

# STIMA della PRECIPITA in Siti di Alta

**Katia Cugerone  
e Paola Allamano**  
Politecnico di Torino

**Alessio Salandin  
e Secondo Barbero**  
ARPA Piemonte

La valutazione della risorsa idrica disponibile sotto forma di neve nei siti di alta quota avviene attraverso la determinazione dell'equivalente in acqua (SWE) della neve. Esso può essere stimato localmente tramite l'esecuzione di campionamenti manuali attraverso la valutazione della densità della carota campionata, oppure mediante l'utilizzo di modelli che riproducono l'evoluzione delle caratteristiche del manto nevoso.

Dalla necessità di miglioramento delle stime di SWE e delle modellazioni idrologiche del manto nevoso è nata una collaborazione di ricerca tra il Dipartimento Sistemi Previsionali dell'Arpa Piemonte ed il Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture del Politecnico di Torino, finalizzata alla conoscenza della riserva nevosa attraverso l'attivazione di siti sperimentali di misura e messa a punto di indicatori dello stato quantitativo delle risorse idriche.

Utilizzo dei dati  
sperimentali manuali  
e automatici di densità  
di neve fresca per la  
definizione di relazioni  
empiriche

# ZIONE quota



## INTRODUZIONE

L'importanza di quantificare la risorsa idrica immagazzinata nel manto nevoso risulta di particolare interesse per tutti quei soggetti deputati alla sua gestione, amministrazione e pianificazione ai fini agricoli, industriali e domestici, ma è anche attinente alle problematiche turistiche e ambientali.

Tali informazioni permettono infatti di conoscere la disponibilità spaziale e temporale della risorsa derivante dalla fusione della neve soprattutto per la regolazione dei livelli idrici all'interno delle dighe in alta quota.

La sottostima della precipitazione nevosa, dovuta in particolar modo alla variabilità del campo di vento o alla formazione di ghiaccio alla bocca del pluviometro è un problema tipico dei siti di alta quota e non permette quindi una corretta quantificazione della risorsa idrica.

In tali zone infatti la precipitazione sotto forma di neve, a causa delle sue caratteristiche, risulta essere più volatile e quindi più sensibile ai vortici ventosi che la allontanano dall'ingresso strumentale. In questo lavoro la valutazione della risorsa idrica nevosa è stata ottenuta utilizzando leggi di regressione lineare tra le grandezze principali (e maggiormente reperibili) implicate nel fenomeno in esame, ossia l'equivalente in acqua di neve fresca (e non quello di tutto il manto in quanto esso risulta essere già influen-

zato da fenomeni di metamorfismo e compattazione post deposito) oppure la sua densità, l'altezza di neve fresca e la temperatura della nevicata.

Le stime effettive dell'SWE o della densità e la loro elaborazione sono finalizzate a ricercare relazioni semplici e robuste, tali da poter essere agevolmente applicate in punti lontani da quelli in cui sono state tarate.

La costruzione di modelli di regressione di questo tipo si pone quindi l'obiettivo di dare indicazioni sul dato effettivo di precipitazione equivalente alla scala del punto a partire da misure tradizionali.

A tale scopo è stato impostato un duplice approccio, a partire dai dati di densità della neve provenienti da due stazioni automatiche strumentate con snow pillow e dai dati provenienti dai campi neve manuali.

## EVIDENZA DELLA SOTTOSTIMA DELLA PRECIPITAZIONE

Al fine di testare l'efficacia nella misurazione della precipitazione nevosa da parte dei pluviometri riscaldati in alta quota, sono stati considerati 35 campi neve manuali facenti parte del territorio piemontese e sono state individuate le stazioni automatiche con pluviometro riscaldato ad esse più prossime.

E' stata poi effettuata una selezione con lo scopo di scartare tutte le stazioni che pre-

sentassero una distanza dal pluviometro maggiore di 1,5 km e dislivello di 250 m, in modo tale da poter confrontare i relativi dati di precipitazione senza effettuare correzioni di alcun tipo, semplificando così le procedure di analisi.

Le stazioni corrispondenti a questi criteri sono riportate nella tabella di Fig. 1.

Così facendo è stato possibile confrontare i dati giornalieri di precipitazione ottenuti direttamente dai pluviometri delle stazioni automatiche e i dati di precipitazione ottenuti moltiplicando i valori di densità e l'altezza di neve fresca ricavata dalle stazioni manuali.

Per ogni stazione sono state individuate le stagioni di funzionamento di entrambi gli strumenti e sono state costruite le rispettive cumulate stagionali di precipitazione in modo tale che gli intervalli temporali di misura fossero gli stessi.

È stato applicato inoltre un filtro di temperatura al calcolo delle cumulate di precipitazione del pluviometro ( $T_{med} > 0^{\circ}C$ , con  $T_{med}$  = temperatura media della nevicata), in modo che venissero esclusi gli eventuali eventi di pioggia che, come tali, non possono essere registrati dal nivometro, utilizzando quest'ultimo solo per gli apporti nevosi.

Dal confronto tra le cumulate di precipitazione del pluviometro e quelle ricavate dal nivometro, solo in corrispondenza dei giorni di accertata nevicata, è stata ottenuta una percentuale di sottostima per stazione.

I risultati sono riportati in tabella di Fig. 2. Da quest'analisi si evince che le sottostime dell'SWE da parte del pluviometro sono evidenti e non trascurabili attestandosi nei casi analizzati tra il 30% e il 40%. Da qui nasce il tentativo di ricercare relazioni semplici che riescano a dare una stima dell'equivalente in acqua della neve in siti di alta quota tramite l'utilizzo di variabili di facile individuazione, al fine di andare a sopperire alle incertezze di misura della precipitazione da parte del pluviometro.

## SNOW PILLOW

La selezione dei siti per l'installazione di

Fig. 1 - Campi neve e stazioni automatiche analizzate.

CAMPO NEVE MANUALE	QUOTA (m s.l.m.)	STAZIONE AUTOMATICA DI RIFERIMENTO	QUOTA STAZIONE AUTOMATICA (m s.l.m.)	DISLIVELLO (m)	DISTANZA (km)
Entracque / Lagopiastra	960	Diga La Piastra	950	10	0,06
Canosio / Capoluogo	1260	Canosio	1220	40	0,40
Crissolo - Borgataserre	1380	Crissolo	1442	62	0,33
Carcoforo / Capoluogo	1289	Carcoforo	1290	1	0,12
Entracque / Chiotas	1970	Diga del Chiotas	2020	50	0,78
Macugnaga / Capoluogo	1280	Macugnaga Pecetto	1360	80	1,24

© AINEVA

STAGIONI	ENTRACQUE/ LAGO	CANOSIO/ CAPOLUOGO	CRISSOLO - BORGATASERRE	CARCOFORO/ CAPOLUOGO	ENTRACQUE/ CHIOTAS	MACUGNAGA/ CAPOLUOGO
98/99	-	-	-	-	-	-
99/00	-	32%	-	-	-	-
00/01	-	41%	-	35%	-	-
01/02	-	39%	-	20%	-	18%
02/03	28%	26%	-	23%	-	33%
03/04	15%	49%	-	24%	36%	-
04/05	23%	22%	42%	26%	32%	-
05/06	41%	49%	44%	45%	-	41%
06/07	32%	38%	-	-	36%	8%
07/08	37%	52%	28%	56%	-	-
08/09	-	-	29%	-	-	-
09/10	-	-	39%	41%	23%	10%
10/11	-	-	-	70%	-	-
11/12	-	-	-	65%	38%	37%
<b>TOTALE</b>	<b>30%</b>	<b>39%</b>	<b>37%</b>	<b>41%</b>	<b>33%</b>	<b>33%</b>

Fig. 2 - Calcolo della sottostima stagionale della precipitazione nevosa misurata al pluviometro rispetto al valore ottenuto dai campi neve.

© AINEVA



due snow pillow si è svolta assicurandosi che fossero contemporaneamente di alta quota (per garantire una significativa presenza di neve durante la stagione invernale), facilmente accessibili (per agevolare la fase di installazione, che avviene in assenza di neve, e di manutenzione) e appartenenti o prossimi a bacini idrografici per i quali fossero disponibili a valle misure affidabili di portata.

La scelta si è indirizzata verso le stazioni meteorologiche del Lago Pilone (2280 m s.l.m.) nel comune di Salice d'Ulzio (TO) e di Limone Pancani (2020 m s.l.m.) nel comune di Limone Piemonte (CN).

Al momento della selezione i siti erano già attrezzati con strumenti automatici per la misura della precipitazione, quali pluviometro riscaldato e nivometro.

Inoltre le due stazioni di misura erano

dotate di anemometro, radiometro, igrometro, termometro aria e neve; la registrazione dei dati avviene in continuo e con intervallo di campionamento semiorario (Fig. 3).

Entrambe le stazioni sono poi state dotate di uno Snow Pillow (Intermountain Env.). Il funzionamento dello strumento si basa sulla misura del peso del manto nevoso e quindi dell'acqua equivalente allo stra-

Sopra, fig. 3 - Localizzazione delle 2 stazioni meteorologiche in cui è stato installato lo snow pillow.

A sinistra, fig. 4 - Stazione meteorologica di Lago Pilone con lo snow pillow.



to depositato (SWE). Si ottiene così una misura di SWE la cui affidabilità aumenta all'aumentare del carico, a meno che non vi siano strati ghiacciati in grado di sostenere parte del peso del manto nevoso (Fig. 4).

Le stagioni di misura analizzate sono quattro in totale a partire dal 2008 fino al 2012. Per quanto riguarda lago Pilone è stata scartata la stagione 2011-2012 per via di un'avaria del trasduttore di pressione.

Il sito di Limone Piemonte, invece, è entrato in funzione a partire dalla stagione 2009-2010.

Nei siti oggetto delle installazioni sono state eseguite misure manuali di densità del manto nevoso per verificare il corretto funzionamento degli snow pillow.

Le misure, normalmente 3 per ogni rilievo manuale, sono state effettuate entro un raggio di dieci metri dalla stazione vengono quindi mediate allo scopo di eliminare eventuali errori casuali.

Operativamente per il rilievo manuale deve essere prima sondata la profondità del manto nevoso nell'intorno significativo del punto di misura con l'apposito sondino da valanga centimetrato.

Questa operazione permette di effettuare il carotaggio in un punto il più possibile significativo dell'innevamento medio e nello stesso tempo di conoscere in anticipo la profondità d'infissione del tubo carotatore e l'eventuale necessità di procedere allo scavo di una trincea per effettuare campionamenti in successione. Per profondità di carotaggio inferiori a 80 cm, infatti, la lunghezza dello strumento permette di effettuare un unico campionamento.

Nel caso in cui l'altezza del manto nevoso da campionare sia superiore all'altezza dello strumento, si procederà alla realizzazione, per fasi successive di approfondimento, di una trincea di profondità pari all'altezza del tubo carotatore, fino al raggiungimento del suolo.

Il campione di manto nevoso deve essere estratto nel modo più indisturbato possibile, evitando di comprimere o disperdere la neve oggetto del carotaggio.

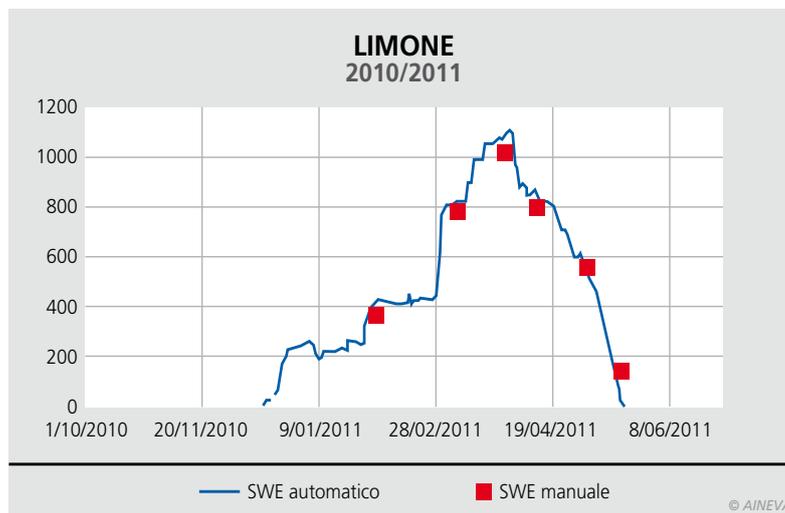


Fig. 6 - Confronto tra la misura automatica di SWE e le misure manuali effettuate in 6 diversi periodi dell'anno 2011.



Fig. 7 - Criterio per la selezione degli eventi con precipitazione nevosa.

Una volta estratto, il tubo carotatore, con tappo in acciaio applicato, deve essere capovolto e appeso, attraverso gli appositi buchi presenti nella ghiera di infissione, ad un dinamometro per misurarne il peso e quindi successivamente calcolare la densità media (Fig. 5).

A titolo di esempio si riporta nel seguente grafico il confronto tra l'SWE misurato e quello risultante da campagne di misura manuali per la stazione di Limone Piemonte nel 2010/11. In questa stagione, che presenta accumuli nevosi massimi che superano i 3 metri a fine marzo, si può notare la quasi perfetta congruenza tra le misure automatiche e quelle manuali (Fig. 6).

## CRITERI DI SELEZIONE DEGLI EVENTI

La procedura di selezione degli eventi con precipitazione nevosa prevede di prendere in considerazione solo gli eventi che, in un intervallo di 24 ore, portano contemporaneamente ad un incremento di spessore del manto ( $\Delta H$ ) di 2 cm (precisione strumentale), oppure 4 cm (selezione più severa) e ad un incremento di Snow Water Equivalent ( $\Delta SWE$ ) di almeno 2 mm (precisione strumentale) (Fig. 7).

Le serie originali sono state esplorate di mezz'ora in mezz'ora con una finestra mobile di ampiezza variabile (su cui sono calcolati gli incrementi di H ed SWE, rife-

Nella pagina a fianco, fig. 5 - Rilievo manuale.

riti poi all'istante finale dell'intervallo) e le condizioni ricontrollate ad ogni avanzamento della finestra.

A valle di questo si è stabilito, tra tutti gli eventi possibili (cioè quelli che rispettano le condizioni del protocollo), di scegliere solo quelli caratterizzati dal massimo incremento di SWE sull'intervallo  $2\Delta t$

Fig. 8 - Parametri della relazione stimata per i 2 siti con snow pillow.

SNOW PILLOW	
a	b
-773,25	3,38

Fig. 9 - Campi neve manuali selezionati.

DENOMINAZIONE	PROV.	QUOTA (m)
Moncenisio/Lago	TO	2000
Pragelato/Traverses	TO	1570
Usseglio/Capoluogo	TO	1261
Usseglio/L.Torre	TO	2300
Alagna/Cap.	VC	1180
Carcoforo/Cap.	VC	1289
Antrona/A.Cavalli	VB	1501
Antrona/Lagocamposecco	VB	2325
Formazza/Ponte	VB	1301
Formazza/Toggia	VB	2165
Formazza/Lagosabbione	VB	2470
Formazza/Lagovannino	VB	2177
Macugnaga/Cap.	VB	1280
Acceglio/Saretto	CN	1540
Acceglio/Chiappera	CN	1661
Bellino/Ribiera	CN	1500
Canosio/Capoluogo	CN	1260
Castelmagno/Chiappi	CN	1630
Vallepesio	CN	935
Crissolo-Borgataserre	CN	1380
Elva/B. Tameira	CN	1700
Elva/B. Taclari	CN	1550
Entracque/Lagopiasra	CN	960
Entracque/Chiotas	CN	1970
Entracque-Casermette	CN	880
Limone/Limonetto	CN	1300
Limonequota 1400	CN	1400
Marmoravernetti	CN	1225
Pontech/L.Castello	CN	1589
Roburent/Pra'	CN	1014
Sampeyre/Capoluogo	CN	930
Valdieri/T.Gaina	CN	1075
Vernante/Renetta	CN	900
Vinadio/Bagni	CN	1270
Vinadio/Riofreddo	CN	1200

centrato nell'istante  $t$  a cui gli incrementi sono riferiti.

## STIMA DEI COEFFICIENTI PER LA VALUTAZIONE INDIRETTA DELL'SWE

L'obiettivo principale di questo lavoro consiste nella definizione di relazioni semplici e parsimoniose per la stima dell'equivalente in acqua della neve fresca in siti dotati solo di strumentazione tradizionale (termometro, nivometro).

A tale scopo, i dati degli eventi relativi alle cinque stagioni di misura sono stati riuniti in un unico campione e studiati secondo modelli di regressione.

La legge di regressione lineare che garantisce una miglior stima individua la relazione tra temperatura e densità di neve fresca. L'utilizzo infatti di altri parametri meteorologici utili alla definizione della relazione per la stima dell'SWE (ad esempio la velocità del vento e l'umidità relativa) sono risultati non significativi.

A partire dalla relazione lineare individuata è possibile ricavare facilmente il valore di SWE in mm effettuando una semplice moltiplicazione per l'altezza di neve fresca  $H$ . La densità  $\rho$  (kg/mc) infatti viene calcolata come

$$\rho = a + bT_{med} \quad (\text{formula 1})$$

dove  $a$  e  $b$  sono due coefficienti stimati e  $T_{med}$  la temperatura media dell'aria espressa in gradi Kelvin. Di conseguenza l'SWE (mm) viene calcolato come prodotto tra l'altezza  $H$  di neve fresca (espressa in metri) e la densità precedentemente calcolata

$$SWE = H(a + bT_{med}) \quad (\text{formula 2})$$

Tale legge è stata applicata considerando i due criteri di selezione degli eventi descritti precedentemente, cioè considerando variazioni di altezza di neve  $\Delta H$  maggiore di 2 cm o maggiore di 4 cm, operando sui dati di tutte e due le stazioni non trovando sostanziali differenze. Il risultato individuato per  $\Delta H$  maggiore di 4 cm è riportato nella tabella di Fig. 8.

## CAMPI NEVE MANUALI

I dati a disposizione per un'ulteriore analisi provengono da 65 campi neve manuali situati nelle zone montuose del territorio piemontese e nelle vallate in prossimità con quote che variano dai 700 ai 2700 m s.l.m..

Ogni misura (di cui sono noti giorno e ora del rilevamento) è generalmente comprensiva dei valori di temperatura minima,

massima e media (delle 24 ore precedenti la nevicata), spessore di neve fresca e densità. Lo scopo dell'analisi è la ricerca di una relazione valida al fine di avere una stima della risorsa idrica immagazzinata in alta quota sottoforma di neve e quindi dello Snow Water Equivalent (SWE), a partire da misure indirette, quali ad esempio la temperatura o l'altezza di neve fresca. Del dataset totale di 65 campi neve sono stati selezionati 35 siti che per continuità delle serie di dati ed affidabilità sono stati considerati per le successive analisi. Nella tabella di Fig. 9 è riportato l'elenco delle stazioni analizzate.

I dati degli eventi relativi alle 35 stazioni di misura sono stati riuniti in un unico campione e studiati secondo modelli di regressione lineare.

La legge di regressione lineare che garantisce la miglior stima è data dalla relazione tra temperatura e densità di neve fresca riportata nell'equazione 1.

A partire da essa è possibile ricavare facilmente il valore di SWE effettuando una moltiplicazione per l'altezza di neve fresca  $H$  (come utilizzato anche nella relazione ricavata con gli snow pillow, formula 2). I risultati ottenuti sono riportati in tabella di Fig. 10.

Risulta quindi efficace rappresentare graficamente la robustezza della legge utilizzata: nel grafico in figura 9 riportato si osserva la relazione tra l'SWE dedotto dalla legge di regressione e l'SWE ottenuto dalle misurazioni manuali come moltiplicazione tra densità osservata e altezza di neve fresca misurata (Fig. 11).

## CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

In questo studio sono stati considerati aspetti sperimentali ed operativi relativi alla valutazione della riserva idrica nivale in ambiente alpino.

Lo studio è consistito in una parte sperimentale, incentrata sull'installazione di due snow pillow, strumenti per la misura della precipitazione nevosa equivalente, in due punti di misura.

A questa fase ne è seguita una di analisi

dei dati e di impostazione dei modelli per la ricostruzione indiretta del dato di SWE. Le relazioni che sono state proposte esprimono la dipendenza tra l'equivalente in acqua della neve fresca, ovvero considerata prima dell'instaurarsi di fenomeni di compattazione e metamorfismo e il dato relativo al suo spessore misurato in continuo dal nivometro.

I modelli proposti per questa determinazione indiretta si prestano ad essere trasportati in punti diversi da quelli in cui sono stati concepiti, purché dotati di nivometro, grazie al requisito di robustezza che è stato perseguito.

In un secondo momento sono stati invece analizzati i dati provenienti da campi neve manuali con lo scopo di una quantificazione della riserva idrica tramite variabili indirette di facile reperibilità.

Anche in questo caso sono stati impostati modelli per la determinazione indiretta del dato di SWE.

La comparazione tra dati provenienti da stazioni manuali e da stazioni automatiche ha messo in luce come la legge che più si presta alla stima dell'SWE risulti essere una legge lineare che lega densità di neve fresca alla temperatura media dell'evento, in quanto i coefficienti ottenuti risultano essere più stabili e invariati da stagione a stagione, da sito a sito. Tale legge verrà studiata in maniera più dettagliata in analisi future.

L'importanza del contributo qui proposto sta nella possibilità di quantificare l'entità della sottostima nelle misure pluviometriche in siti di alta quota. L'entità di tale sottostima può essere molto elevata e si attesta tra il 30 e il 40% nel caso di pluviometri riscaldati in siti interessati da precipitazione nevosa per buona parte dell'anno. In prospettiva, l'utilizzo pratico della relazione empirica precedentemente illustrata (formula 2) può condurre alla ridefinizione del bilancio idrologico in molti dei bacini alpini, nei quali la stima degli afflussi risulta affetta da elevata incertezza.

## Bibliografia

- ALLAMANO P., CLAPS P., Conoscenza della riserva idrica nevosa anche attraverso l'attivazione di siti sperimentali di misura e messa a punto di indicatori dello stato quantitativo delle risorse idriche", Relazione finale del Progetto.
- MARKS, D., COOLEY, K., ROBERTSON, D., WINSTRAL, A., Long-term database, Reynolds Creek Experimental Watershed, Idaho, United States, Water Resources Research, 11:2835-2838, 2001.
- VALT M., CAGNATI A., CORSO T., Stima dell'equivalente in acqua, Neve e Valanghe, Vol. 59, pp. 24-33, 2006.

### CAMPI NEVE MANUALI

a	b
-1173,33	4,77

© AINEVA

Fig. 10 - Parametri della relazione stimata per i campi neve manuali.

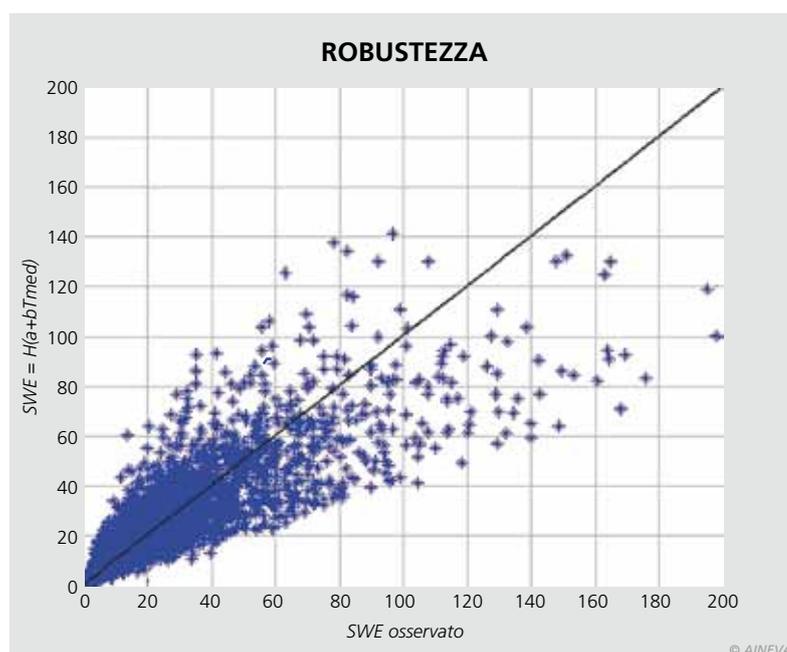


Fig. 11 - Confronto tra SWE osservato e ricavato dalla formula.