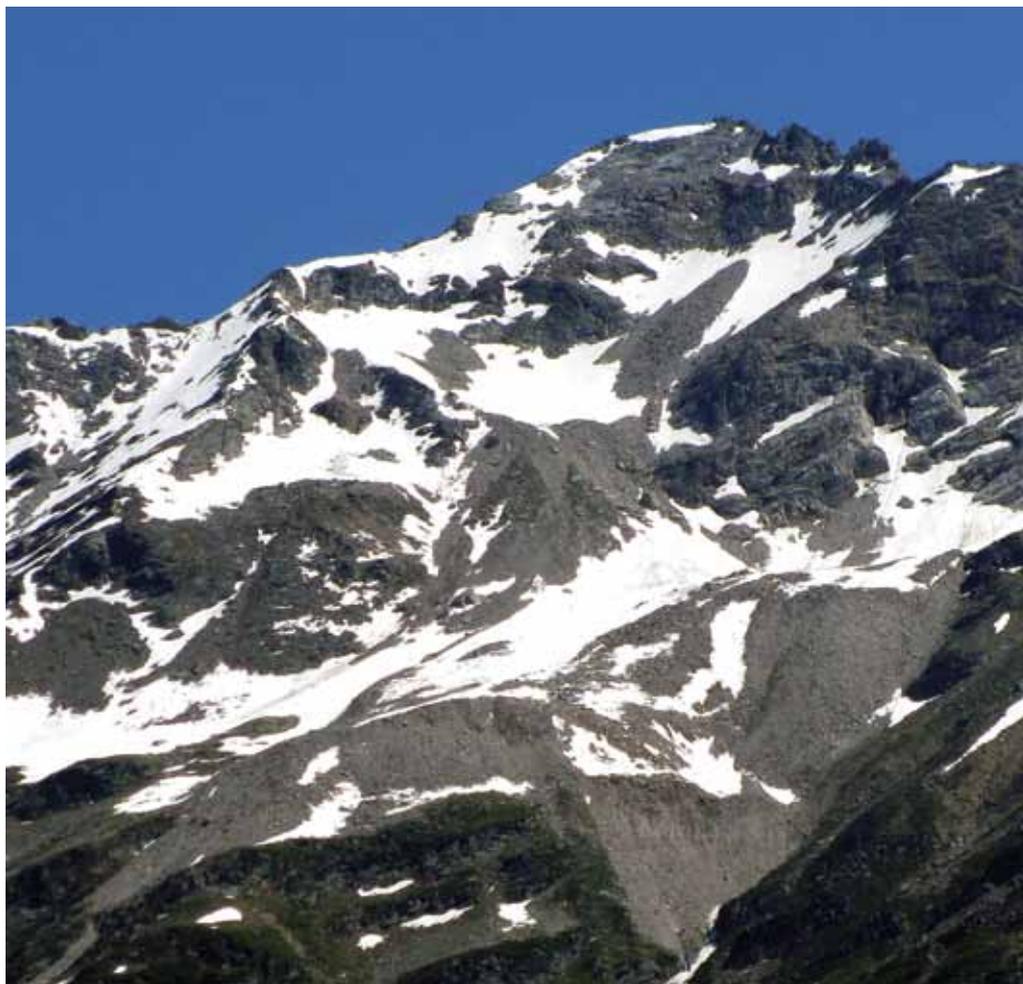


Foto:
Il ghiacciaio roccioso di
Stabbio di Largario. © C.
Scapozza, 29.05.2013.

face Temperature), ottenute mediante una media mobile semplice (*Simple Moving Average*) delle temperature medie giornaliere su 365 giorni (366 per gli anni bisestili).

GPS differenziale

La tecnica del GPS differenziale o DGPS (*Differential Global Positioning System*) permette di misurare la posizione tridimensionale di un punto posto sulla superficie terrestre con una precisione di alcuni centimetri. Essa è basata sull'utilizzo in simultanea di due antenne: un'antenna di referenza fissa (denominata *reference antenna*) e un'antenna di misura, collocata sull'oggetto di cui si vuole misurare lo spostamento, che consente l'acquisizione dei dati di posizionamento (denominata *rover antenna*). Collocando l'antenna di riferimento in un punto fisso di coordinate conosciute, è possibile compiere una correzione in tempo reale delle coordinate misurate dall'antenna di misura (tecnica del *real-time kinematics GPS*). L'antenna di misura è collegata all'antenna di referenza da un segnale radio. La precisione dei punti rilevati grazie a questa tecnica è variabile da 1 a 5 centimetri. Sui ghiacciai rocciosi monitorati, sono misurati a cadenza regolare gli spostamenti di una trentina di blocchi (da 25 a 35 secondo il sito), distribuiti uniformemente sull'intera superficie del ghiacciaio roccioso in questione. Gli spostamenti orizzontali (in cm) sono poi convertiti in velocità orizzontali

T. 2
Caratteristiche delle stazioni meteorologiche utilizzate¹

| Stazione meteorologica | Altitudine [m s.l.m.] | Coordinata X | Coordinata Y | Cantone | Temperatura media annua [°C] | Precipitazioni [mm/a] |
|------------------------|-----------------------|--------------|--------------|---------|------------------------------|-----------------------|
| Airolo | 1.139 | 688.914 | 153.412 | TI | – | 1.674 |
| Bosco Gurin | 1.505 | 680.871 | 130.014 | TI | 5,4 | 1.922 |
| Braggio | 1.315 | 729.974 | 128.585 | GR | – | 1.671 |
| Camedo | 590 | 690.295 | 112.205 | TI | – | 2.311 |
| Cimetta | 1.661 | 704.434 | 117.466 | TI | 5,4 | 1.713 |
| Comprovasco | 575 | 714.990 | 146.442 | TI | 10,4 | 1.273 |
| Faido | 760 | 704.948 | 148.750 | TI | – | 1.426 |
| Locarno Monti | 367 | 704.166 | 114.342 | TI | 12,3 | 1.862 |
| Lugano | 273 | 717.870 | 095.877 | TI | 12,5 | 1.557 |
| Matro | 2.171 | 714.262 | 140.930 | TI | 2,3 | – |
| Mesocco | 830 | 737.853 | 139.817 | GR | – | 1.513 |
| Mosogno | 760 | 692.796 | 117.060 | TI | – | 2.049 |
| Olivone | 905 | 715.445 | 153.863 | TI | – | 1.435 |
| Piotta | 990 | 695.881 | 152.253 | TI | 7,8 | 1.474 |
| Robièi | 1.896 | 682.583 | 144.088 | TI | 3,3 | 2.363 |
| Sonogno | 925 | 703.635 | 134.037 | TI | – | 2.018 |

Avvertenza: le coordinate sono espresse secondo il sistema metrico svizzero CH1903.

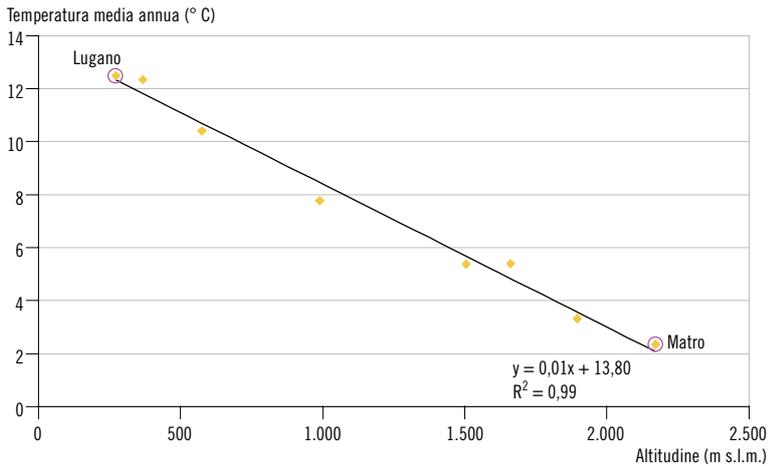
¹ Queste stazioni hanno fornito i dati utilizzati per le analisi presentati nelle figure [F. 2 e F. 3].

Fonte dei dati: ©MeteoSvizzera, Zurigo

di superficie (in cm/a) per confrontare i siti tra loro e con altri siti di riferimento. Dai due ai tre punti di controllo collocati in punti ritenuti fissi (affioramenti rocciosi) permettono di verificare la qualità dei dati di spostamento acquisiti. In questo studio, le misurazioni DGPS sono state compiute con un ricevitore GPS Leica SR530.

F. 2

Temperature medie annue (in °C) in funzione dell'altitudine (in m s.l.m.) e rispettivo gradiente altimetrico, nelle Alpi Ticinesi



Avvertenza: i dati utilizzati per il calcolo sono presentati nella tabella [T. 2].
Fonte: IST-SUPSI, Canobbio e Università degli Studi di Torino

Risultati e interpretazione

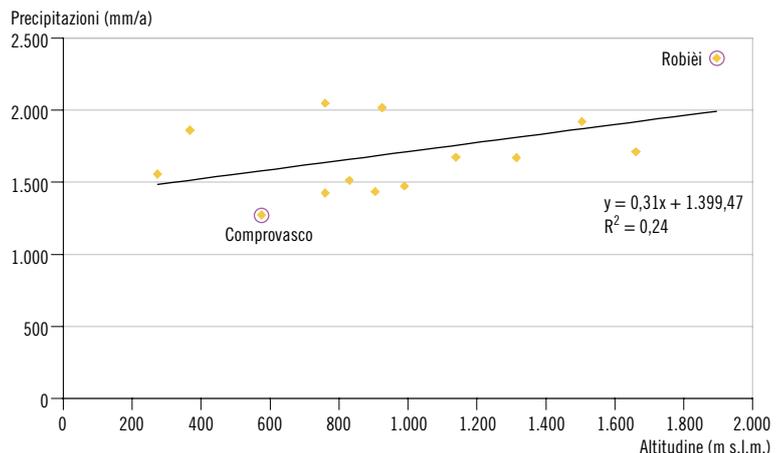
Analisi climatica

Le norme trentennali 1981–2010 (vale a dire la media del periodo di riferimento omogeneizzata, sulla quale sono state operate delle correzioni dovute ai cambiamenti di apparecchi di misura) sono riportate nella tabella [T. 2]. La temperatura media annua (di seguito MAAT, per *Mean Annual Air Temperature*) è compresa tra un minimo di 2,3°C alla sommità del Matro (2.171 m slm) e un massimo di 12,5°C a Lugano (273 m slm). È stato calcolato il gradiente altimetrico di tale parametro ed è emerso che le temperature diminuiscono in maniera significativa (la correlazione tra temperatura e altitudine è superiore al 99%) di 0,5°C ogni 100 m di altitudine [F. 2]. Tenendo conto di questo gradiente di temperatura con l'altitudine, nelle Alpi Ticinesi le isoterme di 0, -1 e -2 °C si situano rispettivamente a 2.540, 2.720 e 2.900 m slm.

Le precipitazioni medie annue (di seguito MAP, per *Mean Annual Precipitation*) sono comprese tra un minimo di 1.273 millimetri all'anno (da qui: mm/a) Comprovasco (575 m slm), in Valle di Blenio, e un massimo di 2.363 mm a Robièi (1.896 m slm), in Val Bavona. Anche per questo parametro è stato calcolato il gradiente altitudinale che, tuttavia, è poco significativo (la correlazione tra precipitazioni e altitudine è di poco inferiore al 50%). L'incremento calcolato è di 0,31 mm/m, ma con un coefficiente di correlazione (R) tra precipitazioni e altitudine di 0,49, ciò che determina il coefficiente di determinazione (R²) di 0,24 riportato nella figura [F. 3]. Tenendo conto di questo gradiente, seppure poco significativo, la MAP a 2.540, 2.720 e 2.900 m slm (ovvero le altitudini delle isoterme 0, -1 e -2 °C calcolate sopra) corrisponderebbe rispettivamente a circa 2.190, 2.240 e 2.470 mm/a. Le precipitazioni, più che dall'altitudine sono influenzate dalla conforma-

F. 3

Precipitazioni medie annue (in mm/a) in funzione dell'altitudine (in m slm) e rispettivo gradiente altimetrico, nelle Alpi Ticinesi

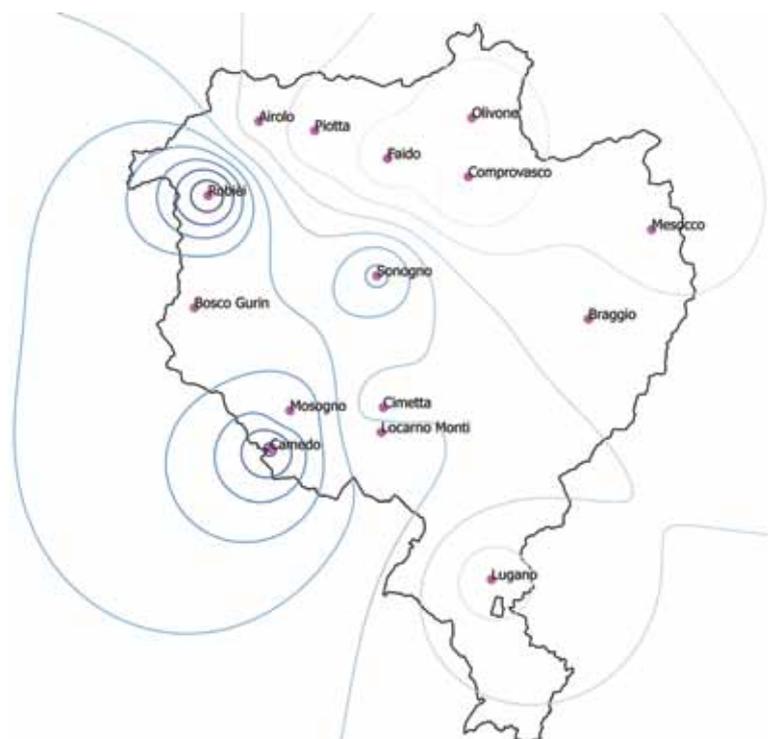


Avvertenza: i dati utilizzati per il calcolo sono presentati nella tabella [T. 2]. Non si è tenuto conto di Camedo, il cui valore divergeva dalla tendenza evidenziata dalle altre stazioni meteorologiche.
Fonte: IST-SUPSI, Canobbio e Università degli Studi di Torino

zione orografica del territorio ticinese e dalla relativa circolazione delle masse d'aria (Spinedi e Isotta 2004). Tramite un'interpolazione spaziale dei dati pluviometrici ottenuti, è stato osservato che esiste una differenza notevole di MAP tra le Alpi Ticinesi occidentali e orientali (separate dal corso del fiume Ticino tra Airole e Bellinzona), come si può osservare nella carta delle isoiete, vale a dire le curve chiuse che delimitano aree interessate dalle stesse quantità di precipitazioni [F. 4]. Nelle Alpi Ticinesi occidentali, soprattutto vicino al confine italiano, si registrano i valori di precipitazione più elevati (stazioni meteorologiche di Robièi e Camedo, con MAP superiore a 2.300 mm/a). Forti quantitativi di precipitazioni si osservano, procedendo verso est, fino Sonogno (2.000 mm/a), mentre diminuiscono nel settore più settentrionale della Valle Leventina (circa 1.700 mm/a). Le quantità più basse si re-

F. 4

Ripartizione delle precipitazioni nelle Alpi Ticinesi (in mm/a)



Isoiete (mm)

| | | | | |
|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| 1.300 - 1.400 | 1.400 - 1.500 | 1.500 - 1.600 | 1.600 - 1.700 | 1.700 - 1.800 |
| 1.800 - 1.900 | 1.900 - 2.000 | 2.000 - 2.100 | 2.100 - 2.200 | 2.200 - 2.300 |

Stazioni pluviometriche



Avvertenza: I valori sono ottenuti per interpolazione della media delle precipitazioni medie annue registrate nel periodo 1981–2010 dalle principali stazioni meteorologiche delle Alpi Ticinesi. I dati utilizzati per il calcolo sono presentati nella tabella [T. 2].

Fonte: IST-SUPSI, Canobbio e Università degli Studi di Torino

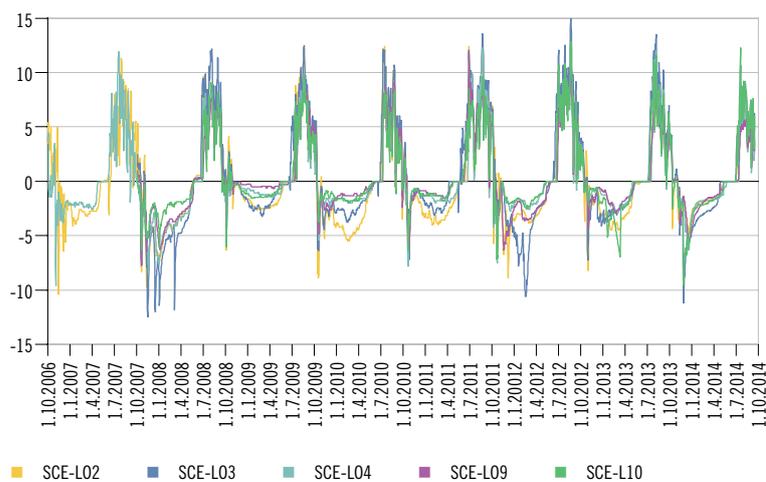
gistrano nel cuore delle Alpi Ticinesi orientali, in Valle di Blenio (Comprovasco, 1.273 mm/a), dove l'orientamento della valle lungo l'asse nord-sud la protegge dall'influenza delle correnti provenienti da sud-ovest, che generano le precipitazioni più importanti al Sud delle Alpi Svizzere (Spinedi e Isotta 2004). Tale distribuzione delle precipitazioni è in linea con quanto riportato nel recente rapporto sul clima del Cantone Ticino (MeteoSvizzera 2012).

Monitoraggio della temperatura della superficie del suolo

I dati di GST (*Ground Surface Temperature*, ovvero la temperatura della superficie del suolo) per le Alpi Ticinesi sono disponibili dal 1° ottobre 2006 per il ghiacciaio roccioso di Piancabella e l'adiacente falda di detrito di Gana Rossa, mentre la maggior parte degli altri siti è equipaggiata di sensori di temperatura dal 1° ottobre 2009 (ad eccezione del ghiacciaio roccioso di Stabbio di Largario, che è stato equipaggiato il 1° ottobre 2011). Grazie alle misure di temperatura effettuate a intervallo biorario, è possibile calcolare la media giornaliera di GST, come riportato per il ghiacciaio roccioso di Piancabella

F. 5

Temperatura della superficie del suolo (GST, Ground Surface Temperature) per cinque sensori autonomi di temperatura posizionati sul ghiacciaio roccioso di Piancabella (in °C)

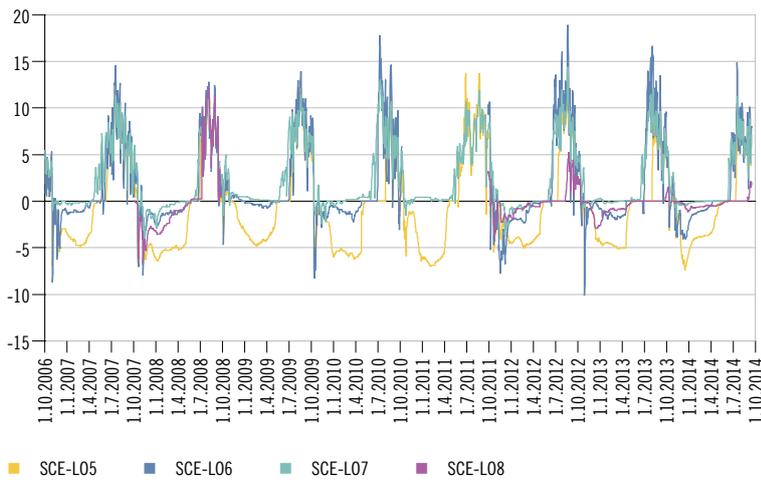


Avvertenza: per le caratteristiche di ogni sensore di temperatura, v. la tabella [T. 3].
Fonte: IST-SUPSI, PERMOS, Canobbio

[F. 5] e l'adiacente falda di detrito di Gana Rossa [F. 6], entrambi situati in alta Val Malvaglia (localizzazione dei sensori di temperatura nella tabella [T. 3]).

F.6

Temperatura della superficie del suolo (GST, Ground Surface Temperature) per quattro sensori autonomi di temperatura posizionati sulla falda di detrito di Gana Rossa (in °C)



Avvertenza: per le caratteristiche di ogni sensore di temperatura, v. la tabella [T. 3].
Fonte: IST-SUPSI, PERMOS, Canobbio

L'andamento delle temperature medie giornaliere permette di notare la differenza di regime termico tra il ghiacciaio roccioso di Piancabella e la falda di detrito di Gana Rossa. Nel primo caso [F. 5], le temperature di tutti i sensori di temperatura sono simili e presentano un andamento grosso modo parallelo, indicando che il regime termico è essenzialmente di tipo conduttivo/convettivo (vale a dire che la trasmissione di calore è operata tramite i blocchi di roccia stessi o tramite il ghiaccio e la neve che si trova tra gli interstizi), come è il caso per la maggior parte dei ghiacciai rocciosi con un contenuto relativamente importante di ghiaccio. Differenze locali sono presenti a causa della differenza di altitudine, di innevamento e di caratteristiche della superficie del suolo (presenza di più grossi blocchi per i sensori più freddi) per ogni sensore.

Sulla falda di detrito di Gana Rossa, al contrario [F. 6], si assiste a comportamenti opposti nell'andamento delle temperature, come si nota dalle differenze fra i dati registrati dal sensore più freddo (SCE-L05), che si situa nella parte inferiore della falda di detrito, e quelli della parte superiore (sensore SCE-L07), dove si hanno le temperature di gran lunga più elevate, addirittura positive per l'insieme dell'inverno 2010/2011. Questo testimonia un regime termico avvertivo, dovuto a una circolazione invernale d'aria ascendente per effetto camino (*chimney effect*): in altre parole, durante l'inverno l'aria all'interno della falda di detrito è più calda dell'aria esterna, e tende quindi a risalire poiché è meno densa. Questo provoca un raffreddamento della parte inferiore della falda di detrito con un conseguente riscaldamento della parte superiore, dove l'espulsione di aria relativamente calda può addirittura provocare delle finestre di fusione del manto nevoso (per maggiori dettagli, vedi Scapozza 2009 e Scapozza et al. 2011).

T.3

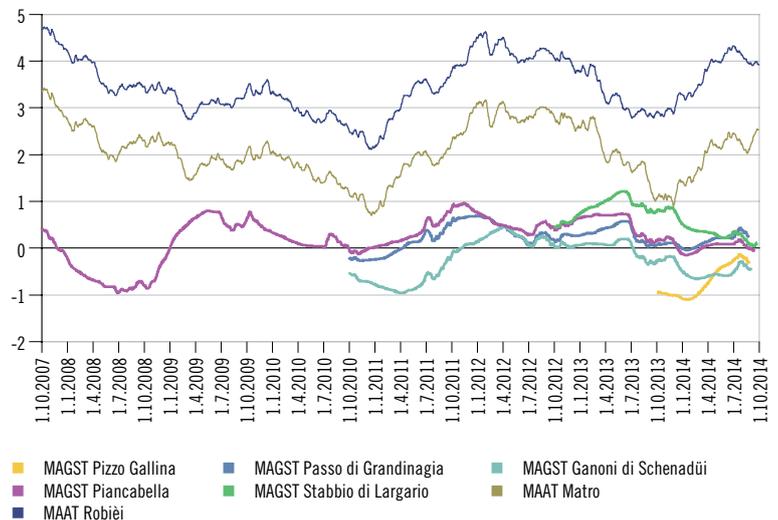
Caratteristiche dei nove sensori autonomi di temperatura sul ghiacciaio roccioso di Piancabella (PB) e sulla falda di detrito di Gana Rossa (GR)

| Sensore | Localizzazione | Coordinata X | Coordinata Y | Altitudine [m s.l.m.] |
|---------|--|--------------|--------------|-----------------------|
| SCE-L02 | Parte frontale del ghiacciaio roccioso di PB | 720.154 | 145.630 | 2.482 |
| SCE-L03 | Corpo del ghiacciaio roccioso di PB | 720.133 | 145.575 | 2.504 |
| SCE-L04 | Zona radicale del ghiacciaio roccioso di PB | 720.060 | 145.449 | 2.569 |
| SCE-L05 | Parte inferiore della falda di detrito di GR | 720.064 | 145.655 | 2.473 |
| SCE-L06 | Parte centrale della falda di detrito di GR | 719.986 | 145.653 | 2.516 |
| SCE-L07 | Parte superiore della falda di detrito di GR | 719.936 | 145.631 | 2.547 |
| SCE-L08 | Parte distale della falda di detrito di GR | 720.129 | 145.671 | 2.460 |
| SCE-L09 | Corpo del ghiacciaio roccioso di PB | 720.173 | 145.613 | 2.480 |
| SCE-L10 | Zona radicale del ghiacciaio roccioso di PB | 720.083 | 145.507 | 2.530 |

Avvertenza: le coordinate sono espresse secondo il sistema metrico svizzero CH1903.
Fonte dei dati: ©IST-SUPSI

F.7

Evoluzione delle temperature medie annue della superficie del suolo (MAGST, Mean Annual Ground Surface Temperature) per i ghiacciai rocciosi delle Alpi Ticinesi monitorati dalla SUPSI (in °C)



Avvertenza: per le caratteristiche di ogni sito, v. la tabella [T. 1].
Fonte: IST-SUPSI, PERMOS, Canobbio

Foto:
Il ghiacciaio roccioso dei
Ganoni di Schenadüi.
© C. Scapozza, 03.10.2009.

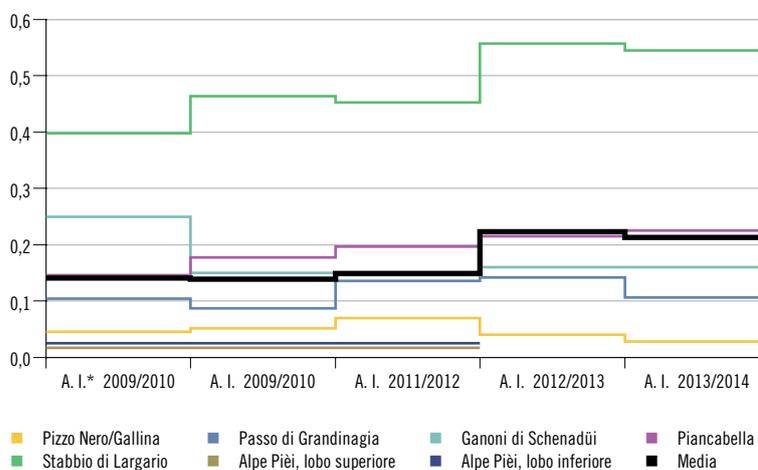


L'andamento di MAGST permette di evidenziare le tendenze stagionali di regime termico del permafrost [F. 7]. La serie di dati disponibili indica un raffreddamento durante l'inverno 2007/2008 che si protrae fino all'estate del 2008, e che permette un riequilibrio delle temperature del suolo a seguito dell'inverno 2006/2007, eccezionalmente caldo. Assistiamo in seguito a un nuovo riscaldamento di MAGST durante l'inverno 2008/2009 e la primavera-estate del 2009, dovuto essenzialmente all'innervamento precoce e abbondante dell'inverno 2008/2009 e all'estate 2009 particolarmente calda. L'inverno 2009/2010 è stato più freddo, e ha permesso un parziale assestamento di MAGST che si è protratto fino all'inizio della primavera 2011, per poi riscaldarsi di nuovo a seguito della primavera eccezionalmente calda che ha causato una rapida fusione della neve con la conseguenza di anticipare la trasmissione di calore al suolo e nel sottosuolo. A seguito dell'estate e autunno 2011 molto caldi, MAGST presenta un importante riscaldamento su tutti i siti monitorati, per riequilibrarsi poi durante l'inverno 2011/2012 che, malgrado sia stato relativamente mite fino a fine gennaio 2012, al Sud delle Alpi è stato poco innevato. Al raffreddamento del suolo dovuto allo scarso innevamento si è poi sovrapposta, durante febbraio, una massiccia ondata di freddo. L'effetto combinato della primavera, estate e autunno 2012 caldi e soleggiati (con l'autunno particolarmente caldo in montagna) ha causato un nuovo riscaldamento di MAGST, variabile secondo il sito di monitoraggio. L'inverno 2012/2013 è stato caratterizzato da temperature fredde nelle Alpi e da precipitazioni nevose scarse al Sud delle Alpi. MAGST ha quindi potuto raffreddarsi a causa del ridotto effetto isolante da parte della coltre nevosa poco spessa, per poi riprendere a riscaldarsi durante l'inverno 2013/2014 e la primavera 2014.

GPS differenziale

Gli spostamenti dei ghiacciai rocciosi monitorati sono espressi in velocità di superficie (poiché non si dispone di dati in profondità) orizzontali, in maniera da limitare l'influenza

F. 8
Velocità orizzontali dei ghiacciai rocciosi delle Alpi Ticinesi monitorati dalla SUPSI (in m/a)

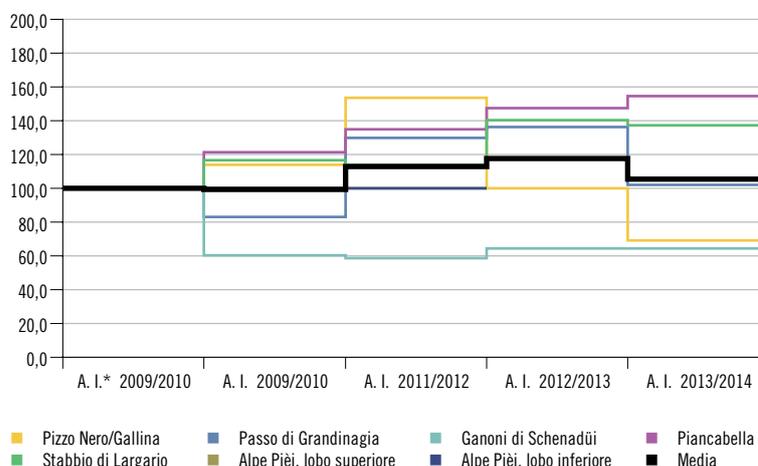


* Anno idrologico

Avvertenza: per le caratteristiche di ogni sito, v. la tabella [T. 1].

Fonte: IST-SUPSI, PERMOS, Canobbio

F. 9
Velocità relative dei ghiacciai rocciosi delle Alpi Ticinesi monitorati dalla SUPSI (in %)



* Anno idrologico

Avvertenza: per le caratteristiche di ogni sito, v. la tabella [T. 1].

Fonte: IST-SUPSI, PERMOS, Canobbio



Foto:
Il ghiacciaio roccioso
di Piancabella . © C.
Scapozza, 31.07.2013.

della pendenza del versante sullo spostamento totale misurato. Queste mostrano per quattro ghiacciai rocciosi (Stabbio di Largario, Piancabella, Ganoni di Schenadüi e Passo di Grandinagia) un aumento delle velocità di spostamento dal 2010 al 2014 [F. 8], che si ripercuote sul valore medio di tutti i ghiacciai rocciosi. Allo scopo di normalizzare i valori di velocità media, è stata calcolata la variazione orizzontale di superficie relativa, espressa in percentuale di variazione di velocità [F. 9]. Da velocità costanti durante gli anni 2009/2010 e 2010/2011, si assiste a un'importante accelerazione nel 2011/2012 (compresa fra +30 e +53% per i ghiacciai rocciosi più veloci), seguita da una diminuzione di velocità meno marcata nel 2012/2013. Il record di aumento di velocità è toccato per la maggior parte dei siti nel 2012/2014 (+17% in media), con valori massimi compresi tra +36 e +40% rispetto al 2009 per i ghiacciai rocciosi di Stabbio di Largario e del Passo di Grandinagia. Per il sito di Piancabella il record assoluto è raggiunto nel 2013/2014, con un aumento di velocità del 55% rispetto all'inizio delle misurazioni.

Dal confronto tra l'evoluzione della temperatura della superficie del suolo [F. 7] e la variazione relativa di velocità dei ghiacciai rocciosi [F. 9], è evidente come i movimenti dei ghiacciai rocciosi monitorati siano significativamente correlati con le variazioni di MAGST, con un ritardo di alcuni mesi. L'accelerazione delle velocità dal 2010/2011 al 2011/2012 è quindi molto probabilmente legata all'importante riscaldamento di GST durante l'estate e l'autunno del 2011. Lo stesso si può dire per la leggera decelerazione avvenuta tra il 2011/2012 e il 2012/2013, parallela a un raffreddamento significativo di GST. A seguito delle abbondanti nevicate dell'inverno 2013/2014, le grandi quantità di acqua di fusione della neve durante l'inizio dell'estate hanno causato un'accelerazione dei ghiacciai rocciosi, con valori di velocità e temperatura del suolo che, nel resto delle Alpi Svizzere, non si registravano dall'estate canicolare del 2003. Tenendo conto che il comportamento dei ghiacciai rocciosi delle Alpi Ticinesi è simile a quanto avvenuto

Bibliografia

- Acquaotta, Fiorella; Fratianni, Simona e Garzena, Diego. (2014). Temperature change in the northwestern Italian Alps from 1961 to 2010. *Theoretical and Applied Climatology*. doi:10.1007/s00704-014-1316-7. Vienna: Springer. Disponibile in: <http://link.springer.com/article/10.1007/s00704-014-1316-7> (31.07.2015).
- Delaloye, Reynald; Lambiel, Christophe e Roer, Isabelle. (2010). Overview of rock glacier kinematics research in the Swiss Alps. Seasonal rhythm, interannual variations and trends over several decades. *Geographica Helvetica* 65. 135-145. Zurich: Geographic and Ethnological Society. Disponibile in: <http://geogr-helv.net/65/135/2010/gh-65-135-2010.pdf> (29.07.2015).
- Faletto, Mattia; Prola, Maria Cristina; Acquaotta, Fiorella; Fratianni, Simona e Terzago, Silvia. (2013). *La neve sulle Alpi Piemontesi. Quadro conoscitivo aggiornato al cinquantennio 1961-2010*. Torino: Arpa Piemonte.
- Giaccone, Elisa; Colombo, Nicola; Acquaotta, Fiorella; Paro, Luca e Fratianni, Simona. (2015). Climate variations in a high altitude Alpine basin and their effects on a glacial environment (Italian Western Alps). *Atmosfera* 28(2). 117-128. México D.F.: Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Ciencias de la Atmósfera. Disponibile in: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0187623615300047> (31.07.2015).
- Mari, Stefano; Scapozza, Cristian; Delaloye, Reynald e Lambiel, Christophe. (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. Lugano: Società ticinese di Scienze naturali. Disponibile in: <http://repository.supsi.ch/2147> (29.07.2015).
- MeteoSvizzera. (2012). Rapporto sul clima – Cantone Ticino. *Rapporto di lavoro MeteoSvizzera* 63. Locarno Monti: Istituto federale di meteorologia e climatologia MeteoSvizzera. Disponibile in: http://www4.ti.ch/fileadmin/DT/temi/aria/clima/01_Rapporto_clima_Ticino.pdf (29.07.2015).
- PERMOS. (2013). Permafrost in Switzerland 2008/2009 and 2009/2010. *Glaciological Report Permafrost 10/11*. Bern: Cryospheric Commission of the Swiss Academy of Sciences. Disponibile in: <http://www.permos.ch/downloads/permos08-10.pdf> (29.07.2015).
- Scapozza, Cristian. (2009). Contributo dei metodi termici alla prospezione del permafrost montano: esempi dal massiccio della Cima di Gana Bianca (Val Blenio, Svizzera). *Bollettino della Società ticinese di Scienze naturali* 97. 55-66. Lugano: Società ticinese di Scienze naturali. Disponibile in: <http://repository.supsi.ch/3145/> (29.07.2015).

Foto:
Il ghiacciaio roccioso
dell'Alpe Pièi. © C.
Scapoza, 09.09.2012.



nel resto delle Alpi svizzere nello stesso periodo (Scapoza et al. 2014b), questo indica quindi un legame significativo tra l'aumento di plasticità del ghiaccio del permafrost (che si deforma più facilmente più la sua temperatura si avvicina a 0°C), responsabile dell'accelerazione delle velocità orizzontali di superficie dei ghiacciai rocciosi, e l'aumento di temperatura registrato nelle Alpi dalla fine degli anni '80 del Novecento (Scapoza et al. 2014a).

Ringraziamenti

L'acquisizione dei dati è stata possibile grazie all'aiuto finanziario della rete svizzera di monitoraggio del permafrost PERMOS, del Museo cantonale di storia naturale di Lugano, dell'Istituto di geografia dell'Università di Losanna (Dr. Christophe Lambiel), del Dipartimento di Geoscienze dell'Università di Friburgo (Prof. Reynald Delaloye) e della "Fondazione Avv. Dott. Angelo Berla, console generale, e Teresita Berla nata Veglio". Un ringraziamento particolare a tutti coloro che hanno fornito il loro contributo nell'acquisizione dei dati sul terreno e alle Officine Idroelettriche della Maggia SA (Ofima) per il supporto logistico alle misurazioni compiute al Passo di Grandinaglia.

Scapoza, Cristian e Fontana, Georgia. (2009). Le Alpi Bleniesi. Storia glaciale e periglaciale e patrimonio geomorfologico. *Memorie della Società ticinese di Scienze naturali e del Museo cantonale di storia naturale, Lugano* 10. 1-111. Lugano: Società ticinese di Scienze naturali e Museo cantonale di storia naturale.

Scapoza, Cristian e Mari, Stefano. (2010). Catasto, caratteristiche e dinamica dei rock glacier delle Alpi Ticinesi. *Bollettino della Società ticinese di Scienze naturali* 98. 15-29. Lugano: Società ticinese di Scienze naturali. Disponibile in: <http://repository.supsi.ch/2152/> (29.07.2015).

Scapoza, Cristian; Lambiel, Christophe; Gex, Pierre e Reynard, Emmanuel. (2011). Prospection géophysique multi-méthodes du pergélisol alpin dans le Sud des Alpes Suisses. *Géomorphologie : relief, processus, environnement* 1/2011. 15-32. Paris: Groupe Français de Géomorphologie. Disponibile in: <http://geomorphologie.revues.org/8765> (29.07.2015).

Scapoza, Cristian; Lambiel, Christophe; Bozzini, Claudio; Mari, Stefano e Conedera, Marco. (2014a). Assessing the rock glacier kinematics on three different timescales: a case study from the southern Swiss Alps. *Earth Surface Processes and Landforms* 39. 2056-2069. London: British Society for Geomorphology. Disponibile in: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/esp.3599/abstract> (06.08.2015).

Scapoza, Cristian; Mari, Stefano; Antognini, Marco; Lepori, Vittorio e Ambrosi, Christian. (2014b). 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. Lugano: Società ticinese di Scienze naturali. Disponibile in: <http://repository.supsi.ch/5420/> (29.07.2015).

Spinedi, Fosco e Isotta, Francesco. (2004). Il clima del Ticino negli ultimi 50 anni. *Dati – Statistiche e socwZietà* 2/2004. 4-39. Bellinzona: Ufficio di statistica della Repubblica e Cantone Ticino. Disponibile in: http://www3.ti.ch/DFE/DR/USTAT/allegati/articolo/1138dss_2004-2_1.pdf (29.07.2015).

Terzago, Silvia; Fratianni, Simona e Cremonini, Roberto. (2010). Winter precipitation in western Italian Alps (1926-2010): Trends and connections with the North Atlantic/Arctic Oscillation. *Meteorology and Atmospheric Physics* 119. 125-136. Vienna: Springer. Disponibile in: <http://link.springer.com/article/10.1007%2Fs00703-012-0231-7> (06.08.2015).

Venema, Victor; Mestre, Olivier; Aguilar, Enric; et al. (2012). Benchmarking homogenization algorithms for monthly data. *Climate of the Past* 8. 89-115. Göttingen: Copernicus. Disponibile in: <http://www.clim-past.net/8/89/2012/> (29.07.2015).

Zhang, Xuebin e Yang, Feng. (2004). *RClimDex (1.0). User Manual*. Downsview (ON): Climate Research Branch, Environment Canada. Disponibile in: <http://etccdi.pacificclimate.org/RClimDex/RClimDexUserManual.doc> (29.07.2015).