

REALIZZAZIONE DI MAPPE DI INNEVAMENTO

SNOW

Matteo Dall'Amico
MobyGIS Srl, Trento
matteo@mobygis.com

Filippo Zambon
Mountain-eering Srl, Bolzano

Anselmo Cagnati,
Andrea Crepaz
ARPAV, Servizio Neve
e Valanghe di Arabba, Arabba BL

Stefano Endrizzi
Università di Zurigo, Zurigo CH

La neve è una risorsa fondamentale in ambiente montano: oltre ad essere un'attrazione turistica per amanti degli sport invernali, contribuisce all'apporto idrico per la ricarica delle falde durante la fusione. Tuttavia, la neve può rappresentare anche un pericolo, ad esempio per il possibile distacco di valanghe, per gli ostacoli prodotti alla viabilità lungo le vie di comunicazione e per le piene improvvise in caso di rapido scioglimento nivale in momenti di rialzo termico. La quantificazione a scala regionale dell'altezza ed equivalente in acqua della neve, permette quindi di ottimizzare la gestione della neve nei settori turistico, energetico, idrologico e di protezione civile, ambiti strategici in ambienti montani.

Il presente articolo si prefigge di descrivere un innovativo sistema di monitoraggio della neve chiamato SnowMaps, che permette di stimare l'altezza della neve a scala regionale attraverso un approccio fisicamente basato. Viene proposto un caso di studio nel territorio montano della Regione del Veneto nonché un approfondimento sull'applicazione di tale strumento come supporto alla redazione del bollettino valanghe.

MAPS

**A SUPPORTO
DELLA PREVISIONE
VALANGHE**



LA MODELLAZIONE SPAZIALE DELLA NEVE

La modellazione spaziale della neve può essere eseguita attraverso due differenti modalità: approccio statistico e approccio fisicamente basato. Secondo l'approccio statistico, l'altezza della neve viene messa in correlazione con alcune caratteristiche territoriali esplicative, quali l'elevazione, la radiazione potenziale incidente, la temperatura media annua dell'aria ecc. (Stoffel et al., 2006, Foppa et al., 2005). Se la bontà della correlazione supera una soglia limite, la neve viene poi spazializzata lungo tali variabili esplicative.

Secondo l'approccio fisicamente basato, tipico dei modelli idrologici, l'altezza della neve viene calcolata in ogni punto del dominio risolvendo le equazioni di bilancio della massa, dell'energia e della quantità di moto. Le forzanti esterne sono rappresentate dai flussi energetici e di precipitazione e vengono determinate attraverso una distribuzione statistica nello spazio delle variabili meteorologiche (es. temperatura e umidità dell'aria, velocità e direzione del vento, radiazione e precipitazione), misurate nelle stazioni meteorologiche, tenendo conto delle caratteristiche topografiche (elevazione, pendenza, esposizione) del territorio in esame.

Rispetto all'approccio statistico, l'approccio fisicamente basato presenta alcuni vantaggi: a) viene mantenuta l'eterogeneità topografica del territorio, fondamentale in ambiente montano; b) le informazioni sulla neve vengono fornite in modo continuo nel tempo, anche in assenza di misure di neve (l'approccio statistico funziona solo in presenza di un numero di misure di neve adeguato); c) le stime vengono fornite da remoto, senza la necessità di organizzare apposite campagne di misura; d) oltre all'altezza della neve (HS), vengono calcolate anche la neve fresca caduta (HN) e l'equivalente in acqua della neve (SWE).

IL MODELLO SNOWMAPS

SnowMaps rappresenta un innovativo sistema di calcolo che, sfruttando la rete esistente di nivometri e stazioni meteo, permette di

calcolare da remoto l'altezza e l'equivalente in acqua della neve in tempo reale, sia a scala locale che regionale. SnowMaps sfrutta un approccio fisicamente basato, secondo il quale l'evoluzione della neve viene calcolata in ogni punto del dominio risolvendo le equazioni di bilancio della massa, dell'energia e della quantità di moto (Dall'Amico et al, 2011). SnowMaps è stato testato in via sperimentale nel corso della stagione invernale 2011-2012 in collaborazione con il Servizio Neve e valanghe di Arabba e poi applicato in via operativa nelle regioni Friuli-Venezia Giulia e Veneto nella stagione 2012-2013, con l'aggiunta del Trentino, dell'Alto Adige e della Lombardia nella stagione 2013-2014, raggiungendo un'estensione di circa 30.000 km² ed utilizzando i dati meteorologici provenienti giornalmente da più di 400 stazioni meteorologiche.

Il modello SnowMaps è composto da tre componenti principali: 1) il modulo di pre-processamento dei dati meteorologici; 2) la libreria Meteolo (Bavay and Egger, 2014), dedicata al processamento dei dati meteorologici (filtro, interpolazione temporale e spaziale); 3) il modello idrologico fisicamente basato GEOTop (Endrizzi et al., 2014) che calcola l'evoluzione del manto nevoso (accumulo, compattazione, fusione, densità, altezza, equivalente in acqua) attraverso un bilancio di massa e di energia.

Il modulo di pre-processamento

Il modulo di pre-processamento ha l'obiettivo di estrapolare, dalle misure delle stazioni meteo, delle variabili aggiuntive estremamente utili per il calcolo dei flussi energetici e di massa in ingresso a GEOTop. In particolare, il modulo si divide in due parti: 1) calcolo della nuvolosità (TAUcloud) e 2) il calcolo della precipitazione nevosa caduta durante un evento (HN2HNW).

TAUcloud

La misura della nuvolosità è estremamente importante per la stima dei flussi energetici, sia per il calcolo della radiazione ad onda corta (SW_{in}), in quanto le nuvole attenuano o annullano la componente diretta della radiazione, sia per il calcolo della radiazione ad onda lunga (LW_{in}), in quanto le nuvole agiscono come corpi emmissivi. Definendo

con SW_i ($W m^{-2}$) la radiazione ad onda corta incidente misurata da un piranometro e SW_t ($W m^{-2}$) la radiazione potenzialmente ottenibile in un dato istante di tempo in presenza di cielo completamente sereno, la trasmittività delle nuvole TAU_{ci} , (inverso della nuvolosità) viene calcolata dal rapporto tra SW_i ed SW_t . Essa viene successivamente trattata come una variabile meteorologica e spazializzata nel dominio di calcolo.

HN2HNW

La stima della precipitazione nevosa caduta in montagna è estremamente problematica, sia per la mancanza di una rete pluviometrica ad alta quota, sia per la difficoltà di misura della precipitazione nevosa (Larcher, 2009), sia per la presenza di gradienti con la quota (Sevruk, 1983). Il modulo HN2HNW si prefigge di stimare la precipitazione nevosa caduta in montagna (HN) sulla base dell'analisi del segnale misurato dal nivometro automatico (Comai, 2014). Tale valore viene successivamente moltiplicato per la densità della neve fresca (Jordan, 1999) stimata durante l'evento per determinare la precipitazione piovosa equivalente. In questo modo è possibile integrare le misure di precipitazione ottenute dai pluviometri in fondo valle con una stima della precipitazione in quota, fondamentale per riprodurre in modo corretto l'evoluzione della precipitazione nevosa in montagna.

Meteolo: interpolazione e spazializzazione delle forzanti

Meteolo (Bavay and Egger, 2014) è una libreria di calcolo sviluppata dall'Istituto Federale Svizzero per lo studio della neve e delle valanghe dedicata all'analisi dei dati meteorologici. In particolare, Meteolo permette di: a) filtrare i dati i dati meteo per verificarne la congruenza ed eliminare i dati eccedenti delle soglie pre-impostate; b) interpolare i dati nel tempo, al fine di estrapolare i dati tra due istanti di tempo ed eventualmente di operare un *gap filling* (riempimento dei buchi) dei dati mancanti; c) interpolare le variabili meteo nello spazio, secondo le preferenze di algoritmo specificate dall'utente (es. IDW, *kriging* etc.). In Fig. 1 viene riportata la spazializzazione della temperatura dell'aria (TA) secondo

l'algoritmo IDW con *lapse rate* (LR), ossia con correzione con la quota. In Fig. 2 viene riportata un esempio di spazializzazione della precipitazione (HNW) secondo l'algoritmo IDW senza *lapse rate*, dove si nota che la componente orografica non incide sulla mappa di precipitazione calcolata.

L'utilizzo in modalità tempo reale richiede una grande attenzione alla qualità dei dati meteorologici in ingresso. In particolare, è necessario impostare dei filtri automatici di verifica dei dati meteorologici, che permettano di segnalare malfunzionamenti della stazione e/o dati non fisicamente plausibili nei vari periodi dell'anno.

GEOtop: evoluzione del manto nevoso

GEOtop (Endrizzi et al., 2014) è un modello idrologico fisicamente basato in grado di determinare i flussi energetici e di infiltrazione nel suolo e le portate nei corsi d'acqua in un bacino idrografico.

Esso calcola i flussi turbolenti superficie-atmosfera, risolve l'equazione dell'energia nel suolo e nella neve determinando la temperatura della neve e del suolo, anche in presenza di cambiamento di fase dell'acqua, ed infine risolve l'equazione di Richards in 3D determinando il contenuto d'acqua nel suolo. Per quanto riguarda il modulo neve, esso calcola gli accumuli di neve fresca, i metamorfismi di compressione e la densità della neve.

Equazioni di conservazione

Le equazioni di conservazione della massa e dell'energia pongono in forma differenziale i principi generali di conservazione, secondo cui la somma della variazione nel tempo della quantità conservata (massa o energia), della divergenza dei flussi entranti nel sistema, più un eventuale termine sorgente si eguaglia a zero:

$$\int \frac{\partial R}{\partial t} dV + A(F_i - F_o) + \int S dV = 0 \quad (1)$$

V è il volume di controllo, R è la quantità conservata (massa o energia), F_i e F_o rappresentano i flussi entranti ed uscenti rispettivamente, A è la superficie del volume di controllo e S il termine sorgente.

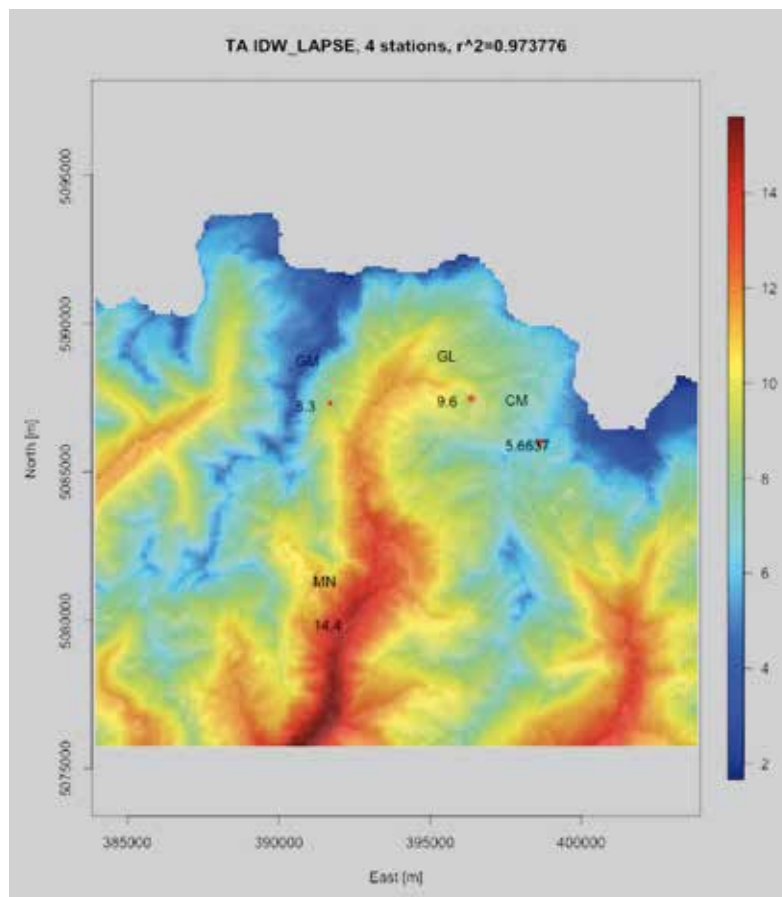


Fig. 1 - Spazializzazione della temperatura dell'aria (IDW-Lapse Rate).

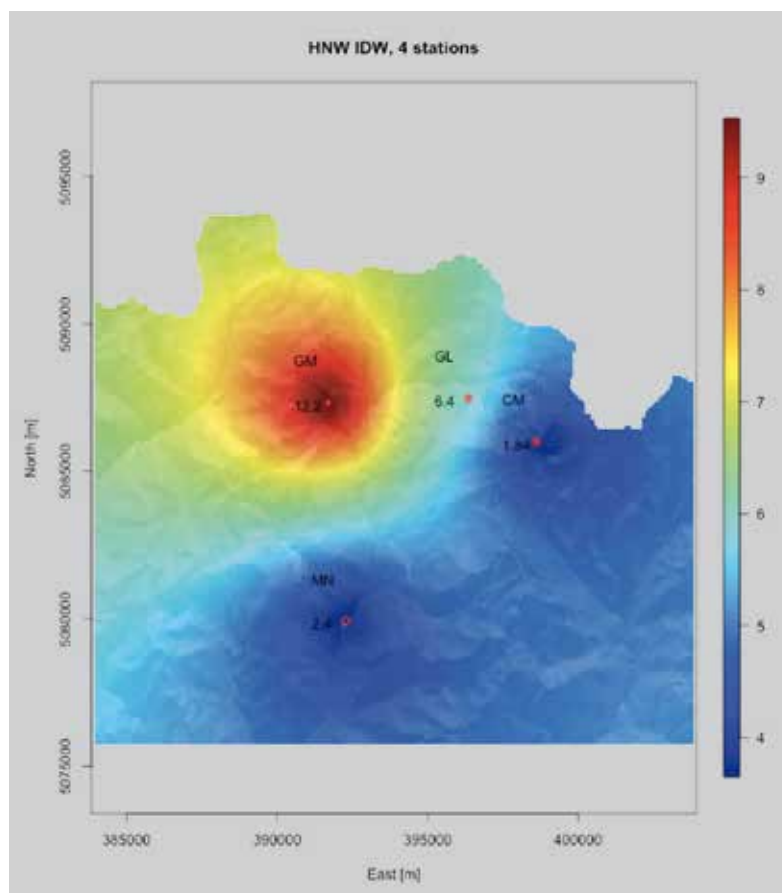


Fig. 2 - Spazializzazione della precipitazione (IDW).

I termini dell'eq. (1) per la neve vengono esplicitati nelle Tab. 1 e 2.

In termini pratici, l'equazione afferma che

è possibile determinare lo stato della neve in ogni punto (x,y) di calcolo nel tempo t^{n+1} se si conoscono: a) lo stato iniziale al tem-

po tⁿ, b) i flussi F entranti nel sistema che rappresentano le condizioni al contorno e 3) i termini sorgenti S .

Flussi radiativi e turbolenti

Il calcolo dei flussi radiativi e turbolenti tra l'atmosfera e la superficie della neve permette di determinare il bilancio superficiale (EB), ossia la condizione al contorno nell'equazione di conservazione dell'energia.

Esso viene calcolato in accordo a Endrizzi et al. (2014), tenendo conto del valore aggiornato dell'albedo della neve sulla base dell'età della neve in giorni e dell'eventuale caduta di neve fresca (Dickinson et al., 1993).

Accumulo di neve fresca (HN)

La precipitazione può cadere come solida o liquida a seconda delle condizioni termo-igrometriche locali. In generale si può scrivere:

$$HNW = P_r + P_s \quad (2)$$

dove P_r e P_s (mm s⁻¹) indicano la parte

di precipitazione che si stima cada come pioggia e neve rispettivamente nell'unità di tempo. La stima viene fatta a seconda della temperatura a bulbo secco o a bulbo umido dell'aria, impostando due soglie: T_1 , temperatura sotto la quale la precipitazione cade al 100% come neve e T_2 , temperatura sopra la quale la precipitazione cade al 100% come pioggia. Tra T_1 e T_2 viene operata un'interpolazione lineare.

La quantità di neve fresca HN viene quindi determinata moltiplicando P_s per la densità della neve fresca ρ_{sn} (kg m⁻³) che viene parametrizzata in funzione di TA e VW in accordo a Jordan (1999).

Metamorfismo di compattazione

L'equazione governante la compattazione dello spessore della neve D risulta (Jordan, 1999):

$$\frac{1}{D} \frac{\partial D}{\partial t} = C_1 + C_2 \quad (3)$$

dove C_1 (s⁻¹) è il tasso di compattazione della neve dovuto al metamorfismo distruttivo,

tipico della neve fresca, e C_2 (s⁻¹) il tasso di compattazione relativo al metamorfismo di pressione, dovuto al peso della neve sovrastante. Tali parametrizzazioni vengono riportate in Endrizzi et al. (2014).

Metamorfismo di fusione

La neve, può essere soggetta a fusione in funzione delle condizioni termodinamiche e del flusso energetico netto. In caso di fusione, il nuovo spessore viene calcolato in proporzione al nuovo contenuto di ghiaccio, tenendo la densità costante. In caso di rigelamento (*refreezing*) dell'acqua, esso avviene a spessore costante aumentando la densità.

Densità della neve

La neve viene solitamente discretizzata in vari strati (*layer*) per seguirne in modo ottimale l'evoluzione. Detto D_i lo spessore del layer i -esimo, alla fine del Δt di calcolo, si ottengono le nuove variabili di stato del sistema (contenuto di ghiaccio θ_i , contenuto di acqua θ_w e spessore D) da cui si ottiene lo spessore del manto nevoso (HS):

$$HS = \sum_{i=1}^N D_i \quad (4)$$

la densità dello strato di neve:

$$\rho_{sn} = \rho_w \theta_w + \rho_i \theta_i \quad (5)$$

ed infine l'equivalente in acqua (SWE) della neve

$$SWE = \frac{1}{\rho_w} \sum_{i=1}^N (\rho_{sn})_i \cdot D_i \quad (6)$$

dove N il numero totale di layer di neve nel punto.

APPLICAZIONE DEL MODELLO SnowMaps

Il modello è stato applicato nella zona montana del Veneto, un territorio complesso di 5.500 km², costituito da una zona prealpina a ridosso della pianura veneta, che si estende dal Lago di Garda fino alle Prealpi Carniche, e da una zona dolomitica più interna. La piovosità decresce progressivamente dalla prima alla seconda zona, da una media annuale di 2300 mm del Pasubio, nelle Pre-

Tab. 1 - Termini delle equazioni di conservazione.

Variabile	Equazione Energia	U.d.M.	Equazione Massa	U.d.M.
R	$U = (\rho_i c_i \theta_i + \rho_w c_w \theta_w) \cdot T + L_f \rho_w \theta_w$	J m ⁻³	$\rho_w \theta_w + \rho_i \theta_i$	-
F	$G + J_e$	W m ⁻²	$\rho_w J_w$	m s ⁻¹
F (condizioni al contorno)	$EB: = SW + LW (T_s) + H (T_s) + ET (T_s, \theta)$	W m ⁻²	HNW - E	m s ⁻¹
S	S_e	W m ⁻³	$\rho_w S_w$	s ⁻¹

© AINEVA

Tab. 2 - Descrizione delle variabili usate nelle equazioni di conservazione.

Termine	Descrizione	U.d.M.
U	Energia interna	J m ⁻³
EB	Bilancio di energia superficiale	W m ⁻²
$G = \lambda \nabla T$	Flusso di conduzione del calore	W m ⁻²
$J_w = -K$	Flusso di massa dovuto allo scioglimento nivale	m s ⁻¹
$J_e = \rho_w (L_f + c_w T) J_w$	Flusso di avvezione dovuto all'apporto energetico dallo scioglimento nivale	W m ⁻²
λ	Conducibilità termica della neve	W m ⁻¹ K ⁻¹
ρ_i	Densità del ghiaccio	Kg m ⁻³
ρ_w	Densità dell'acqua	Kg m ⁻³
c_i	Conducibilità termica del ghiaccio	J Kg ⁻¹ K ⁻¹
c_w	Conducibilità termica dell'acqua	J Kg ⁻¹ K ⁻¹
L_f	Calore latente di fusione dell'acqua	J Kg ⁻¹
θ_i	Contenuto volumetrico del ghiaccio	-
θ_w	Contenuto volumetrico dell'acqua	-
K	Conducibilità idraulica della neve	m s ⁻¹
SW	Radiazione ad onda corta netta	W m ⁻²
LW	Radiazione ad onda lunga netta	W m ⁻²
H	Flusso di calore sensibile	W m ⁻²
ET	Flusso di calore latente	W m ⁻²
E	Flusso di evaporazione	m s ⁻¹
T	Temperatura della neve	
T _s	Temperatura superficiale	

© AINEVA

alpi vicentine, fino a 1100 mm/a sui lembi più settentrionali delle Dolomiti.

Nella zona prealpina l'altezza media del manto nevoso, calcolata su 23 anni, dal 1990 al 2013, raggiunge il suo massimo nella prima decade di marzo con 135 cm a Campomolon (1735 m s.l.m.) e 93 cm a Campogrosso (1464 m s.l.m.). Nelle Dolomiti, nella stessa decade, si raggiungono valori medi simili a quote ben più elevate (133 cm a Monti Altì di Ornella, 2250 m, 1985-2013). Per quanto riguarda le temperature si citano, a titolo di esempio, quattro stazioni poste alla stessa quota (1000 m circa); Boscochiesanuova, nel veronese, ha una temperatura media annua di 9,0 °C (2000-2013), Asiago 6,6 °C (1997-2013), Caprile (Alleghe) 6,7°C (1984-2013) e Santo Stefano di Cadore 6,4°C (1985-2013). Le temperature, più che dalla dislocazione geografica, sono influenzate dalla conformazione morfologica del territorio, che determina, specie in periodo invernale, le ore di soleggiamento e, spesso, a fondovalle, la comparsa dell'inversione termica.

Per le simulazioni sono stati utilizzati i dati meteorologici provenienti da 40 stazioni, di cui 30 comprendenti l'altezza del manto nevoso. I dati meteorologici comprendono la temperatura (TA), l'umidità (RH) e la pressione (P) dell'aria, la velocità (VW) e la direzione del vento (DV), la radiazione globale incidente (ISWR) e la precipitazione (HNW), nonché i valori di HS (ove presenti) per determinare i valori misurati di HNW in occasione degli eventi nevosi.

Per tener conto dell'eterogeneità topografica del territorio sono state date in ingresso al modello le mappe di elevazione, esposizione, pendenza e fattore di vista del cielo. In Fig. 3 è riportata l'ubicazione delle stazioni nivo-meteorologiche utilizzate in tutto il dominio di calcolo.

RISULTATI

SnowMaps fornisce informazioni sull'evoluzione del manto nevoso sotto forma di mappe, ossia immagini del territorio in cui a ciascun punto viene associato un colore, la cui decodifica (tramite legenda) permette di conoscere l'altezza della neve ad una particolare data. Ad esempio,

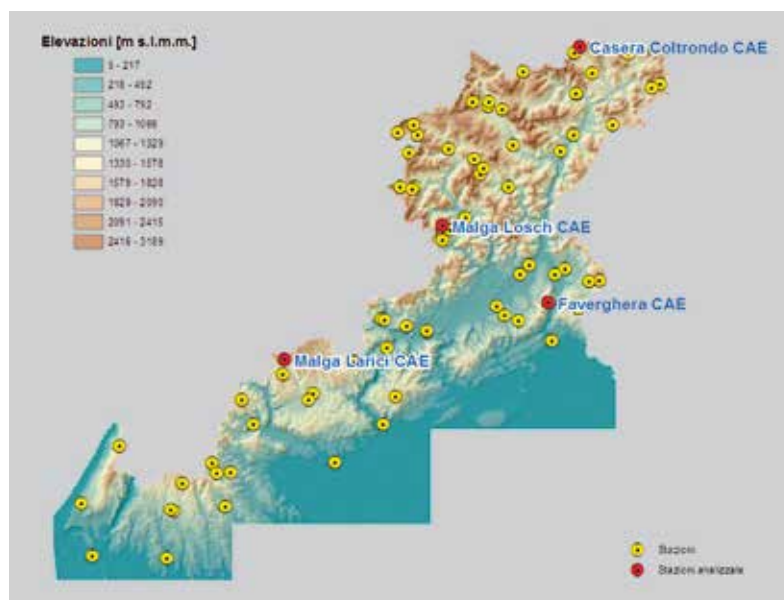


Fig. 3 - Ubicazione delle stazioni nivo-meteorologiche.

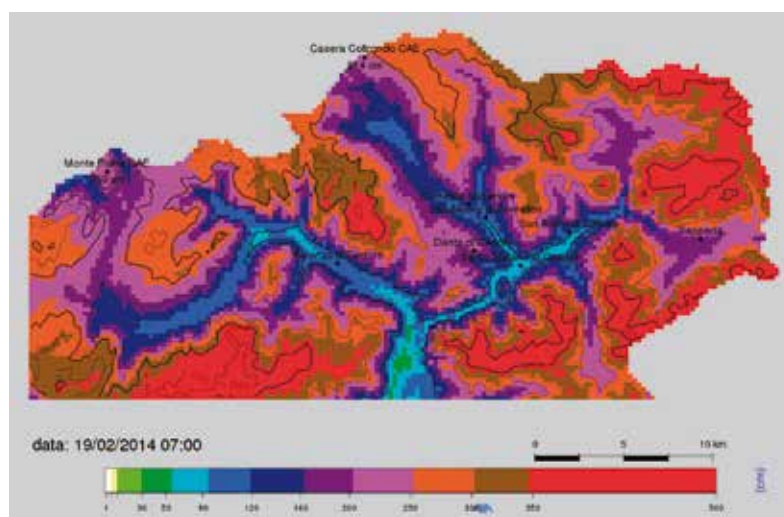


Fig. 4 - Esempio di mappa dell'altezza del manto nevoso del Comelico (BL).

la Fig. 4 riporta la mappa dell'altezza del manto nevoso (HS) del Comelico (BL) relativa alla data del 19 febbraio 2014. Dalla mappa si può evincere che nella località Sappada sono presenti circa 160-200 cm di neve mentre ad Auronzo circa 100 cm. La mappa riporta inoltre le curve di livello attraverso le quali si percepisce l'altezza della neve presente nelle valli e nei versanti alle varie quote.

I risultati del modello, nei punti corrispondenti alle stazioni nivometriche, sono stati poi confrontati con i dati misurati per permettere un confronto visivo. Infine, è stata calcolata la somma delle deviazioni (*root mean squared deviation* - RMSD) per ottenere un indice identificativo della bontà della simulazione, sia in termini assoluti che relativi (percentuali).

Nelle Fig. 5-7 sono riportati, a titolo di esempio, dei confronti visivi misurato (li-

nea rossa) - modellato (linea nera) fra le altezze neve misurate e simulate nelle tre stagioni invernali 2011-2012, 2012-2013 e 2013-2014 per quattro stazioni dislocate sul territorio montano veneto. Due sono situate in zona dolomitica, Casera Coltrondo sita al confine con l'Alto Adige a nord est del Passo di Monte Croce Comelico, a quota 1960 m s.l.m. e Malga Losch, posta nelle Dolomiti meridionali, alla base dell'Agner, a quota 1735 m s.l.m.; le altre in zona prealpina, Faverghera, a 1605 m s.l.m., in quella orientale, sulla dorsale fra le province di Belluno e Treviso, Malga Larici a 1605 m s.l.m. sull'altopiano di Asiago.

La prima stagione è stata poco nevosa, mentre l'ultima ha riportato quantitativi nevosi quasi eccezionali. Si può notare come, in tutte le stagioni, i valori simulati siano stati abbastanza simili a quelli registrati, con buona simulazione sia dei processi di

Fig. 5 - Confronti per 4 stazioni fra le altezze neve misurate (linea rossa) e simulate (linea nera) per la stagione 2011-12.

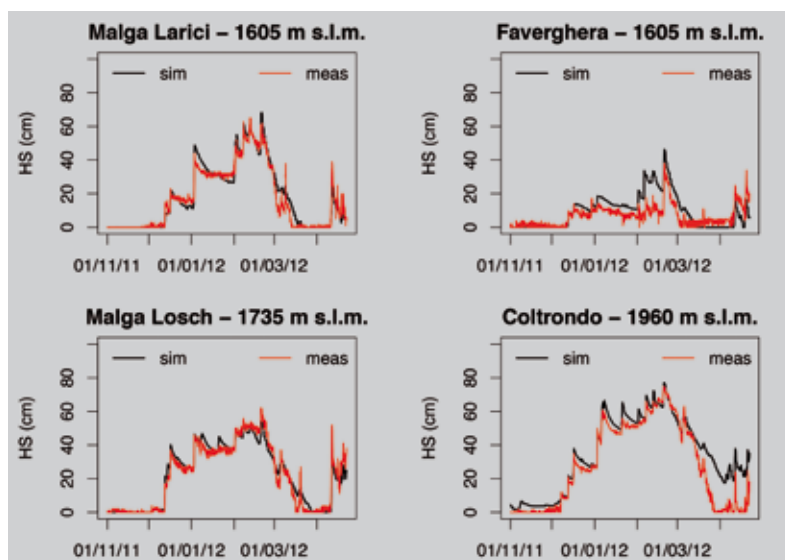


Fig. 6 - Confronti per 4 stazioni fra le altezze neve misurate (linea rossa) e simulate (linea nera) per la stagione 2012-13.

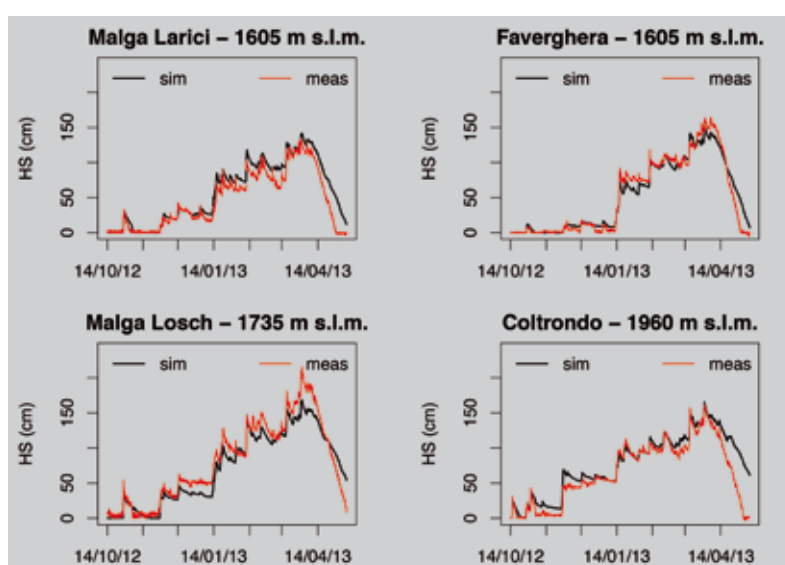
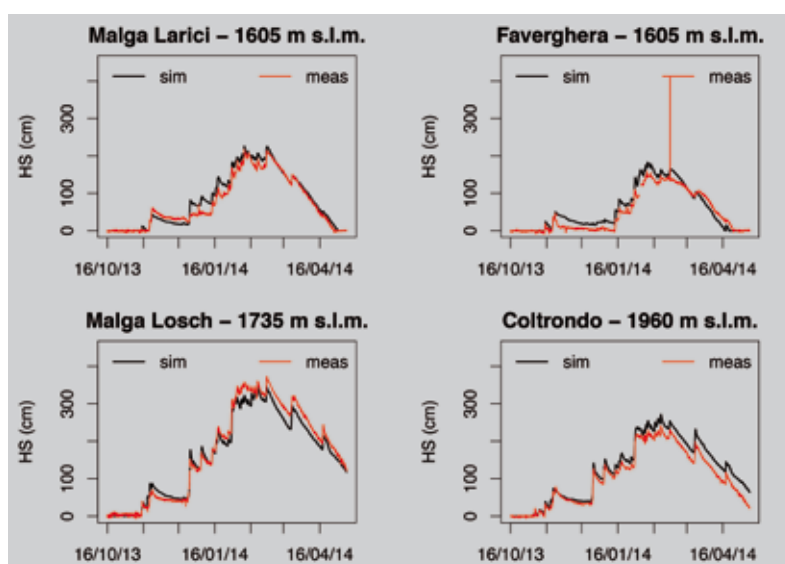


Fig. 7 - Confronti per 4 stazioni fra le altezze neve misurate (linea rossa) e simulate (linea nera) per la stagione 2013-14.



accumulo che di quelli di fusione primaverile, in particolare nell'ultima stagione invernale. L'analisi quantitativa (Fig. 8-9), sviluppata per le medie giornaliere, per le quattro stazioni negli ultimi due anni rileva

un RMSD inferiore ai 20 cm (pari a meno del 15% relativo), tranne per Malga Losch, dove nell'ultimo anno, particolarmente nevoso, si sale a circa 35 cm, corrispondenti ad un RMSD relativo di circa il 25%.

In Fig. 10 è riportata la correlazione fra l'RMSD assoluto di tutte le stazioni e la quota, al fine di verificare se la componente altitudinale è importante nella generazione dell'errore. Dal grafico si può notare come, in realtà, in ambiente veneto, siano la dislocazione geografica e la morfologia del territorio a influenzare maggiormente l'errore del modello, in particolare in ambito prealpino, dove alcune stazioni del vicentino (Campogrosso e Campomolon) risultano essere eccezionalmente nevose e difficilmente simulabili.

UTILIZZO PRATICO DELLE INFORMAZIONI

Il modello è stato utilizzato presso il Centro Valanghe Arabba a partire dalla stagione invernale 2011-2012. Le mappe, realizzate a scadenza quindicinale, sono state analizzate e confrontate con la situazione reale, monitorata tramite le 16 stazioni nivo-meteorologiche in quota, nonché mediante i dati di altezza neve forniti da osservatori volontari distribuiti sul territorio.

Si è trattato di un continuo feedback fra la componente modellistica e gli operatori nivologici sul territorio che ha permesso un continuo affinamento dei vari processi simulati dal modello SnowMaps.

Le mappe di altezza del manto nevoso sono risultate progressivamente più verosimili alla situazione reale, tanto da poter costituire un utile supporto alla previsione valanghe in quanto hanno consentito di integrare le varie informazioni derivanti da osservazioni dirette sul territorio, generalmente di carattere puntuale e non sempre coprenti tutte le fasce altitudinali, con dati spazializzati che hanno fornito un quadro più esauriente della distribuzione del manto nevoso sull'intero territorio.

CONCLUSIONI

SnowMaps rappresenta un innovativo sistema di calcolo che, sfruttando la rete esistente di nivometri e stazioni meteo, permette di calcolare da remoto l'altezza e l'equivalente in acqua della neve in tempo reale, sia a scala locale che regionale. Rispetto ad un approccio modellistico di

tipo statistico, SnowMaps offre i seguenti vantaggi:

- consente una migliore rappresentazione dell'eterogeneità della neve in accordo alla topografia e alla climatologia del territorio, fondamentale in ambiente montano;
- non occorrono necessariamente misure di altezza e densità della neve per elaborare le stime in quanto sfrutta i dati meteorologici esistenti, permettendo quindi di ridurre i costi del rilievo dati (es. campagne di misura dedicate, rilievo densità, ecc.);
- permette di ottenere stime sull'evoluzione della neve anche in tarda primavera, quando le stazioni nivometriche manuali sono generalmente sprovviste di dati, fornendo una stima dell'equivalente in acqua della neve in alta quota;
- permette di ottenere informazioni accessorie, quali il contenuto d'acqua del terreno o la precipitazione efficace (somma algebrica di pioggia, evapotraspirazione e scioglimento nivale), importante per la gestione delle piene.

Oltre ad essere diventate un prezioso strumento operativo, le elaborazioni di SnowMaps sono state rese disponibili al pubblico sul sito dell'ARPAV, a supporto delle attività di outdoor degli utenti della montagna durante il periodo invernale e anche degli operatori che frequentano il territorio veneto per scopi lavorativi.

Infine, in prospettiva, SnowMaps potrebbe divenire fondamentale al fine di ridurre la quantità di rilievi in campo e quindi le spese a carico delle strutture operative sul territorio.

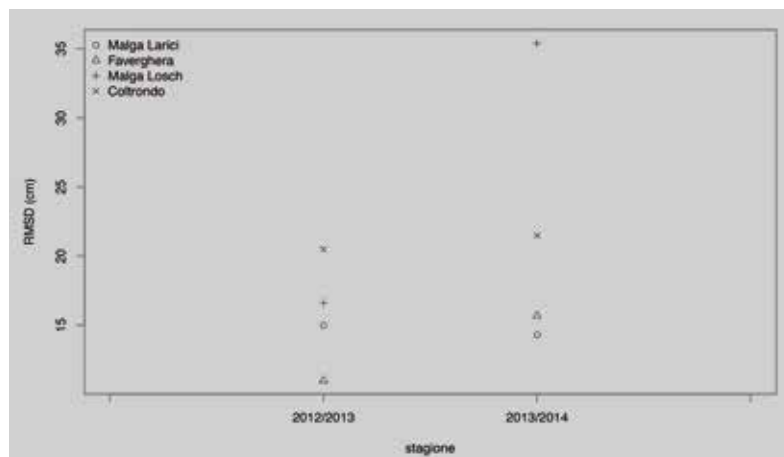


Fig. 8 - RMSD assoluto del valore medio giornaliero per le 4 stazioni.

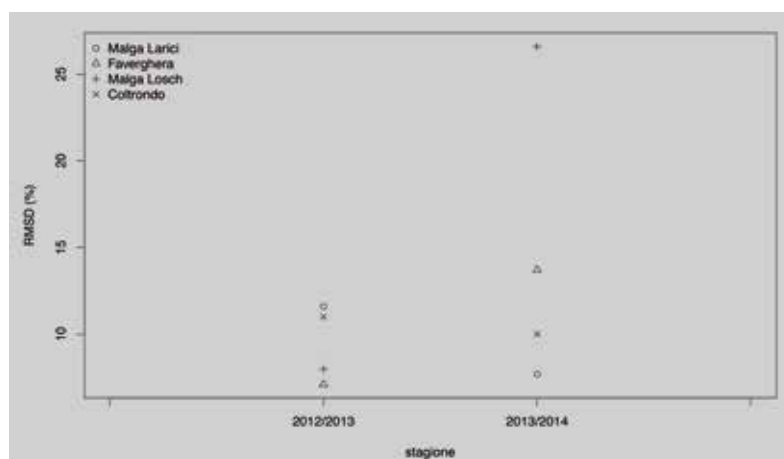


Fig. 9 - RMSD relativo del valore medio giornaliero per le 4 stazioni.

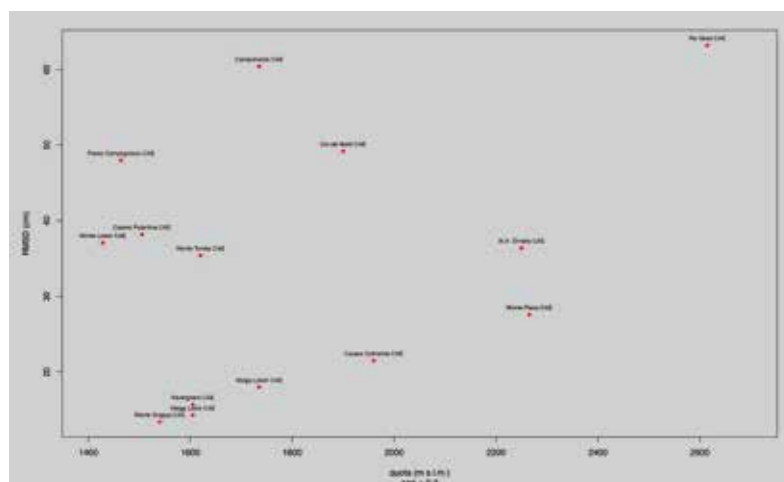


Fig. 10 - Correlazione fra RMSD assoluto e quota.

Bibliografia

- Bavay, M. and Egger, T. (2014): Meteolo 2.4.2: a preprocessing library for meteorological data, Geosci. Model Dev. Discuss., 7, 3595–3645, doi:10.5194/gmd-7-3595-2014.
- Comai T. (2014). Analisi spaziale e temporale delle precipitazioni nevose nelle Alpi Italiane, tesi di laurea magistrale in ingegneria per l'ambiente ed il territorio, Università degli studi di Trento.
- Dall'Amico, M., Endrizzi, S., and Rigon, R. (2011). Snow mapping of an alpine catchment through the hydrological model GEOTop. In Proceedings Conference Eaux en montagne, Lyon 16-17 mars, pages 255–261. Société hydroélectrique de France.
- Dall'Amico, M., Endrizzi, S., Gruber, S., and Rigon, R. (2011). GEOTop Users Manual. Version 1.0, Technical report, Mountaineering Srl, Siemensstr. 19 Bolzano, Italy.
- Dickinson R. E., A. Henderson-Sellers, and P. J. Kennedy (1993). Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) version 1e as coupled to the NCAR Community Land Model. Technical report, National Center for Atmospheric Research, Boulder, CO, USA.
- Endrizzi, S., Gruber, S., Dall'Amico, M., and Rigon, R. (2014). GEOTop 2.0: simulating the combined energy and water balance at and below the land surface accounting for soil freezing, snow cover and terrain effects, Geosci. Model Dev., 7, 2831-2857, doi:10.5194/gmd-7-2831-2014.
- Foppa, N., A. Stoffel, and R. Meister (2005). Snow depth mapping in the Alps: Merging of in situ and remotely-sensed data, EARSeL eProceedings, 4 (1), 119–129.
- Jordan, R., Andreas, E. L., and Makshtas, A. P. (1999). Heat budget of snow-covered sea ice at North Pole 4, J. Geophys. Res., 104, 7785–7806.
- Larcher F.; Allamano P.; Claps P. (2009). Estimation of the heated rain gauge error at a high-elevation site in the Italian Alps. Relazione tecnica, Dipartimento di Idraulica, Trasporti ed Infrastrutture Civili, Politecnico di Torino.
- Meyers, T. and Dale, R. (1983). Predicting daily insolation with hourly cloud height and coverage., Journal of Climate and Applied Meteorology, 22, 537–545, 1983.
- Sevruk B. (1983). Correction of measured precipitation in the Alps using the water equivalent of new snow. Nordic Hydrology, 14(2), 49–58.
- Stoffel, A., N. Foppa, and N. Raderschall (2006). Mapping snow depth in the Alps, ISSW Proceedings, Telluride, CO, USA.