



ClimOpt

Ottimizzazione della gestione dei rischi climatici

Programma: Interreg IV A Italia-Svizzera

- **Applicazione all'Alto Adige del software SnowMaps (Mountain-eering) per il calcolo di mappe neve e di equivalente in acqua in tempo reale e differito**

AUTONOME
PROVINZ
BOZEN
SÜDTIROL



PROVINCIA
AUTONOMA
DI BOLZANO
ALTO ADIGE



KANTON
GRAUBÜNDEN
AMT FÜR WALD
UND NATURGEFAHREN



Editore: Provincia autonoma di Bolzano – Alto Adige e Cantone dei Grigioni

Provincia autonoma di Bolzano – Alto Adige

Ripartizione Protezione antincendi e civile, viale Druso 116, 39100 Bolzano

protezione.antincendiecivile@provincia.bz.it, www.provincia.bz.it/protezione-civile

Direttore di ripartizione Hanspeter Staffler

Cantone dei Grigioni

Ufficio foreste e pericoli naturali, via Loë 14, CH-7000 Coira

info@awn.gr.ch, www.awn.gr.ch

Capo settore Christian Wilhelm

© 2014

Coordinamento progetto

Andreas Zischg (abenis alpinexpert srl/abenis AG)

a.zischg@abenis.it, www.abenis.it, www.abenis.ch

Roberto Dinale (Ufficio idrografico della Provincia autonoma di Bolzano)

roberto.dinale@provincia.bz.it, www.provincia.bz.it/hydro

Grafica

sonya-tschager.com

Ristampa permessa soltanto con autorizzazione dell'editore



ClimOpt – Ottimizzazione della gestione dei rischi climatici

Interreg Italia-Svizzera 2007-2013

Autore:
Matteo Dall'Amico
19 agosto 2014



Le opportunità non hanno confini.



Indice

1.	Premessa.....	5
2.	SnowMaps: modellazione fisicamente basata.....	6
2.1.	Mappe di neve: tipologia del dato fornito.....	7
2.2.	Periodo 01.11.2013-01.07.2014.....	12
2.3.	Periodo 01.11.2010-01.07.2011.....	13
3.	Dati in ingresso	14
3.1.	Dati statici	14
3.2.	Dati dinamici	16
3.3.	Parametri fisici	16
3.4.	Algoritmi di calcolo	16
4.	Modello SnowMaps	18
4.1.	Modulo di preprocessamento	19
4.2.	Cloud.....	19
4.3.	HS2HNW	20
4.4.	MeteoIO: interpolazione e spazializzazione delle forzanti.....	21
4.5.	GEOtop: evoluzione del manto nevoso	24
5.	Risultati.....	29
5.1.	Periodo 01.11.2013-01.07.2014.....	29
5.2.	Periodo 01.11.2010-01.07.2011.....	31
6.	Conclusioni	33
7.	Bibliografia	34
8.	Appendice 1	35



1. Premessa

In data 18.11.2013 con contratto n. 1683/26.3 la presente ditta è stata incaricata di calcolare e fornire mappe di neve relative al territorio della Provincia autonoma di Bolzano. Tale incarico si colloca nell'ambito del progetto "27401079 ClimOpt - Ottimizzazione della gestione dei rischi climatici", volto al complemento del sistema di pre-allertamento della Provincia Autonoma di Bolzano e del Cantone dei Grigioni.

In particolare si pone l'obiettivo di identificare preventivamente gli stati ambientali e sistemici critici rispetto al possibile verificarsi di pericoli naturali (alluvioni, colate detritiche), considerare le caratteristiche geomorfologiche e climatiche dei territori di studio.

L'obiettivo dell'incarico è duplice:

1. la fornitura di una carta dello spessore del manto nevoso (HS), una carta della neve fresca (HN) e una carta dell'equivalente in acqua del manto nevoso (SWE) "in tempo reale" a cadenza bisettimanale per il periodo 01.11.2013-01.07.2014.
2. l'elaborazione di una carta di HS, HN e SWE settimanali per il periodo 01.11.2010-01.07.2011.

La presente relazione rappresenta il rapporto finale del lavoro svolto, ove vengono descritte le procedure e gli algoritmi utilizzati per l'elaborazione delle mappe, nonché le caratteristiche del sistema relativamente all'uso offline e operativo (tempo reale), alla programmazione automatica, alla disponibilità ed alla qualità dei dati.

Bolzano, 19 agosto 2014

Dr. Matteo Dall'Amico



2. SnowMaps: modellazione fisicamente basata

La neve è una risorsa fondamentale in ambiente montano: oltre ad essere un'attrazione turistica per amanti degli sport invernali, contribuisce all'apporto idrico durante lo scioglimento, con implicazioni per la ricarica delle falde e per l'industria idroelettrica. Tuttavia, la neve può rappresentare anche un pericolo, ad esempio per il possibile innesco di valanghe, per la viabilità delle arterie 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.

Generalmente il monitoraggio della neve avviene tramite misure di neve, provenienti da sensori automatici (nivometri) o da osservatori manuali. I primi forniscono misure continue nel tempo ma su punti fissi, mentre i secondi forniscono misure saltuarie nel tempo ma in vari punti del territorio, includendo spesso una misura della densità della neve. Le misure vengono poi distribuite nello spazio tramite una regressione dei dati misurati di altezza e densità della neve con l'elevazione.

“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 fisico secondo il quale l'evoluzione della neve viene calcolata in ogni punto del dominio attraverso un modello idrologico che risponde a leggi fisiche di conservazione della massa, dell'energia e della quantità di moto (Dall'Amico et al., 2011). Le forzanti meteorologiche esterne, che regolano l'evoluzione della neve nel tempo e nello spazio, vengono fornite dalle stazioni meteo sparse nel territorio e successivamente spazializzate nel dominio di calcolo tenendo conto delle caratteristiche topografiche, quali elevazione, pendenza ed esposizione. Il risultato del calcolo è una stima della neve in tutto il territorio (continuità spaziale) ed in ogni istante (continuità temporale).

“SnowMaps” è stato testato in via sperimentale nel corso della stagione invernale 2011-2012 in collaborazione con il Centro Valanghe di Arabba (BL) e poi applicato in via operativa alle Regioni Friuli Venezia-Giulia e Veneto nella stagione 2012-2013, con l'aggiunta del Trentino, Alto Adige e 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.



2.1. Mappe di neve: tipologia del dato fornito

“SnowMaps” ha fornito informazioni sull’evoluzione del manto nevoso sottoforma di “mappe”, ossia elaborazioni cartografiche digitali del territorio in cui a ciascun punto viene associato un valore rappresentativo di un’area circostante di estensione pari alla risoluzione della mappa stessa. La risoluzione delle mappe è 250 m. Il contenuto informativo mappato ha riguardato:

- l’altezza del manto nevoso (HS) relativo ad ognuno dei giorni precedenti all’invio.
- la cumulata di neve fresca (HN) caduta nelle precedenti 24 ore, successivamente cumulate per ottenere il totale delle precipitazioni nevose cadute nei giorni compresi tra i due invii.
- l’equivalente in acqua della neve (SWE), rappresentante i cm di acqua equivalente contenuti nel manto nevoso, relativa ad ognuno dei giorni precedenti all’invio.

Le mappe sono state consegnate in formato sorgente “raster” (ESRI ASCII format) per tutta la Provincia Autonoma di Bolzano e contestualmente sono state fornite le immagini (formato PNG) nelle quali a ciascun punto viene associato un colore, la cui decodifica (tramite legenda) permette di conoscere lo stato della neve ad una particolare data. Nelle Fig. 1 e 2 vengono riportate a titolo di esempio le mappe di HS ed SWE relative alla zona Alto Adige aggiornate al giorno 31.01.2014.

Le immagini fornite sono relative alle zone identificate in Tab. 1 visibili nelle Figure da 3 a 13.

Alta Venosta occidentale
Cresta confine occidentale
Cresta confine centrale
Alpi Sarentine
Cresta confine orientale
Alta Pusteria
Dolomiti orientali
Dolomiti centrali
Dolomiti occidentali
Alpi della Val di Non
Gruppo Ortles-Cevedale
Alto Adige

Tabella 1: Zone di stampa per le immagini (PNG)



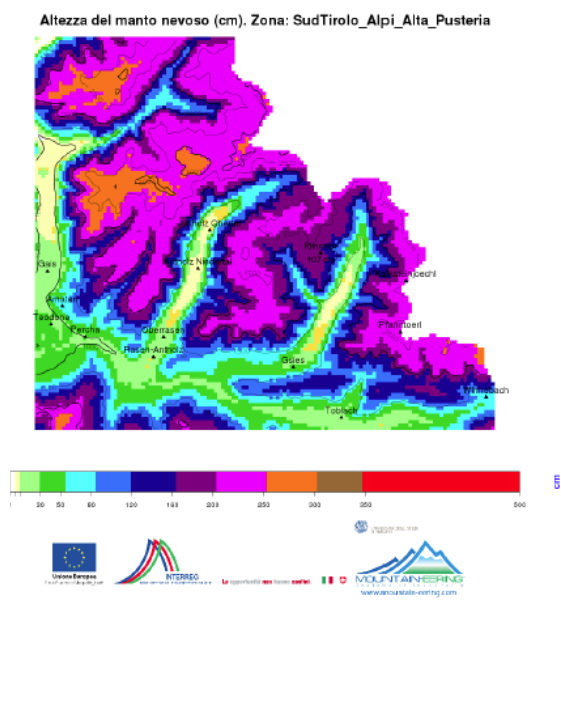


Figura 3: HS al 31.01.2014 della zona Alta Pusteria

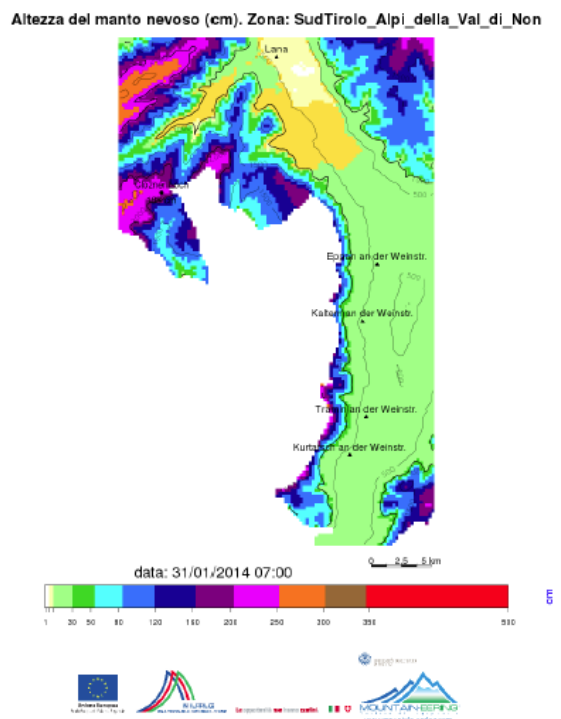


Figura 4: HS al 31.01.2014 della zona Val di Non

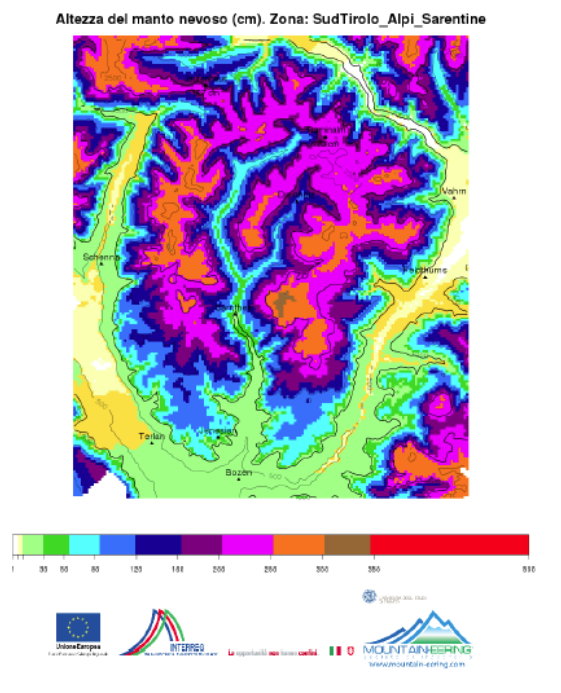


Figura 5: HS al 31.01.2014 della zona Sarentino

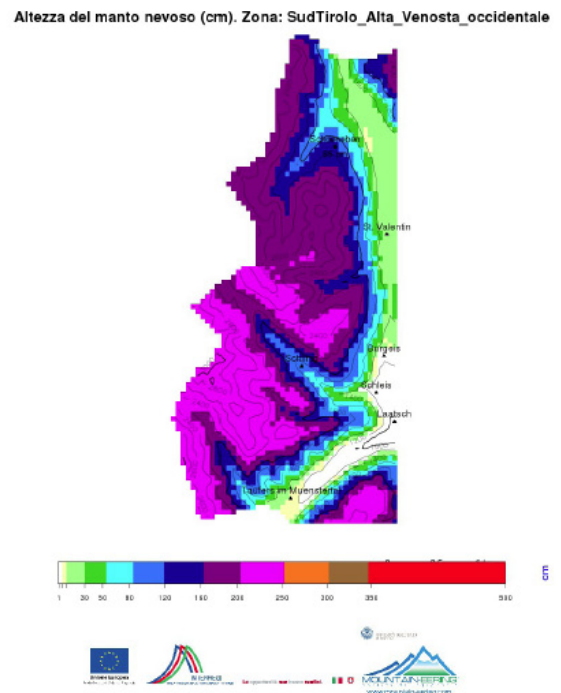


Figura 6: HS al 31.01.2014 della zona Alta Venosta occidentale

Altezza del manto nevoso (cm). Zona: SudTirolo_Cresta_confine_centrale

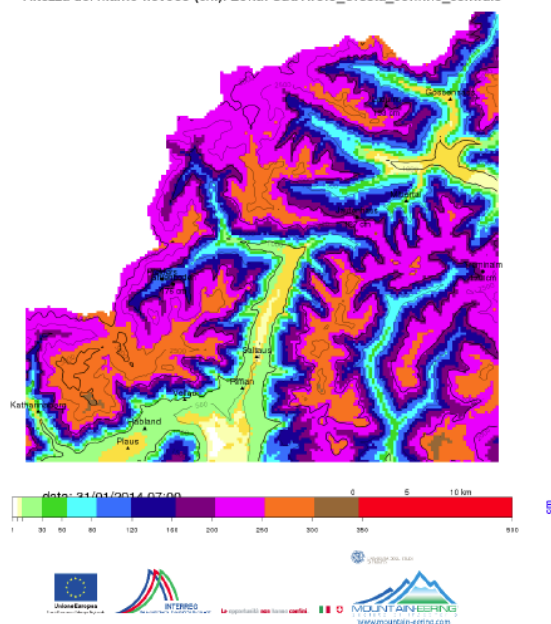


Figura 7: HS al 31.01.2014 della zona cresta confine centrale

Altezza del manto nevoso (cm). Zona: SudTirolo_Cresta_confine_occidentale

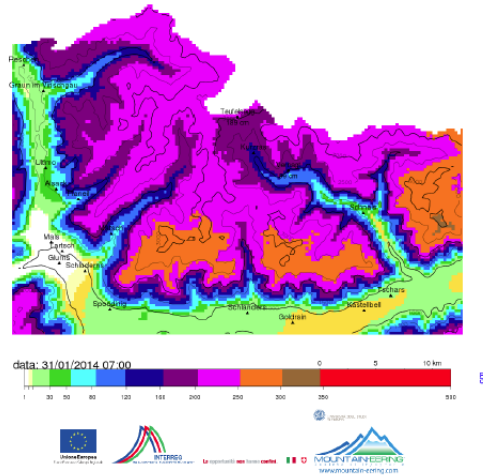


Figura 8: HS al 31.01.2014 della zona cresta confine occidentale

Altezza del manto nevoso (cm). Zona: SudTirolo_Cresta_confine_orientale

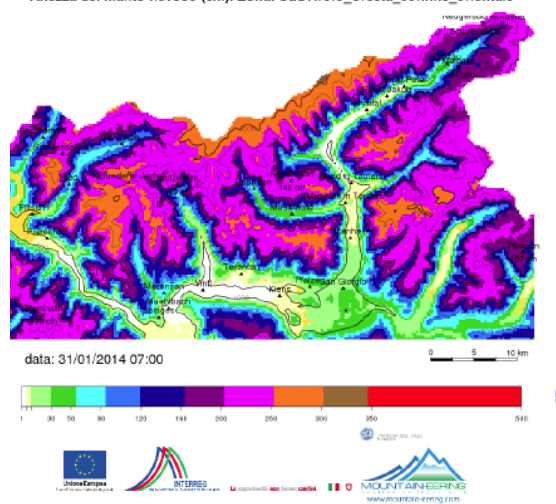


Figura 9: HS al 31.01.2014 della zona cresta confine orientale

Altezza del manto nevoso (cm). Zona: SudTirolo_Dolomiti_centrali

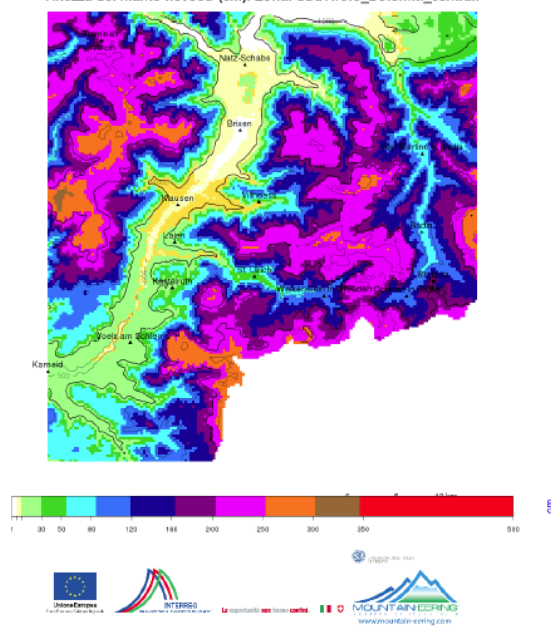
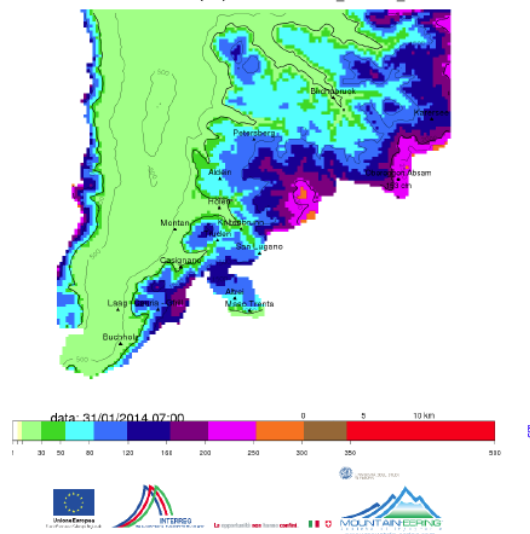


Figura 10: HS al 31.01.2014 della zona Dolomiti centrali



Altezza del manto nevoso (cm). Zona: SudTirolo_Dolomiti occidentali



Altezza del manto nevoso (cm). Zona: SudTirolo_Dolomiti orientali

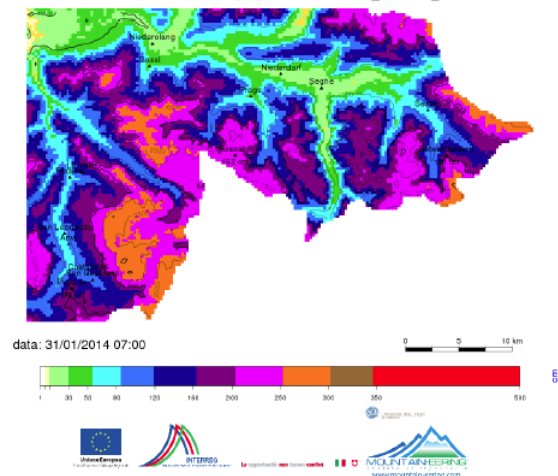


Figura 11: HS al 31.01.2014 della zona Dolomiti occidentali

Figura 12: HS al 31.01.2014 della zona Dolomiti orientali

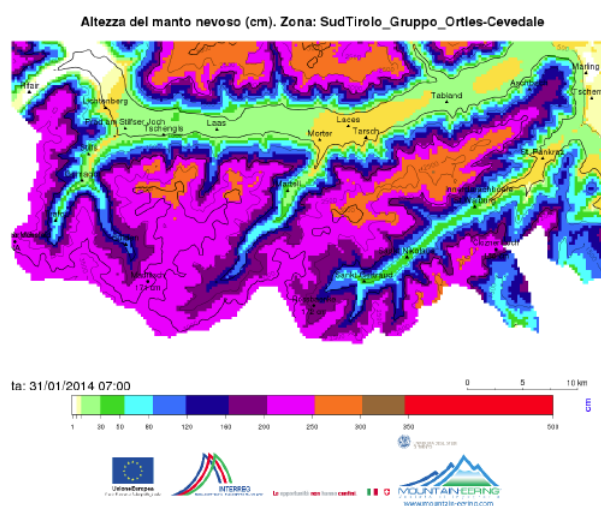


Figura 13: HS al 31.01.2014 della zona del gruppo Ortles-Cevedale



2.2. Periodo 01.11.2013-01.07.2014

In tale periodo sono stati previsti due invii settimanali coincidenti con il lunedì ed il venerdì mattina alle ore 10:00. Come riportato in Tab. 2, le mappe fornite il lunedì mattina rappresentano la situazione alle ore 7:00 del giorno stesso e dei due giorni precedenti (sabato e domenica). Le mappe fornite il venerdì rappresentano la situazione alle ore 7:00 del giorno stesso e dei tre giorni precedenti (giovedì, mercoledì e martedì).

	Sab (N-1)	Dom (N-1)	Lun (N)	Mar (N)	Mer (N)	Gio (N)	Ven (N)	Sab (N)	Dom (N+1)	Lun (N+1)
Lunedì sett. N	X	X	X							
Venerdì sett. N				X	X	X	X			
Lunedì sett. N+1								X	X	X

Tabella 2: Dettaglio delle mappe inviate a seconda dei giorni di consegna per il periodo 2013-2014

Per quanto riguarda HS ed SWE, le mappe rappresentano la stima aggiornata a ciascun giorno alle ore 7:00.

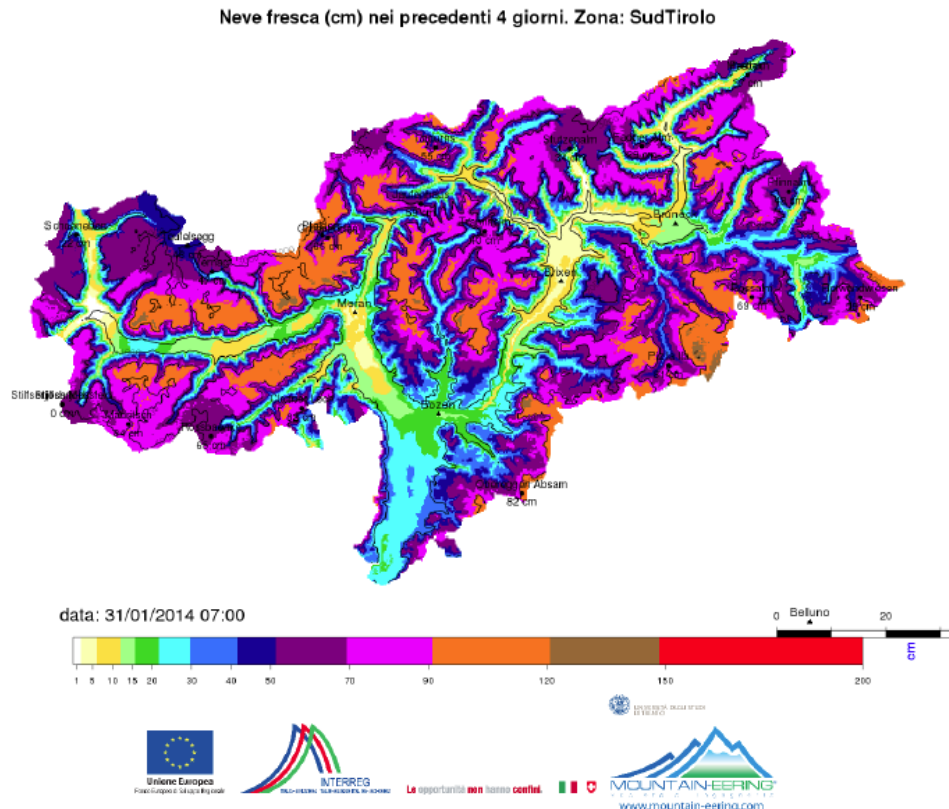


Figura 14: HN cumulata dal 28.01 al 31.01.2014 nella zona Alto Adige



Per quanto riguarda HN, il dato raster rappresenta la precipitazione nevosa cumulata tra due intervalli di stampa (in questo caso la precipitazione cumulata in 24 h) mentre il dato PNG rappresenta la precipitazione cumulata tra due intervalli di invio (da venerdì mattina al lunedì mattina per per l'invio del lunedì e dal lunedì mattina al venerdì mattina per l'invio del venerdì). A titolo di esempio la Fig.14 riporta la cumulata di precipitazione nevosa stimata nella zona Alto Adige dal 28.01.2014 al 31.01.2014.

2.3. Periodo 01.11.2010-01.07.2011

Per tale periodo è stato previsto un unico invio, al termine della simulazione, con consegna:

- dei dati raster e PNG di HS ed SWE rappresentanti l'aggiornamento ad ogni venerdì mattina;
- dei dati raster di HN rappresentanti le cumulate di precipitazione giornaliera di ogni giorno;
- dati PNG di HN rappresentante la precipitazione nevosa cumulata nella settimana compresa tra due venerdì.



3. Dati in ingresso

I dati in ingresso al modello SnowMaps possono essere divisi in tre tipologie:

- dati statici (che non cambiano nel tempo), rappresentati dalle caratteristiche topografiche e di uso del suolo del dominio di calcolo;
- dati dinamici, che cambiano nel tempo, rappresentati dai dati meteorologici misurati nelle stazioni;
- parametri fisici, che descrivono le proprietà del suolo e della neve;
- tipi di algoritmi di calcolo, che descrivono la preferenza sull'algoritmo da usare per ogni processo.

3.1. Dati statici

I dati statici possono essere a loro volta divisi in due gruppi: dati topografici quali mappa di elevazione (Fig. 15), esposizione (Fig. 16), pendenza (Fig. 17), fattore di vista del cielo (Fig. 18) e dati descrittivi del dominio di calcolo quali l'uso del suolo (Fig. 19), la copertura vegetazionale e la stratigrafia del suolo.

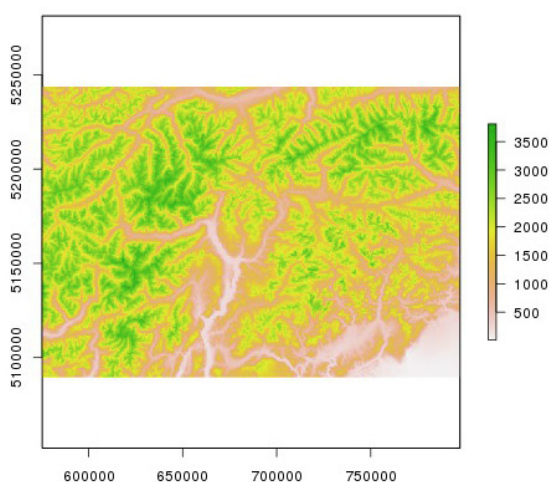


Figura 15: Mappa dell'elevazione (DEM)

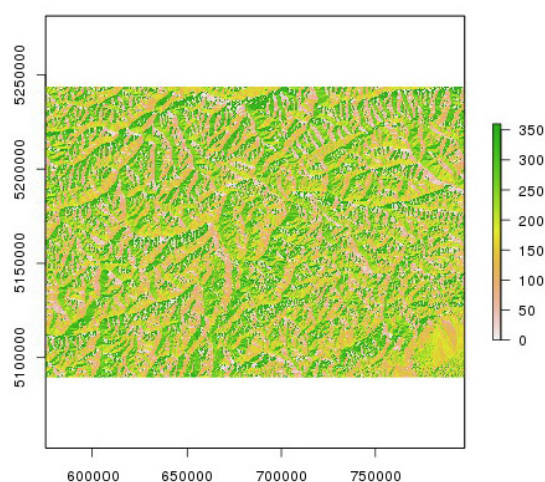


Figura 16: Mappa dell'esposizione

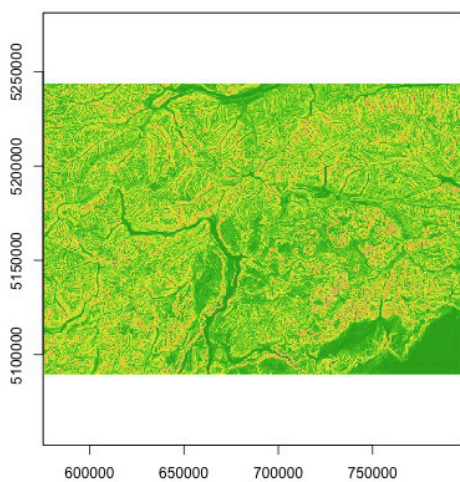


Figura 17: Mappa della pendenza

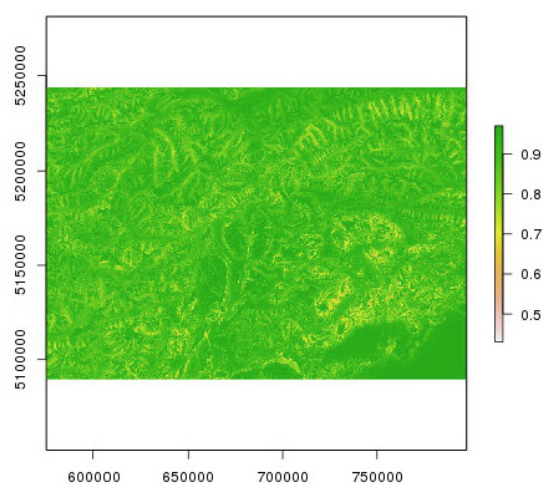


Figura 18: Mappa del fattore di vista del cielo

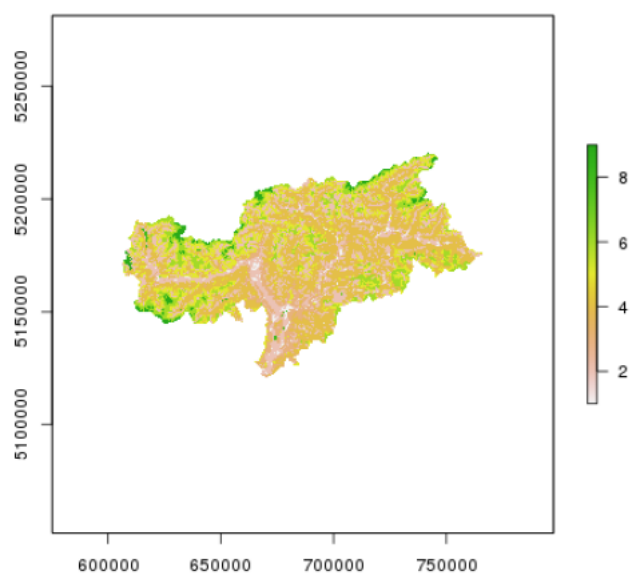


Figura 19: Mappa delle classi di uso del suolo



3.2. Dati dinamici

I dati dinamici, variabili nel tempo, sono rappresentati dai dati meteorologici misurati nelle stazioni.

Giornalmente alle ore 8:15 UTC+1 i dati meteo delle precedenti 72 h vengono caricati su un FTP dedicato e poi processati per aggiornare i dati in ingresso alla simulazione. Tali dati rappresentano le seguenti variabili meteorologiche:

- temperatura dell'aria (TA)
- umidità dell'aria (RH)
- pressione dell'aria (P)
- velocità (VW) e direzione del vento (DV)
- radiazione globale incidente (ISWR)
- precipitazione (HNW)

In Fig. 20 viene riportata l'ubicazione delle stazioni nivo-meteorologiche utilizzate in tutto il dominio di calcolo. Nelle Tab. 8 e 9 viene riportato il dettaglio rispettivamente delle stazioni nivo-meteorologiche e meteorologiche sudtirolesi.

3.3. Parametri fisici

I parametri fisici in ingresso al modello permettono di descrivere le proprietà fisiche della neve e del suolo. In questa simulazione, orientata alla descrizione della neve, sono stati utilizzati i parametri riportati in Tab. 7. Per una completa descrizione si rimanda al manuale tecnico del modello GEOTop (Dall'Amico et al, 2011b).

3.4. Algoritmi di calcolo

Il calcolo dei flussi energetici in GEOTop è implementato secondo varie formulazioni ed è alla discrezione dell'utente la scelta della metodologia che meglio si adatta alla propria simulazione. Allo stesso modo, le variabili meteorologiche vengono distribuite nello spazio attraverso il modello MeteIO secondo vari algoritmi.

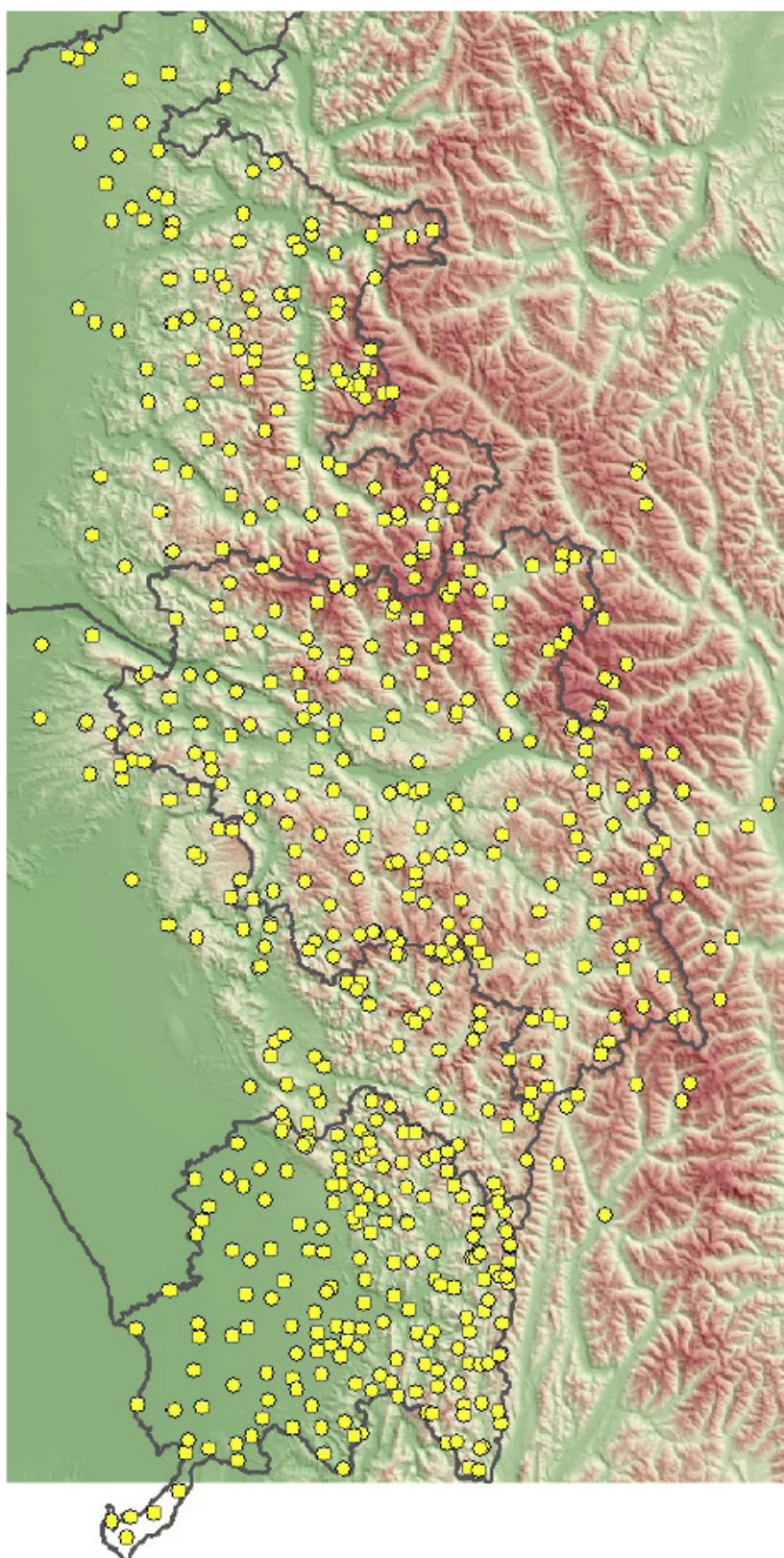


Figura 20: posizione delle stazioni meteorologiche utilizzate



4. Modello SnowMaps

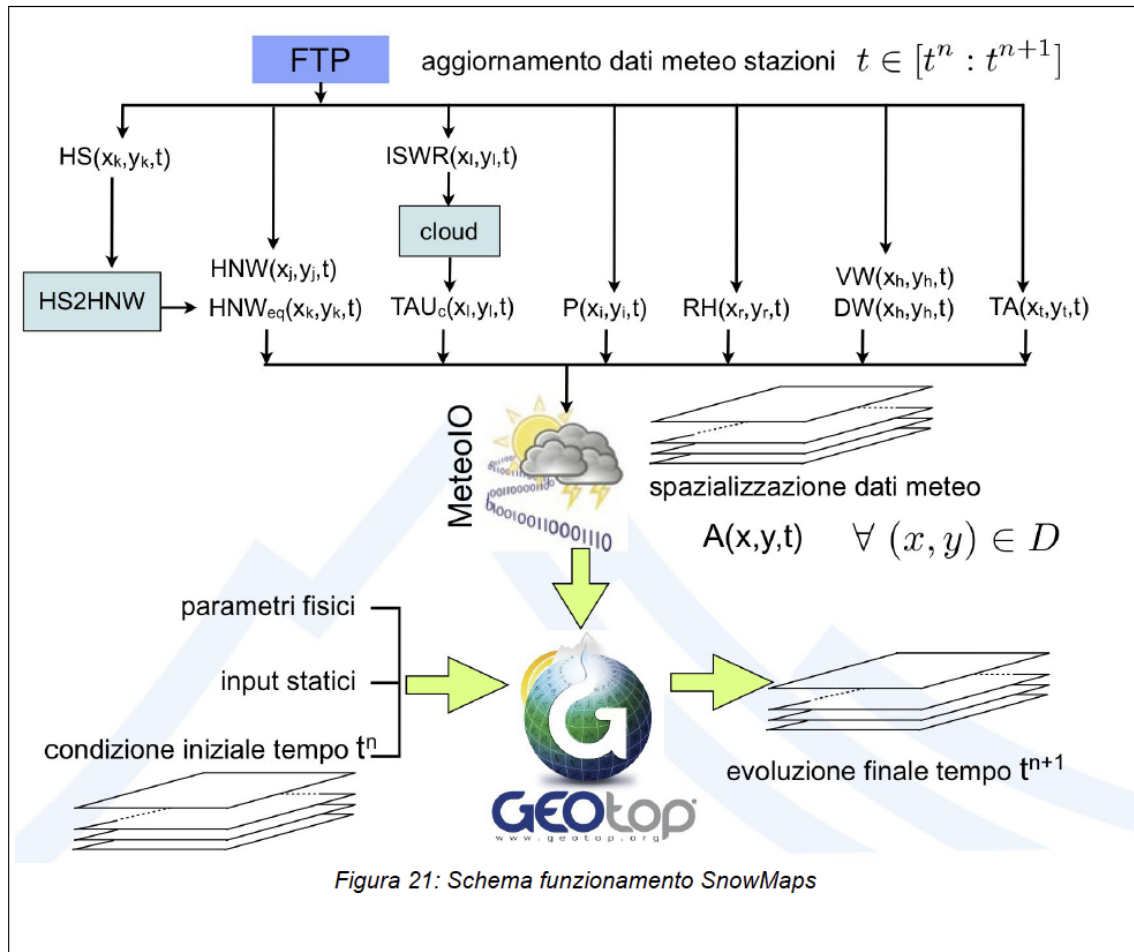
Il modello SnowMaps è composto da tre componenti principali:

1. il modulo di preprocessamento dei dati meteorologici;
2. il modello MeteolO¹ che tratta i dati meteorologici attraverso dei filtri (es. gap filling, interpolazione ecc.) e successivamente li interpola nello spazio secondo la modalità di calcolo desiderata;
3. il modello idrologico fisicamente basato GEOTop (Endrizzi et al, 2014) che, sulla base delle forzanti meteorologiche calcola l'evoluzione del manto nevoso (accumulo, compattazione, scioglimento, densità, altezza, equivalente in acqua) attraverso un bilancio di massa e di energia.

Come riportato in Fig. 21, la produzione delle mappe di neve avviene secondo il seguente flusso:

- la condizione iniziale è rappresentata dalle variabili di stato del sistema aggiornate al tempo t^n ;
- i dati meteorologici aggiornati (dal tempo t^n al tempo t^{n+1}) vengono messi a disposizione in un FTP e poi processati attraverso il modulo di preprocessamento;
- i dati preprocessati vengono dati in pasto a MeteolO per determinare le mappe spazializzate delle variabili meteorologiche (TA, VW, DW, RH, P, TAU_c , HNW);
- GEOTop legge la condizione iniziale, i parametri fisici e gli input statici e, ad ogni intervallo di calcolo, legge le corrispondenti variabili meteorologiche spazializzate da MeteolO e produce il nuovo stato del sistema, fino al tempo t^{n+1} ;
- le mappe vengono tradotte in forma grafica ed infine messe a disposizione.

¹ <http://models.slf.ch/docserver/meteoio/html/>



4.1. Modulo di preprocessamento

Il modulo di preprocessamento si compone di due parti: il modello “cloud” che permette di determinare la trasmissività delle nuvole (TAU_c) ed il modulo “HS2HNW” che converte l’accumulo nevoso misurato dai nivometri in precipitazione equivalente (HNW_{eq}).

4.2. Cloud

L’atmosfera e le nuvole agiscono come un filtro che trattiene e disperde la radiazione ad onda corta. Infatti, definendo con SW_i ($W \cdot m^{-2}$) la radiazione ad onda corta incidente misurata da un piranometro e SW_t ($W \cdot m^{-2}$) la radiazione potenzialmente ottenibile alla cima dell’atmosfera risulta che la trasmissività delle nuvole τ_c equivale a:

$$\tau_c = \frac{SW_i}{SW_t \cdot \tau_a} \quad (1)$$



dove τ_a è la trasmissività dell'atmosfera ottenibile attraverso la formulazione di Meyers and Dale (1983) come spiegato in Endrizzi et al. (2014). La variabile τ_c rappresenta una stima della copertura nuvolosa rilevata nel punto di misura, che poi può essere spazializzata tramite MeteolO per ottenere in ogni punto della griglia di discretizzazione del dominio la stima di radiazione ad onda corta incidente:

$$SW_i(x, y, t) = SW_t(x, y, t) \cdot \tau_a \cdot \tau_c(x, y, t) \quad (2)$$

4.3. HS2HNW

In occasione di un evento di precipitazione nevosa, i nivometri mostrano un segnale crescente che poi, al termine della nevicata, rimane costante (Fig. 22). Si può quindi definire la precipitazione di neve nuova caduta come:

$$HN := [HS(t^{end}) - HS(t^{beg})] \text{ se } HS(t^{end}) - HS(t^{beg}) > 0 \quad (3)$$

dove t^{end} e t^{beg} rappresentano gli istanti di fine ed inizio della nevicata rispettivamente. Conoscendo la densità della neve fresca caduta ρ_{sn} (kg m^{-3}) si potrebbe ottenere una stima della precipitazione equivalente HNW_{eq} caduta nel nivometro come:

$$HNW_{eq} := \frac{HN \cdot \rho_{sn}}{\rho_w} \quad (4)$$

dove ρ_w (kg m^{-3}) è la densità dell'acqua.

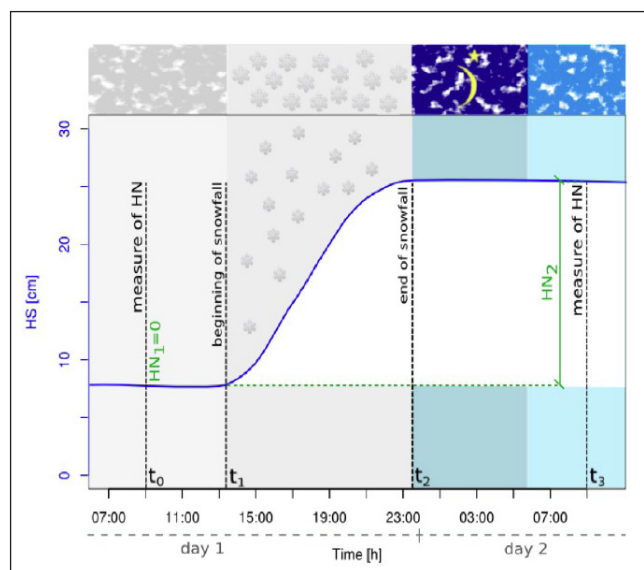


Figura 22: Esempio di segnale nivometrico in occasione di una nevicata (Comai, 2014)



Il modulo HS2HNW riceve in ingresso i dati dei nivometri osservati e cerca gli eventi di precipitazione verificatisi nell'intervallo di tempo secondo la procedura descritta da Comai (2014). La densità della neve fresca viene stimata attraverso la formula empirica di Jordan (1999) sulla base di TA e VW.

Infine, i dati di precipitazione equivalente ottenuti vanno ad aggiungersi alla base di dati iniziale rappresentata dai pluviometri e poi verranno spazializzati tramite MeteolO. In questo modo è possibile ottenere un'indicazione della precipitazione ottenuta in alta quota, fondamentale per riprodurre in modo corretto l'evoluzione della neve in montagna.

4.4. MeteolO: interpolazione e spazializzazione delle forzanti

I dati meteorologici vengono aggiornati giornalmente nel server FTP e successivamente sono utilizzati da SnowMaps per aggiornare le condizioni della neve. Il tempo che intercorre tra l'arrivo dei dati e la fornitura della mappe di neve risulta essere di circa 2 h. Considerato che il tempo macchina necessario risulta essere di circa 1h 30', si evince che non esiste il tempo per una pre-validazione dei dati meteo da operare "off-line", per cui occorre impostare dei filtri automatici per pre-processare i dati, in modo da gestire dati mancanti (NA) e dati non fisicamente accettabili che possono accidentalmente essere presenti. MeteolO permette di analizzare i dati provenienti dalle varie stazioni attraverso dei filtri che eliminano i dati eccedenti delle soglie pre-impostate e, tramite un'interpolazione nel tempo, permettono di operare un "gap filling" (riempimento dei buchi) dei dati mancanti (vedasi Fig. 23).

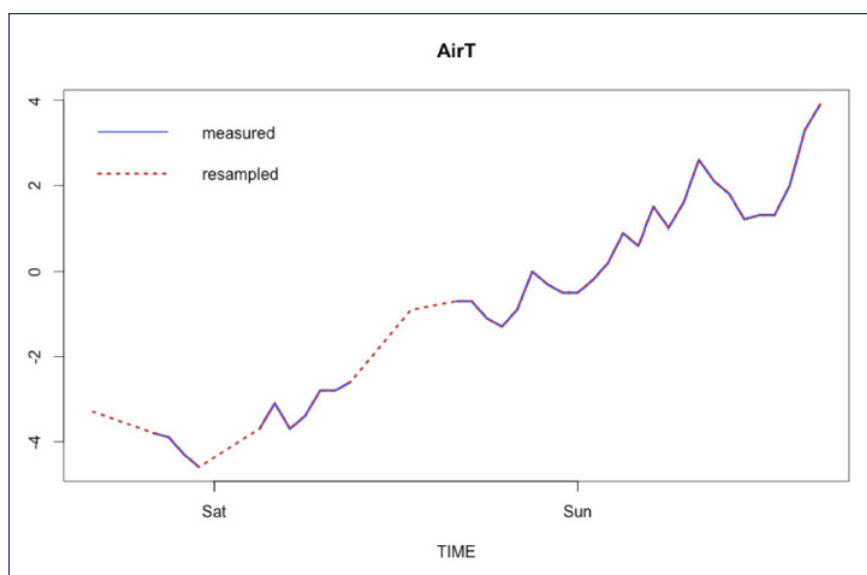


Figura 23: MeteolO: interpolazione nel tempo per il „gap filling“ della temperatura dell'aria. Linea blu continua: dato misurato; linea rossa tratteggiata: dato interpolato



In seguito MeteolO distribuisce nello spazio le forzanti meteorologiche precedentemente pre-processate, secondo le preferenze di algoritmo specificate dall'utente (es. IDW², kriging³ etc.). In Fig. 24 viene riportata la spazializzazione di TA secondo l'algoritmo IDW con lapse rate (LR). Tale algoritmo opera secondo i seguenti passi: a) determina il lapse rate della temperatura per il tempo "t", es. 31.01.2014 h13:00; b) determina il residuo R di ogni stazione rispetto al lapse-rate; c) distribuisce i residui trovati tramite IDW ottenendo R(x,y,t) ed infine d) calcola la temperatura risultante in ogni punto aggiungendo al residuo la componente della temperatura secondo la quota.

$$TA(x, y, t) = R(x, y, t) + LR[Z(x, y), t] \quad (5)$$

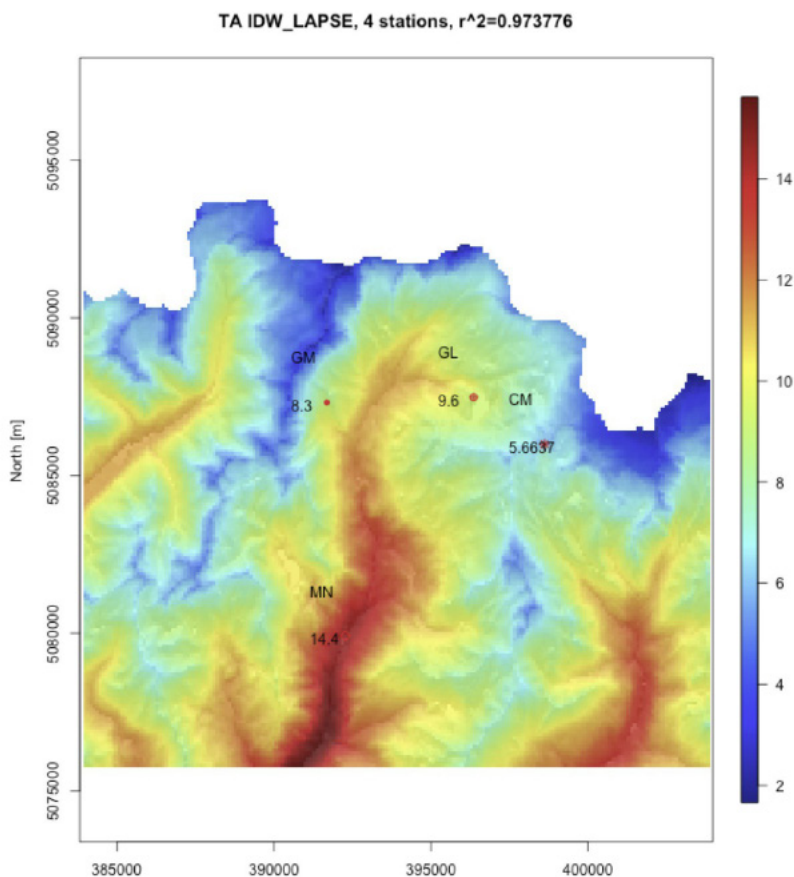


Figura 24: MeteolO: esempio di spazializzazione di TA con IDW_LAPSE

In Fig. 25 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.

² http://en.wikipedia.org/wiki/Inverse_distance_weighting

³ <http://en.wikipedia.org/wiki/Kriging>

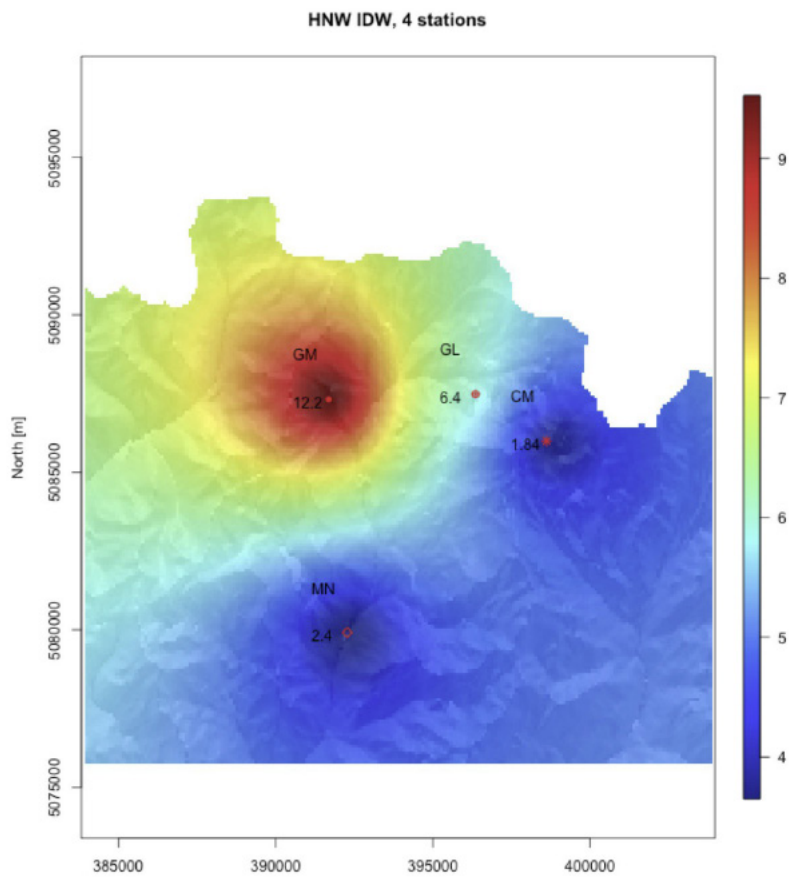


Figura 25: MeteolO: esempio di spazializzazione di HNW con IDW

In Tab. 3 vengono riportate le scelte sugli algoritmi di spazializzazione delle forzanti meteorologiche operati da MeteolO.

Variabile Meteo	Algoritmo spazializzazione
TA	LIDW_LAPSE with 20 nearest station
RH	IDW_LAPSE CST;RH
HNW	IDW_LAPSE with 0.1% increment with elevation
TAU _c	IDW
DW	IDW
VW	WIND_CURV
P	STD_PRESS

Tabella 3: Tipologia di spazializzazione dati meteo per MeteolO



4.5. GEOtop: evoluzione del manto nevoso

GEOtop (Endrizzi et al, 2014) è un modello idrologico fisicamente basato finalizzato alla simulazione dell'evoluzione della neve, del contenuto d'acqua e della temperatura del suolo. Sia $R(x,y, t^n)$ lo stato del sistema in un punto (x,y) del dominio di calcolo al tempo t^n . Lo stato al tempo t^{n+1} nello stesso punto viene determinato risolvendo le equazioni di conservazione della massa e dell'energia sottoposte alle forzanti meteorologiche al tempo t^{n+1} . In termini differenziali:

$$\frac{\partial R}{\partial t} + \vec{\nabla} \times \vec{F} + S = 0 \quad (6)$$

dove F rappresenta il flusso, $\vec{\nabla}$ rappresenta l'operatore di gradiente, \times il prodotto vettoriale e S il termine sorgente. I termini dell'eq. (6) per la neve vengono esplicitati nelle Tab. 4 e 5.

Variabile	Eq. Energia	U. d. M.	Eq. Massa	U. d. M.
R	$U = (\rho_i c_i \theta_i + \rho_w c_w \theta_w) \cdot T + L_f \rho_w \theta_w$	$J m^{-3}$	$\theta_w + \frac{\rho_i}{\rho_w} \theta_i$	-
F	$-\lambda \cdot \nabla T$	$W m^{-2}$	$-K$	$m s^{-1}$
F (cond. contorno)	$EB := SW + LW(T_s) + H(T_s) + ET(T_s, \theta)$	$W m^{-2}$	$HNW - E$	$m s^{-1}$
S	S_{en}	$W m^{-3}$	S_w	s^{-1}

Tabella 4: Termini delle equazioni di conservazione



Termine	Descrizione	U. d. M.
U	Energia interna	J m ⁻³
EB	Bilancio di energia superficiale	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 dell'acqua	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

Tabella 5: Descrizione delle variabili usate nelle equazioni di conservazione

In generale la modellazione della neve avviene attraverso una discretizzazione del manto nevoso per strati (layer) in cui, per ogni strato, viene effettuato un bilancio di massa ed energia. Possiamo distinguere 3 fasi:

1. Calcolo dei flussi radiativi e turbolenti tra l'atmosfera e la superficie della neve: essi rappresentano la condizione al contorno per l'equazione di conservazione dell'energia. In questa fase viene aggiornato il valore dell'albedo della neve sulla base dell'età della neve in giorni e dell'eventuale caduta di neve fresca (Dickinson et al., 1993). Endrizzi et al. (2014) riporta i dettagli dei calcoli utilizzati mentre in Tab. 6 vengono riportate le scelte operate per il modello GEOTop per il calcolo dei flussi turbolenti e della radiazione ad onda lunga incidente.



2. Calcolo dell'accumulo di neve fresca: la precipitazione può cadere come solida o liquida a seconda delle condizioni termo-igrometriche locali. In generale si può scrivere:

$$HNW := P_r + P_s \quad (7)$$

dove P_r e P_s (mm h^{-1}) indicano la parte di precipitazione che si stima cada come pioggia e neve rispettivamente. 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.

$$P_s(TA) = HNW - P_r(TA) \quad (8)$$

Tra T_1 e T_2 viene operata un'interpolazione lineare. La quantità di neve fresca HN viene quindi determinata moltiplicando per la densità della neve fresca ρ_{sn} (kg m^{-3}):

$$HN(t^n) = \frac{P_s(t^n) \cdot \rho_{sn}(t^n)}{\rho_w} \quad (9)$$

che viene parametrizzata in funzione di TA e VW in accordo a Jordan (1999). Infine, detto D_1 lo spessore dello strato superficiale di neve al tempo t^n , il nuovo spessore del layer varrà:

$$D_1(t^{n+1}) = D_1(t^n) + HN(t^n) \quad (10)$$

3. Calcolo del metamorfismo distruttivi e di compattazione: l'equazione governante la variazione dello spessore del layer di neve D risulta:

$$\frac{1}{D} \cdot \frac{\partial D}{\partial t} = C_1 + C_2 \quad (11)$$

dove C_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 soprastante. La compattazione avviene tenendo costante la massa di ciascun layer. Tali parametrizzazioni vengono riportate in Endrizzi et al. (2014).

4. Calcolo del metamorfismo di fusione e del "re-freezing": ogni strato di neve, se le condizioni termodinamiche lo impongono, può essere soggetto a fusione. In tal caso il nuovo spessore del layer viene calcolato in proporzione al nuovo contenuto di ghiaccio tenendo la densità del layer costante. In caso di rigelamento (re-freezing) dell'acqua, esso avviene a spessore del layer costante aumentandone la densità.
5. Rimodulazione dei "layer" di neve: tutte le variabili di stato vengono ricalcolate ed i layer ri-numerati secondo una formulazione che tiene conto della minima e massima massa ammissibile per ogni layer. I dettagli sono contenuti in Endrizzi et al. (2014).



Detto D_i lo spessore del layer i -esimo, alla fine del Δt di calcolo, è possibile quindi aggiornare l'altezza (HS) e l'equivalente in acqua (SWE) della neve attraverso le formule sotto riportate:

$$HS = \sum_{i=1}^N D_i \quad (12)$$

$$SWE = \frac{1}{\rho_w} \sum_{i=1}^N (\rho_{sn})_i \cdot D_i \quad (13)$$

dove $\rho_{sn} = \rho_w \theta_w + \rho_i \theta_i$ è la densità della neve del layer di neve i -esimo (Kg m^{-3}) ed N il numero totale di layer di neve nel punto.

Tipo di algoritmo	Descrizione	Valore
MoninObukhov	Atmospherical stability parameter: 1 stability and instability considered, 2 stability not considered, 3 instability not considered, 4 always neutrality	2
LWinParameterization	Formula for incoming long- wave radiation: 1 (Brutsaert, 1975), 2 (Satterlund, 1979), 3 (Idso, 1981), 4 (Idso+Hodges), 5 (Koenig-Langlo & Augstein, 1994), 6 (Andreas & Ackley, 1982), 7 (Konzelmann, 1994), 8 (Prata, 1996), 9 (Dilley 1998)	7

Tabella 6: Tipologia degli algoritmi di calcolo utilizzati da GEOtop



Parametro	Descrizione	Valore
SoilAlbVisDry	Albedo del suolo secco nel visibile	0.16
SoilAlbNIRDry	Albedo del suolo secco nel vicino infrarosso	0.33
SoilAlbVisWet	Albedo del suolo umido nel visibile	0.08
SoilAlbNIRWet	Albedo del suolo umido nel vicino infrarosso	0.16
SoilEmissiv	Emissività del suolo	0.99
ThresTempRain	Soglia di temperatura sulla precipitazione liquida	1.0
ThresTempSnow	Soglia di temperatura sulla precipitazione solida	0.5
DewTempOrNormTemp	Calcolo della soglia rispetto alla temperatura di rugiada	TRUE
AlbExtParSnow	Albedo extinction parameter	100.0
FreshSnowReflVis	Reflettività della neve fresca sul visibile	0.95
FreshSnowReflNIR	Reflettività della neve fresca sul infrarosso	0.65
IrriducibleWat SatSnow	Irreducibile water content	0.02
SnowEmissiv	Emissività della neve	0.98
SnowRoughness	Rugosità della neve	0.1
MaxSnowPorosity	Massima porosità della neve	0.7
DrySnowDefRate	Dry snow deformation rate	1.0
SnowDensityCutoff	Snow density cutoff	100.0
WetSnowDefRate	Wet snow deformation rate	1.5
SnowViscosity	Viscosità della neve	1.0E+6
MaxWaterEqSnowLayerContent	Max contenuto d'acqua equivalente ammissibile in un layer	10
MaxSnowLayersMiddle	Max contenuto d'acqua equivalente ammissibile nel layer centrale	5
SWEbottom	Contenuto d'acqua equivalente ammissibile nel layer in fondo	20
SWEtop	Contenuto d'acqua equivalente ammissibile nel layer superficiale	5

Tabella 7: Parametri fisici della neve usati in SnowMaps



5. Risultati

Le mappe di neve prodotte sono state graficate secondo quanto descritto in Tab. 1 e 2. I risultati del modello nei punti corrispondenti alla stazione nivometrica sono stati poi confrontati con i dati misurati per permettere un confronto visivo. Infine, è stato calcolata la somma delle deviazioni (root mean squared deviation – RMSD) per ottenere un indice identificativo della bontà della simulazione.

5.1. Periodo 01.11.2013-01.07.2014

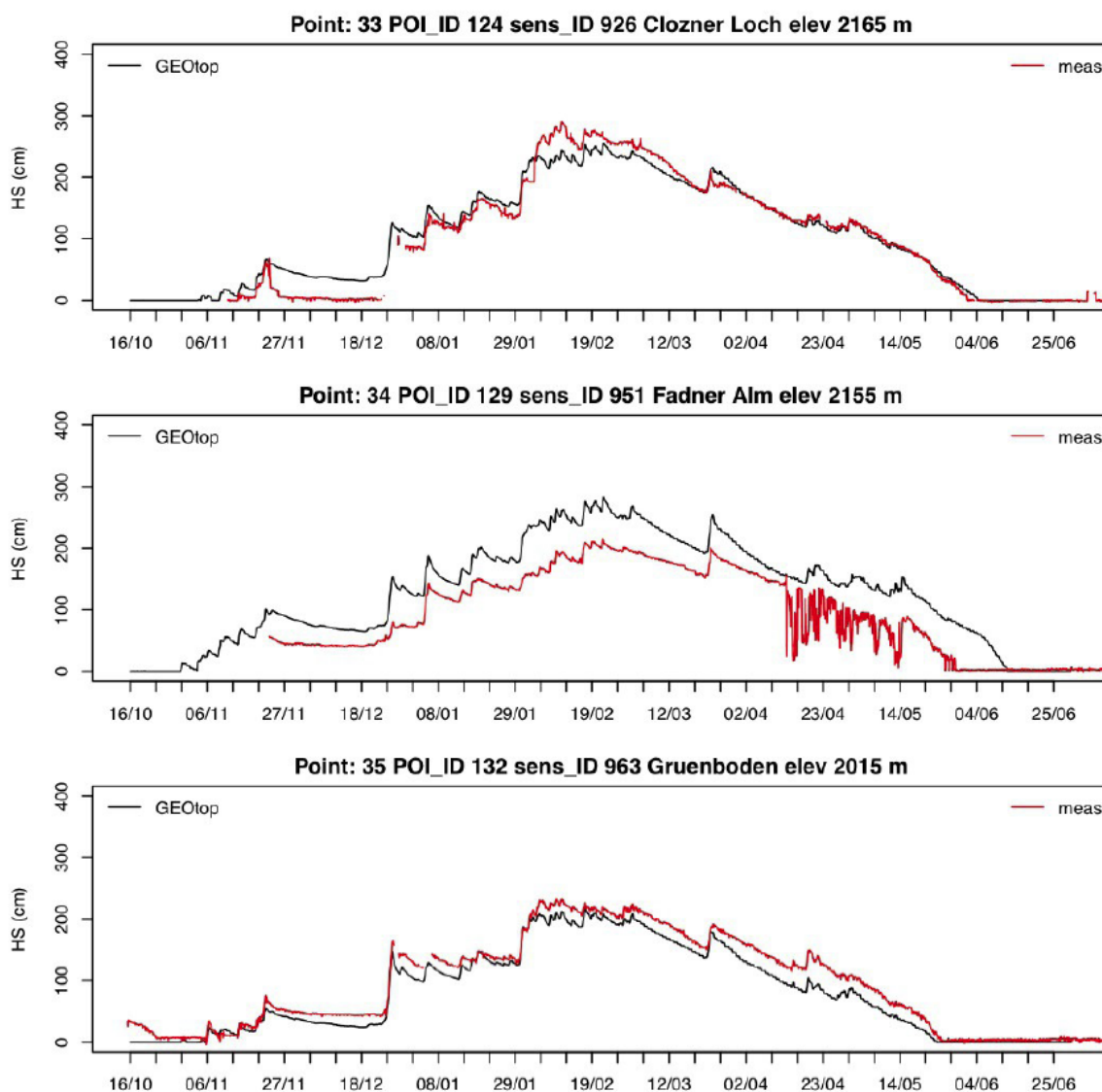


Figura 26: confronto simulato (linea nera) - misurato (linea rossa) in varie stazioni nivometriche per la stagione 2013-2014.



In Fig. 26 viene riportato un estratto del confronto visivo misurato (linea rossa) - modellato (linea nera) per la stagione 2013-2014. In Fig. 27 viene riportato il grafico del RMSD per le stazioni in Alto Adige, dal quale si evince che l'RMSD medio vale circa 30 cm, tuttavia c'è una correlazione positiva ($R^2=0.7$) con la quota della stazione, indicante una difficoltà a modellare la neve ad elevate altitudini.

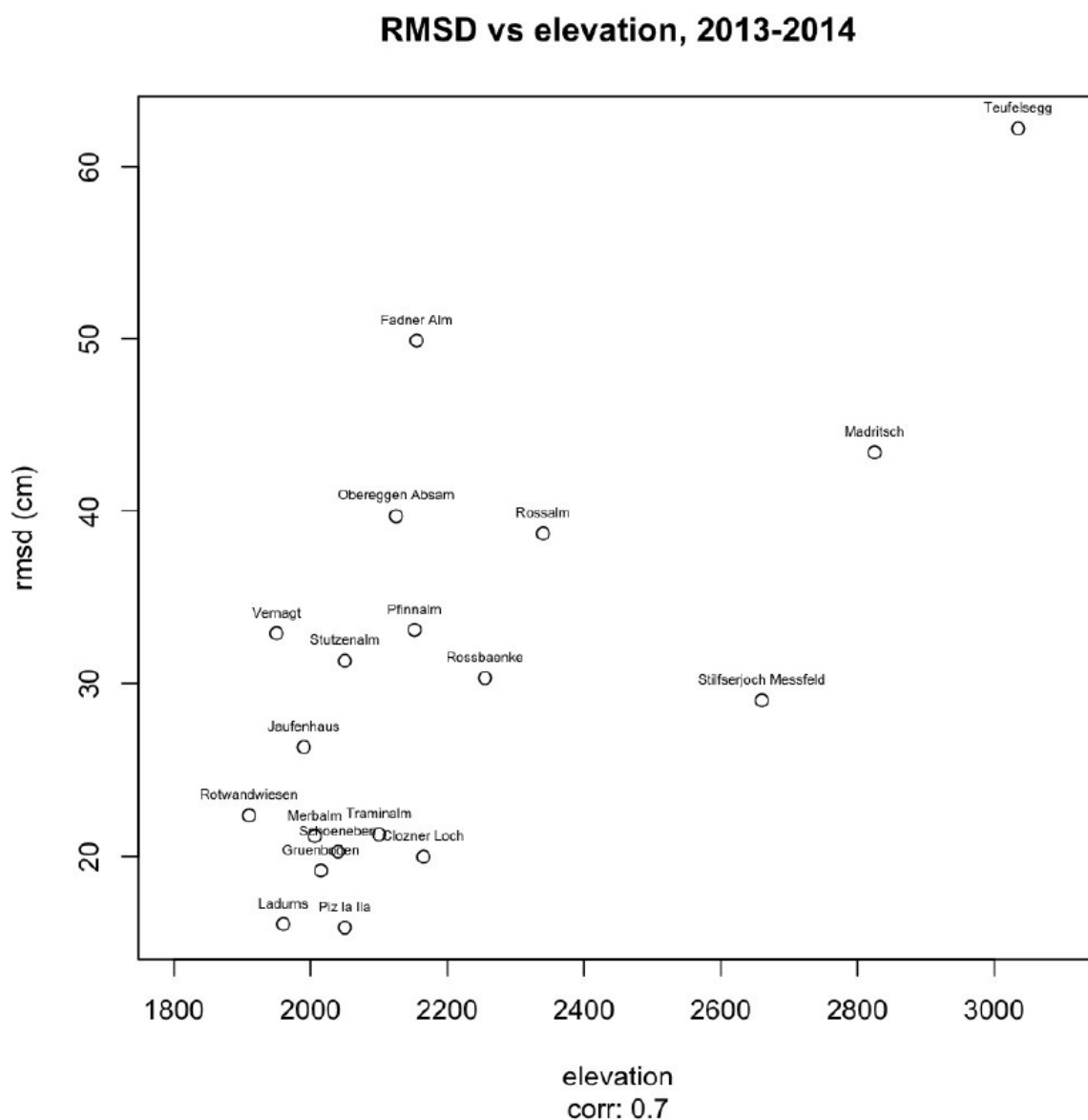


Figura 27: Root mean square deviation (RMSD) per le stazioni nivometriche, stagione 2013-2014

5.2. Periodo 01.11.2010-01.07.2011

In Fig. 28 viene riportato un estratto del confronto visivo misurato (linea rossa) - modellato (linea nera) per la stagione 2010-2011. In Fig. 29 viene riportato il grafico del RMSD per le stazioni in Alto Adige, dal quale si evince che l'RMSD medio vale circa 25 cm. Anche in questo caso si evince una correlazione positiva ($R^2=0.69$) con la quota della stazione, indicante una difficoltà a modellare la neve ad elevate altitudini.

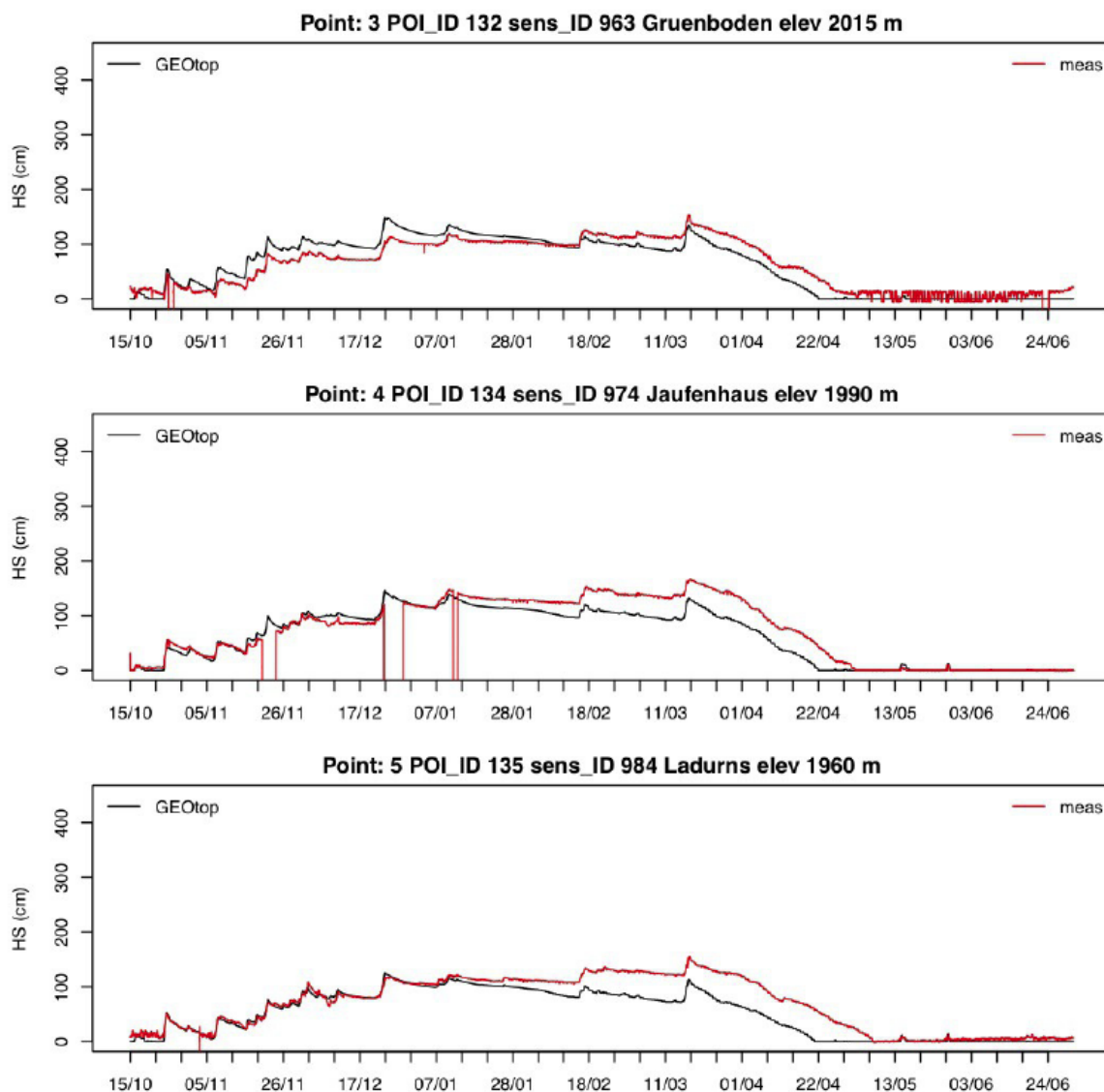


Figura 28: Confronto simulato (linea nera) - misurato (linea rossa) in varie stazioni nivometriche per la stagione 2010-2011

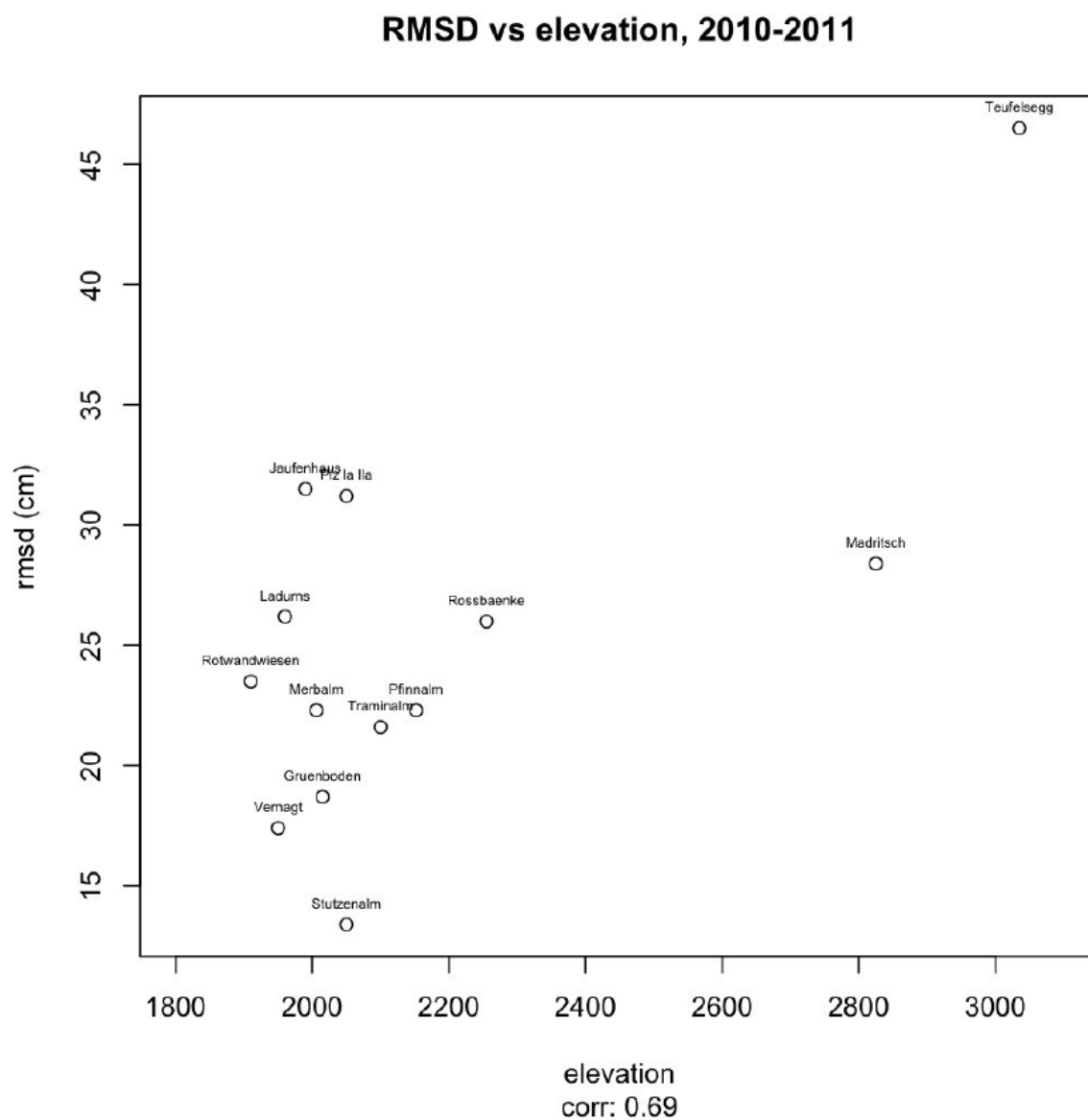


Figura 29: Root mean square deviation (RMSD) per le stazioni nivometriche, stagione 2010-2011



6. 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 necessita necessariamente di 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 sono generalmente sprovviste di dati, fornendo una stima dell’equivalente in acqua della neve in alta quota. Tale caratteristica ben si adatta alla peculiarità del territorio sudtirolese, caratterizzato da catene montuose elevate;
- 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;

SnowMaps può essere collegato ad un modulo di assimilazione dei dati satellitari per migliorare le stime sulla copertura nevosa, specialmente nel fondo valle. Inoltre, SnowMaps può essere usato in modo operativo per simulazioni in tempo reale in quanto tutti i componenti sono eseguibili tramite un comando “bash”. È quindi possibile operare uno “scheduling” automatico del sistema, tramite procedure “cron” da pianificare in giornate e/o orari predefiniti. L’utilizzo in modalità tempo reale richiede tuttavia una grande attenzione alla qualità dei dati meteorologici in ingresso. In particolare, occorre 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.

Infine, trattandosi di un modello fisicamente basato, occorre prevedere una formazione specifica del personale sui vari processi considerati, in modo da consentire una migliore valutazione ed interpretazione dei risultati.



7. Bibliografia

- 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 hydroelectrique de France.
- Dall'Amico, M., Endrizzi, S., Gruber, S., and Rigon, R.: GEOTop Users Manual. Version 1.0, Technical report, Mountain-eering Srl, Siemensstr. 19 Bolzano, Italy, 2011b.
- R. E. Dickinson, A. Henderson-Sellers, and P. J. Kennedy. 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, 1993.
- Endrizzi, S., Gruber, S., Dall'Amico, M., and Rigon, R.: 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. Discuss., 6, 6279-6341, doi:10.5194/gmdd-6-6279-2013, 2013.
- Jordan, R., Andreas, E. L., and Makshtas, A. P.: Heat budget of snow-covered sea ice at North Pole 4, J. Geophys. Res., 104, 7785–7806, 1999.
- Meyers, T. and Dale, R.: Predicting daily insolation with hourly cloud height and coverage., Journal of Climate and Applied Meteorology, 22, 537–545, 1983.
- Zanotti, F., Endrizzi, S., Bertoldi, G., and Rigon, R. (2004). The GEOTOP snow module. Hydrological Processes, 18(18):3667–3679.



8. Appendice 1

Nome Stazione	X (UTM32N)	Y (UTM32N)	Elevazione (m)
Fadner Alm	717838	5200867	2155
Clozner Loch	655593	5153087	2165
Gruenboden	660393	5184194	2015
Jaufenhaus	677414	5190356	1990
Ladurns	680117	5200634	1960
Madritsch	623901	5150187	2825
Merbalm	737193	5213916	2006
Obereggen Absam	695895	5137598	2125
Pfinnalm	744722	5192575	2152
Piz la Ila	722739	5160873	2050
Rossalm	737994	5173329	2340
Rossbaenke	638995	5147999	2255
Rotwandwiesen	757830	5173296	1910
Schoeneben	614326	5184760	2040
Stilfserjoch Messfeld	611802	5153797	2660
Stutzenalm	704653	5200382	2050
Teufelsegg	634696	5182751	3035
Traminalm	689061	5185368	2100
Vernagt	639220	5178015	1950

Tabella 8: Metadati delle stazioni nivometriche in Alto Adige



Nome Stazione	X (UTM32N)	Y (UTM32N)	Elevazione (m)
Altrei	682420	5127588	1209
Antholz - Obertal	737507	5195474	1320
Auer	677362	5135172	250
Bozen	680299	5153372	287.7
Bozen Terrassenamt	679434	5152254	278
Branzoll	677634	5141807	226
Bruneck	723674	5187588	821
Corvara im Gadertal i. B.	720262	5159216	1558
Dannelspitz	704371	5202375	2808
Deutschnofen	686486	5143630	1470
Elferspitz	613447.1	5181328.1	2926
Eyrs - Laas	626285	5164800	874
Gafaunboden	623356.9	5159745.6	2314
Grasstein	694445	5187499	850
Grawand	637347.6	5181169.2	3220
Gruenboden	660393	5184194	2015
Hintermartell	632465	5152929	1720
Hochebenkofel	749144	5174639.1	2906
Jaufenhaus	677414	5190356	1990
Jaufenkamm	676779	5190080	2145
Karerpäss	698761	5142305	1616
Ladurns	680117	5200634	1960
Laimburg	675993	5139088	224
Lengspitze	737880	5211573	3105
Madritsch	623901	5150187	2825
Marienberg	616288	5173583	1310
Merbalm	737193	5213916	2006
Montiggl	676369	5143924	530
Muehlwald	718972	5196967	1141
Naturns	652371	5167937	541
Pawigl	661472	5165961	1400
Pens	684309	5183531	1450
Pfelders	659362	5184669	1618
Pfinnalm	744722	5192575	2152
Pflersch	678592	5203835	1246
Pfunders	705920	5196174	1159



Piz la Ila	722739	5160873	2050
Piz Piscadu	716431.3	5156328.4	2985
Platt	666135	5187742	1147
Plose	709003	5175305	2472
Rauhjoch	661126	5188319	2926
Rein in Taufers	734591	5203425	1562
Ridnaun	675668	5197644	1350
Rittnerhorn	688384	5165385	2260
Rossbaenke	639141.1	5147874.1	2255
Rotwandwiesen	757830	5173296	1910
Salurn	668504	5122617	212
Sarnthein	680239	5167924	970
Schlanders	636292	5164894	698
Schoeneben	614326	5184760	2040
Schoentaufspitze	624957	5151116.7	3328
Sexten	756082	5177618	1310
Signalgipfel Wilder Freiger	666859	5204084	3399
St.Leonhard in Passeier	671444	5186398	644
St.Magdalena in Gsies	747278	5191964	1398
St.Martin in Thurn	721627	5173593	1150
St.Valentin auf der Haide	616720	5181393	1499
St.Veit in Prags	736938	5177815	1285
Stausee Zoggl-St.Walburg	652562	5156157	1142
Steinhaus	726201	5208726	1080
Sterzing FH	685786	5195277	943
Stutzenalm	704653	5200382	2050
Sulden	622375	5152605	1907
Taufers	734591	5203425	1562
Terenten	712423	5190536	1349
Teufelsegg	634696	5182751	3035
Traminalm	689061	5185368	2100
Vals	700296	5191661	1410
Vernagt	639220	5178015	1950
Weissbrunn	640591	5149772	1900
Wolkenstein	712245	5158389	1570
Zaufenkofel	618025	5156931	2475

Tabella 9: Metadati delle stazioni meteo

