

IL PROGETTO SNOWR KNOWN

Metodologie innovative per la stima dello SWE a scala di bacino

Paola Dellavedova

Fondazione Montagna sicura, Courmayeur (AO)

Barbara Frigo

Fondazione Montagna sicura, Courmayeur (AO)
DISTR, Politecnico di Torino

Alberto Godio, Roberto Rege

DITAG, Politecnico di Torino

**Ivan Bevilacqua, Stefano Ferraris,
Maurizio Previati ed**

Enrico Borgogno Mondino

DEIAFA, Università degli Studi di Torino

Edoardo Cremonese,

Umberto Morra di Cella

Arpa, Valle d'Aosta

Il progetto "SnowRKnown", finanziato dalla Fondazione CRT ha avuto lo scopo di investigare il volume idrico equivalente di un manto nevoso di copertura (Snow Water Equivalent - SWE) a scala di bacino con l'utilizzo di metodologie innovative.

La stima dello SWE, prodotto tra l'altezza del manto nevoso ed il rapporto fra le densità della neve e quella dell'acqua, è solitamente basata su misure puntuali effettuate con tecnica tradizionale (escavazione manuale di trincee in manto nevoso e successivo rilievo dei profili verticali di densità per ciascuno strato). Quest'ultima risulta però molto onerosa sia per le tempistiche di realizzazione che per il forte impiego di risorse umane, soprattutto se applicate ad ampi bacini alpini.

Il progetto ha quindi previsto la verifica dell'uso di metodologie elettromagnetiche, quali il georadar (*Ground Penetrating Radar- GPR*), la riflettometria nel dominio del tempo (*Time Domain Reflectometry- TDR*) e la riflettometria del contenuto idrico (*Water Content Reflectometry- WCR*) per una rapida misura indiretta delle proprietà fisiche della neve necessarie alla stima dello SWE.

Lo studio è stato condotto attraverso ripetute campagne di rilievi effettuate su una porzione di bacino del Breuil (Valtournenche - AO) durante l'aprile 2008 e l'aprile 2009.



INTRODUZIONE

In quest'ultimo trentennio è andata via via aumentando la sensibilità verso la risorsa idrica nivo- glaciale, soprattutto al fine di una sua più razionale utilizzazione per usi civili, potabili, irrigui, energetici, nonché a fini scientifici, per una miglior gestione delle problematiche relative ai modelli di deflusso idrico e al monitoraggio dei cambiamenti climatici (v. Birkeland 2001, Conway and Abrahamson 1984). Ciò ha portato alla necessità di stimare in modo più speditivo e per ampi bacini, il volume idrico equivalente, definito come il prodotto dell'altezza del manto nevoso ed il rapporto tra la densità della neve e dell'acqua. Il volume idrico equivalente viene solitamente stimato a seguito di misure puntuali con tecnica tradizionale le quali prevedono l'escavazione manuale di trincee nel manto nevoso e il rilievo dei profili verticali di densità. La tecnica tradizionale, quando applicata a scala di bacino, risulta onerosa a causa della variabilità della morfologia della copertura nevosa (ad es., esposizione, pendenza e quota), per le tempistiche di rilievo e il rilevante impiego di risorse umane.

Per valutare il volume idrico equivalente (SWE) su un vasto territorio, occorre quindi utilizzare strumenti più veloci, affidabili ed accurati per la misura dei parametri nivologici della copertura, quali spessore, densità del manto e permittività apparente del "sistema neve". Sulla base di queste motivazioni, nel biennio di attività 2008/2009 del progetto "SNOWKNOWN: applicazione di metodologie innovative per la stima della variabilità spaziale e temporale dello spessore e della densità del manto nevoso a scala di versante e di bacino" – Bando Alfieri – finanziato dalla Fondazione CRT, si è proceduto alla verifica dell'applicabilità ed affidabilità di metodologie d'indagine non convenzionali e speditive per la caratterizzazione dello Snow Water Equivalent su ampia scala.

Lo studio, di carattere prevalentemente sperimentale, si è svolto nel test site del Breuil (Valtournenche - Valle d'Aosta) grazie a rilievi congiunti di metodologie elettromagnetiche (GPR, TDR e WCR) e manuali per la caratterizzazione dello spessore e della densità della neve. Tali attività sono state realizzate in collaborazione tra la *Fondazione Montagna sicura - Montagne sûre*, il DITAG (Dipartimento di Ingegneria del Territorio, dell'Ambiente e delle Geotecnologie) del Politecnico di Torino, la sezione di Idraulica Agraria del DEIAFA (Dipartimento Economia e Ingegneria Agraria, Forestale e Ambientale) della Facoltà di Agraria dell'Università degli Studi di Torino e l'Agenzia Regionale per la Protezione dell'Ambiente della Valle d'Aosta, grazie al supporto logistico della società d'impianti a fune Cervino S.p.a., il Comune di Valtournenche (AO) e la Società delle Guide del Cervino.

L'INDAGINE

Il bacino di indagine

Lo studio si è articolato a scala di bacino su una parte di comprensorio di Breuil - Cervinia (Valtournenche, Valle d'Aosta). La scelta di indagare pendii appartenenti a tale comprensorio (ovviamente in condizioni di neve naturale, esterna alle piste da sci) è stata dettata dalla loro complessa morfologia causata dall'attività glaciale

(tuttora in atto) che ha generato profonde depressioni alternate a rilievi localizzati, sia dai favorevoli fattori logistici e di accessibilità del sito grazie alla presenza degli impianti a fune.

L'area di indagine è stata individuata tra il Colle Superiore di Cime Bianche a quota 2.980 m s.l.m., Plateau Rosa a quota 3.450 m s.l.m. e il Lago Goillet a quota 2.516 m s.l.m.. Allo scopo di ottimizzare i rilievi, essa è stata suddivisa in tre differenti settori d'indagine per comuni caratteristiche morfologiche, esigenze di sicurezza del rilievo e accessibilità:

- **settore n. 1** *Colle superiore di Cime Bianche - Lago del Goillet* (da quota 3.000 m a 2.700 m s.l.m.);
- **settore n. 2** *Plateau Rosa - Laghi di Cime Bianche* (da quota 3.450 m a 3.150 m s.l.m.);
- **settore n. 3** *Plateau Rosa - Lago del Goillet* (da quota 3.470 m a 2.700 m s.l.m.).

Le campagne di rilievo

L'attività di indagine è articolata in 2 campagne di misure (aprile 2008 e 2009), ciascuna di tre giorni, secondo il seguente schema:

- **rilievo tradizionale** mediante misura puntuale dello spessore del manto nevoso con sonde graduate ed esecuzione di trincee per la stima della densità di campioni di neve al fine della verifica e delle informazioni ottenute dai metodi non convenzionali;
 - **rilievo GPR** mediante esecuzione di una serie di sezioni radar per la stima dello spessore del manto nevoso;
 - **rilievo TDR** con misure con sonde verticali e orizzontali per la stima dei parametri elettromagnetici e per la calibrazione della correlazione con la densità della neve;
 - **rilievo WCR** con misure in continuo grazie a strumentazione fissa per il monitoraggio dell'evoluzione temporale del contenuto idrico del manto nevoso e con sistemi portatili per la realizzazione di misure periodiche variamente distribuite all'interno dell'area di indagine.
- L'obiettivo del primo anno ha consen-

tito di testare *in situ* la strumentazione verificandone la propensione all'impiego in condizioni tecniche e logistiche complesse. La verifica della bontà dei dati del rilievo dell'aprile 2008 ha quindi portato alla massimizzazione del numero di misure *in situ* durante l'aprile 2009 consentendo la raccolta di numero di dati adeguato per irrobustire le correlazioni ricavate dall'analisi dei dati raccolti nel 2008 e verificare le possibili correlazioni di altezza neve e densità con gli aspetti morfologici quali quota, esposizione e morfologia.

Le condizioni nivo-meteorologiche

Il bacino di indagine è solitamente caratterizzato da una copertura nevosa eterogenea indotta da uno spiccato metamorfismo, con elevata stratificazione in zone di accumulo e croste superficiali, a causa dell'elevata quota (tra i 2.500 ed i 3.400 m s.l.m.) e delle critiche condizioni meteorologiche, caratterizzate da venti intensi, forte insolazione e temperature molto rigide. Nel periodo 1990-2005 (dati stazione meteorologica automatica "Lago Goillet" - 2.526 m s.l.m.), lo spessore medio del manto nevoso ha registrato potenze variabili tra i pochi centimetri tipici dell'inizio di ottobre, fino a valori massimi di circa 170-180 cm in marzo. Il mese di aprile ha sempre evidenziato invece una condizione stazionaria intorno ai 150 cm (da qui la scelta di effettuare il rilievo in aprile) con l'avvio del processo di fusione a fine mese ed una conseguente rapida diminuzione dello spessore del manto anche per tutto il mese di maggio. La temperatura media invernale a questa quota nel trentennio considerato si è attestata intorno ai -5°C. Durante le due stagioni di indagine, la stazione automatica "Lago Goillet" ha registrato, per la stagione 2007/08, 52 giorni con precipitazione di neve fresca per un totale di 533 cm e, per l'anno 2008/09, 80 giorni con precipitazione di neve fresca per un cumulo complessivo di 1270 cm. Il manto nevoso è stato soggetto all'azione del vento con trasporto o fusione per un numero di giorni pari a 38 nella stagione 2007/08 e 55 nella stagione 2008/09.

Questa forte disparità ha consentito di osservare una netta differenza della copertura nevosa: sebbene infatti in entrambe le annate l'andamento dell'altezza della neve al suolo sia stato estremamente variabile e differente, il primo inverno (2007/08) è stato caratterizzato da un manto nevoso discontinuo con molte zone erose, mentre il successivo (2008/09) ha presentato una copertura totale e diffusa del suolo grazie ad un manto nevoso pressoché omogeneo (Fig. 1).

Durante la fase di rilievo, per entrambe le campagne d'indagine, la temperatura della neve è sempre stata inferiore a 0°C, con un manto nevoso caratterizzato da assenza di acqua di fusione.

Rilievo con tecnica classica

In entrambe le campagne d'indagine, le misure di spessore e densità del manto nevoso mediante tecnica tradizionale erano finalizzate a verificare l'affidabilità dei risultati delle indagini GPR e TDR. In particolare sono stati rilevati:

a) altezza del manto nevoso

misurata puntualmente grazie all'uso di sonde metalliche di altezza massima pari a 3 m, graduate e con punta conica. Si sottolinea che gli spessori di neve superiori ai 3 m sono stati semplicemente identificati con la dicitura "altezza > 3m";

b) densità dei singoli strati del manto nevoso

misurata nei singoli strati del profilo verticale mediante campionamento orizzontale (cfr. sotto);

c) densità media del manto nevoso

(Fig. 2) misurata tramite il valor medio della densità della neve ottenuta dal profilo verticale successivo all'escavazione di trincee in manto nevoso. La misura della densità è stata ottenuta carotando orizzontalmente ogni 50 cm il manto nevoso dal suo limite superiore al suolo, lungo il profilo verticale della trincea (senza considerare la stratigrafia del manto nevoso), mediante un cilindro metallico di volume pari a 0,5 dm³.

La Tabella 1 riporta il numero di rilievi svolti per la misura dell'altezza del manto nevoso e densità effettuati durante le campagne

d'indagine 2008 e 2009 grazie all'impiego di 15-18 tecnici al giorno per ciascuna delle 3 giornate di indagine a campagna.

Il georadar

Rilievi geofisici di tipo elettromagnetico per la caratterizzazione del manto nevoso sono ormai piuttosto diffusi, sia per la stima dello spessore della neve (Godio 2008), sia per la caratterizzazione degli strati e delle proprietà meccaniche del manto (Koh et al. 1996, Marshall et al. 2007). In particolare, l'indagine georadar, applicata in questo studio, consiste nella misura delle modalità di propagazione di un segnale elettromagnetico ad alta frequenza (nel caso specifico attorno a 900 MHz), allo scopo di stimare lo spessore e le

Nella pagina precedente, fig. 3 - Rilievo GPR - aprile 2009. In primo piano l'antenna TX-RX; in secondo piano l'unità di controllo.

Fig. 1 - Confronto fotografico della situazione nivo-meteorologica durante le campagne d'indagine negli inverni 2007/08 e 2008/09. (a) Cervinia 5 Aprile 2008 (b) Cervinia 7 aprile 2009.



Fig. 2 - (a) Escavazione di trincea per rilievo della densità media del manto nevoso con tecnica classica. (b) Profilo verticale della trincea per la misura della densità media del manto nevoso. Sono visibili le impronte lasciate dal carotatore [Campagna rilievo 2009].

Tab. 1

NUMERO DI RILIEVI CON TECNICA CLASSICA PER LA MISURA DELL'ALTEZZA DEL MANTO NEVOSO E DENSITÀ EFFETTUATI DURANTE LE CAMPAGNE D'INDAGINE 2008 E 2009			
RILIEVI TRADIZIONALI		APRILE 2008	APRILE 2009
Altezza manto nevoso	Settore 1	191	601
	Settore 2	238	440
	Settore 3	118	823
	Totale bacino	547	1.864
Densità	Settore 1	5	6
	Settore 2	3	3
	Settore 3	2	4
	Totale bacino	10	13

proprietà elettromagnetiche del materiale (neve) oggetto dell'indagine.

La neve dal punto vista elettromagnetico si comporta come un materiale elettricamente resistivo caratterizzato da permittività elettrica dipendente dalla densità e dal contenuto in acqua libera: in neve asciutta, i valori di permittività elettrica relativa presentano valori compresi tra 1.5 (neve soffice) a 3 (ghiaccio) sono infatti direttamente correlabili ai valori di densità (Evans 1965). La strumentazione georadar di riferimento consiste in una coppia di antenne (trasmettente-ricevente) e di un'unità centrale che controlla sia l'invio dell'impulso radar che la ricezione dello stesso, permettendo di acquisire, visualizzare e registrare i segnali captati (Fig. 3, vedi foto a pagina 27).

Il metodo di acquisizione più diffuso è quello per riflessione semplice, dove la coppia di antenne viene tralata in superficie lungo un profilo prestabilito e il segnale captato si riferisce alla parte di energia del segnale elettromagnetico che propagatosi all'interno della neve, viene riflessa all'interfaccia tra la neve e il substrato e torna indietro. La stima del tempo di percorso del segnale elettromagnetico riflesso, noto il valore di velocità delle onde elettromagnetiche nel mezzo, permette di individuare lo spessore del manto nevoso. Le misure GPR sono state realizzate attraverso una serie di dispositivi radar con sorgente impulsata: in particolare si sono utilizzati georadar GSSI (USA) e IDS (Italia) entrambi operanti con antenne a frequenza principale di 900 MHz. Le misure sono state realizzate lungo una serie di profili nell'inverno 2007-2008 e ripetute nelle stesse aree nell'inverno 2008-2009. Nel primo inverno il rilievo ha consentito l'acquisizione di circa 9 km di profili radar; nel

secondo inverno si sono registrati circa 15 km di profili georadar.

Ciascuna informazione puntuale (traccia radar) è stata georeferenziata per mezzo di dispositivi GPS con acquisizione in modalità RTK. L'elaborazione dei dati radar, attraverso procedure tradizionali di filtraggio e amplificazione delle singole tracce radar, ha infine permesso l'identificazione accurata dei tempi di percorso del segnale elettromagnetico riflesso all'interfaccia neve-suolo (Fig. 4). L'applicazione di procedure semi-automatiche di picking del segnale riflesso ha consentito l'individuazione di "tempi di percorso" del segnale riflesso su tutte le tracce radar con un'accuratezza stimabile tra il 5 e 10 %.

I principali risultati divisi per sottobacino nei due anni di attività hanno evidenziato le seguenti considerazioni:

- **nel primo settore:** manto caratterizzato, nel primo inverno, da una marcata variabilità spaziale con spessore per lo più compreso tra pochi cm e 4 metri di spessore; accumuli marcatamente più consistenti si osservano nel secondo inverno;
 - **nel secondo settore** (zona glacializzata): condizione operativa complessa, la presenza di interfaccia tra la neve vecchia e la neve stagionale non sempre ha consentito una corretta valutazione del tempo di percorso dei segnali riflessi;
 - **nel terzo settore:** manto nevoso caratterizzato da estese zone di accumulo, con valori massimi osservati al primo anno fino a 5 metri di spessore e circa 8 metri nel secondo anno.
- L'analisi statistica dei dati effettuata ha permesso di ricavare una stima dei valori di spessore medio e varianza, nonché la curva di probabilità di distribuzione e frequenza cumulata per i tre differenti settori.

I risultati dell'analisi statistica, relativi alle acquisizioni del 2009 sui tre settori, sono riportati in figura 5. Gli spessori di neve sono stati calcolati ipotizzando una velocità media dell'impulso nella coltre nevosa di 0.22 m/ns; il confronto tra la distribuzione dei valori di spessore ottenuti dalle misure georadar ed il modello teorico ha evidenziato il *best fit* per una distribuzione di tipo gamma. In particolare nel 2009 nei settori 1 e 3, il valore più ricorrente si attesta in corrispondenza di spessori di poco inferiori a 2 m; nel secondo settore tale valore risulta circa 2.5 m. In tutti e tre i settori la coda superiore della distribuzione di probabilità evidenzia valori di spessore neve compresi tra 7 e 8 metri. La correlazione tra gli spessori di neve e le proprietà morfologiche, in particolare quota e curvatura ha considerato i dati, suddivisi in intervalli, in base alla quota di acquisizione e alla curvatura del terreno, ricavati dal DTM regionale con risoluzione di 10 metri. Per ogni classe si è quindi ottenuta una funzione di distribuzione di probabilità, e la relativa media. In figura 6 sono riportati per ogni classe i valori medi e le relative incertezze (deviazione standard).

L'interpolazione lineare dei valori medi delle funzioni di probabilità dello spessore neve in funzione di quota e curvature è altresì indicata in figura 6 in cui si nota una buona significativa correlazione tra i valori medi di funzione di probabilità e un modello lineare di comportamento. In particolare si ottiene:

- i valori medi delle funzioni di probabilità dei segnali radar (spessori neve) aumentano linearmente con la quota, tra i 2600 e 3000 m s.l.m.; per quote più elevate, tale correlazione non è più valida;
- i valori medi delle funzioni di probabilità dei segnali radar (spessore neve) sono inversamente proporzionali ai valori di curvatura nel substrato.

I risultati dell'analisi statistica consentono di definire le funzioni di probabilità dello spessore neve nei tre diversi settori per eventuali estrapolazioni del comportamento su scala di bacino, per settori con morfologie e condizioni climatiche locali tra loro simili.

Time Domain Reflectometry (TDR)

La permittività elettrica del materiale neve può essere misurata in modo accurato con la tecnica *Time Domain Reflectometry* - TDR (Stein and Kane 1983). L'apparecchiatura TDR invia un impulso elettromagnetico, caratterizzato da un ripido fronte di salita, in una guida metallica infissa in un mezzo poroso (circa 200 ps = circa 1.75 GHz) (Gerdel 1954; Heimovaara et al. 1994). La neve risulta una miscela di cristalli di ghiaccio, acqua allo stato liquido e aria. La velocità dell'impulso elettromagnetico generato dal TDR è funzione della permittività ϵ_r , direttamente correlata alla densità della neve. Pertanto l'equazione di velocità può essere scritta come

$$V_{phase} = 2l/t$$

dove l è la lunghezza della sonda TDR e t il tempo di viaggio, (oppure

$$V_{phase} = c / \sqrt{\epsilon_r}$$

dove c è la velocità della luce ($3 \times 10^8 \text{ ms}^{-1}$) e ϵ_r la permittività relativa del mezzo).

In condizioni di neve anidra, la velocità dell'impulso può essere quindi convertita in valori di densità attraverso formule fisicamente basate oppure, con miglior approssimazione, attraverso la realizzazione di una curva di calibrazione empirica realizzata ad hoc con un campione di adeguata numerosità (e.g. Looyenga 1965), che può approssimare i dati sperimentali:

$$\epsilon_{T, snow}^{1/3} - 1 = x \cdot (\epsilon_{T, ice}^{1/3} - 1)$$

dove

$$x = \frac{\rho_{mixture}}{\rho_{ice}}$$

è il rapporto tra la densità della miscela nevosa e quella del ghiaccio (920 kg/m^3) con valori di permittività relativa pari a

$$\epsilon_{ice} = 3.2$$

$$\epsilon_{water} = 78 \text{ (a } 0^\circ \text{ Celsius)}$$

$$\epsilon_{air} = 1$$

(v. Matzler 1996).

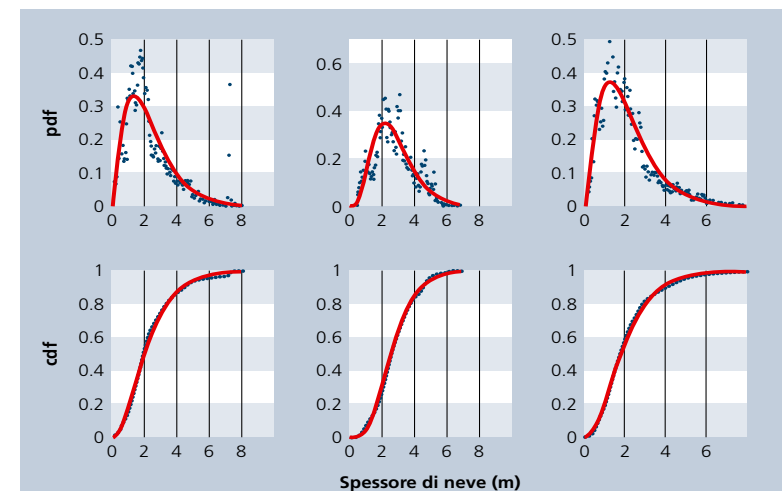


Fig. 5 - Funzioni di distribuzione di probabilità (alto) e frequenza cumulata (basso) ottenute considerando i dati acquisiti nei tre diversi settori nel mese di aprile 2009; da sinistra verso destra si riportano le curve per i settori 1, 2 e 3; le curve in rosso rappresentano le risposte teoriche ottenute con funzioni di probabilità di tipo gamma.

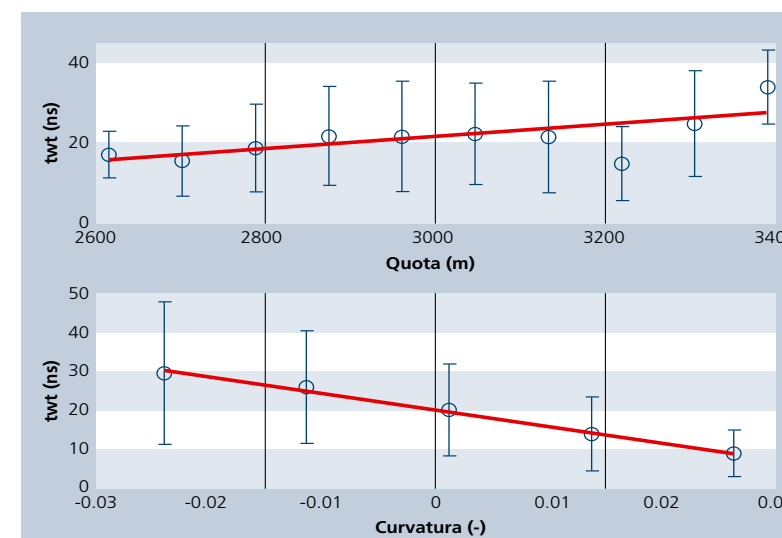
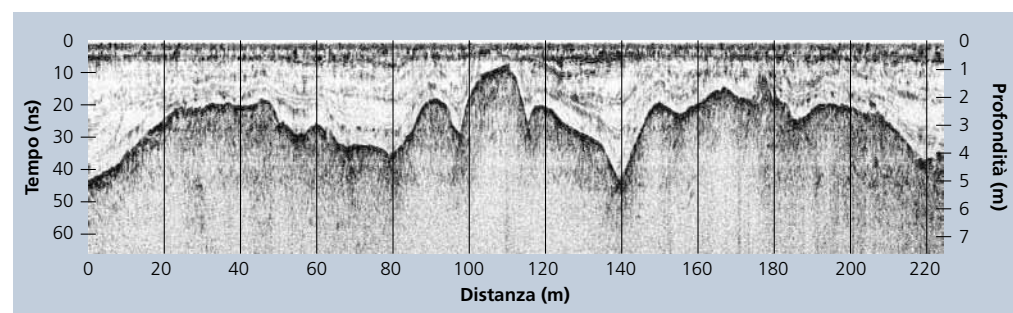


Fig. 6 - Correlazione ottenuta tra tempo di percorso dei dati georadar e le caratteristiche topografiche, (alto) quota e (basso) curvatura.

Fig. 4 - Esempio di sezione georadar lungo un profilo, settore 3 - anno 2009; è evidente la marcata variazione dello spessore del manto nevoso con alternanze di accumulo e zone in erosione.



tra la superficie della neve e, rispettivamente, 50, 100 e 200 cm.

Nel secondo anno di studi invece si è proceduto con un campionamento speditivo attuato con sola sonda da 1200 mm finalizzato alla raccolta di un numero di punti di misura sufficiente per la spazializzazione del dato con tecniche geostatistiche.

La georeferenziazione di tutte le postazioni di misura è avvenuta tramite l'utilizzo di apparecchiatura GPS impostata in coordinate UTM riferite a sistema ED 1950.

Il **campionamento con sonde poste in direzione orizzontale** ha invece preso

in considerazione, in entrambi gli anni, più profili nivologici, sia in zone di erosione che in zone di accumulo (legate al fenomeno della deflazione) posti a varie quote nel bacino. Tale campagna di misura è stata rivolta alla realizzazione di una curva di calibrazione per la misura della densità attraverso le misure manuali effettuate negli stessi punti.

Per quanto concerne i risultati ricavati dalle misure TDR, è stato possibile:

1. verificare l'applicabilità dei sistemi TDR su manto nevoso anidro;
2. ottenere misure precise di permittività

del manto nevoso per profondità comprese tra 500 e 2000 mm;

3. individuare la presenza di differenti comportamenti dielettrici per i differenti orizzonti;
4. ottenere misure di densità del manto nevoso a diverse profondità.

I test hanno evidenziato l'efficienza di monitoraggi TDR in condizioni logistiche complesse, con un approccio conveniente e affidabile per la mappatura delle caratteristiche fisiche ed elettromagnetiche del manto nevoso. L'accuratezza del risultato rimane però subordinata alla possibilità di acquisizione di misure ad elevata precisione nella determinazione dei punti di ingresso del segnale nella neve e di riflessione. A causa delle caratteristiche stesse della misura TDR, le misure effettuate con guide d'onda più lunghe, pur presentando valori più accurati per via del minore errore relativo, forniscono un dato mediato degli strati misurati, dal quale non si riescono più ad ottenere informazioni dettagliate dei singoli orizzonti, ma possono divenire fondamentali per implementare modelli di velocità 2D, ottenere valori dello SWE e consentire la conversione di immagini radar in sezioni di profondità (Fig. 9). Escludendo la presenza di acqua di fusione, le informazioni connesse con la variabilità temporale di ciascuno strato possono infatti essere dedotte dal profilo di velocità ottenuto dalle misure TDR. Tale applicazione è infatti in grado di fornire una sorta di "istantanea" delle condizioni della neve e delle informazioni relative allo stato fisico e meccanico del manto. Il campionamento con sonde verticali consente di ottenere informazioni spazializzate indispensabili per l'ottenimento di un'informazione diretta di variabilità del manto nevoso fino ad arrivare alla vera e propria costruzione di carte tematiche dedicate (e.g. permittività, densità, SWE, ecc...) diversamente non realizzabili se non con un impiego cospicuo di uomini e risorse: si consideri che in una giornata di lavoro una "squadra TDR" (n. 2 persone) ha eseguito 70 campionamenti verticali spazializzati contro 3-4 profili nivologici che normalmente rappresentano la soglia

massima di campionamento realizzabile con metodo classico da una "squadra tradizionale" (di 2 persone) Fig. 10. Il campionamento orizzontale invece ha consentito la costruzione di un'apposita curva di taratura per la correlazione fra permittività del mezzo e densità (nell'ipotesi di neve anidra) caratterizzata da un elevato valore di coefficiente di correlazione e con un andamento analogo a diverse curve simili proposte in altri studi (cfr. Looyenga 1965). Allo stesso modo, l'analisi dei dati rilevati consente di ottenere informazioni approfondite sulle condizioni del manto nevoso, permettendo di comprendere con dettaglio elevato l'evoluzione spaziale e temporale della copertura.

Water Content Reflectometry (WCR)

Obiettivo di questa parte progettuale è stata la valutazione dell'applicabilità e dell'affidabilità di strumentazione automatica e commerciale per il rilievo in continuo e automatico (quindi anche in remoto) di alcune proprietà del manto nevoso. In particolare, è stato scelto il sensore WCR, sviluppato per l'impiego nel suolo, che consente di stimare il contenuto idrico impiegando il periodo (tempo in μs). Nel caso specifico, l'interesse è stato indirizzato verso la verifica delle possibilità di derivare con una certa accuratezza, il valore di densità media di uno strato del manto nevoso impiegando una relazione con il periodo. Ciò ha portato alla realizzazione di una stazione fissa, in località "Cime Bianche", costituita da una stazione meteorologica completa dei principali sensori "tradizionali", integrata con i sensori dedicati alla misura di parametri specifici relativamente al manto nevoso e al suolo per la caratterizzazione e il monitoraggio dell'evoluzione temporale del contenuto idrico della neve, mediante tecnica WCR (Fig. 11). Durante l'estate sono state quindi installate e connesse al datalogger 4 sonde WCR poste a diverse altezze dal suolo (-20, 25, 85, 145 cm da piano campagna) in modo che potessero successivamente esser ricoperte dalla neve durante l'inverno. Nel corso del secondo anno di attività (inverno 2008/09),

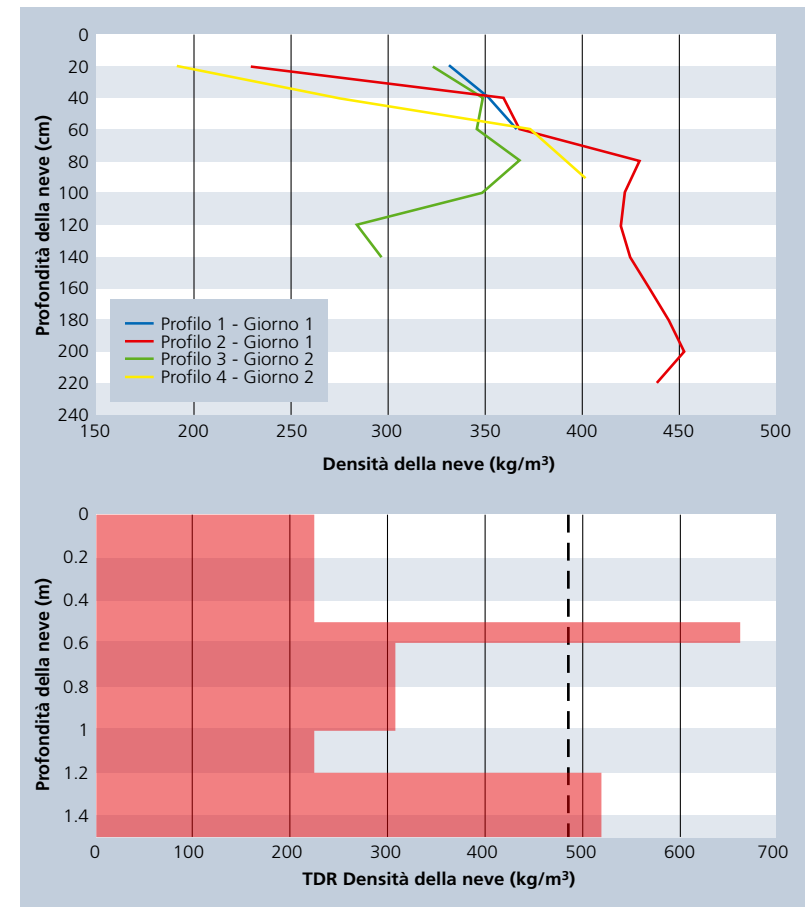
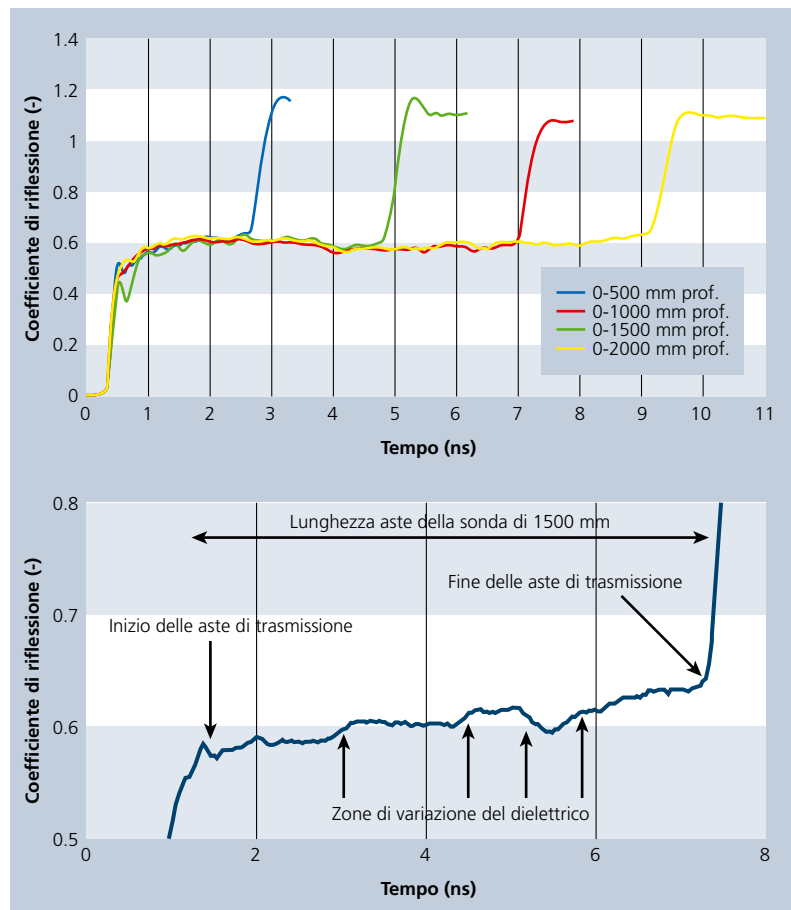


Fig. 9 - (a) Misure TDR orizzontali realizzate in trincea in due differenti date nell'inverno 2008 (lo zero è la superficie del terreno). Due differenti situazioni sono evidenziate: 7 aprile 2008 - un metro di neve compatta (con densità di circa 350 kg/m³) adagiato su uno strato meno denso (con densità di circa 180-200 kg/m³); 24 aprile 2008 - manto caratterizzato da 60-80 cm di neve primaverile che progressivamente è evoluto in strato con densità elevate affetti da un metamorfismo costruttivo (con densità fino a 450 kg/m³). (b) Stratigrafia del manto nevoso dedotta dalla campagna di misure verticali TDR condotta da n. 5 sonde di lunghezza differente. Attribuendo a ciascuna misura il relativo valore ponderato sulla lunghezza della sonda è possibile dedurre la differente stratigrafia del manto nevoso (linea continua). Interessante evidenziare la potenziale perdita di informazioni che avverrebbe con la semplice misura dal valore di densità media del manto (linea tratteggiata).

Fig. 7 - Strumentazione utilizzata nel rilievo: TDR cable tester TEKTRONIX 1502C e kit di sonde a due conduttori metallici paralleli di differente lunghezza.



Fig. 8 - (a) Curve TDR acquisite nel medesimo punto con sonde di differente lunghezza. (b) Punti caratteristici di un'acquisizione TDR, con evidenziati i numerosi picchi secondari collegabili alle variazioni di permittività che determinano riflessioni di segnale.



è stata mantenuta operativa la stazione di monitoraggio e il relativo funzionamento è stato garantito per l'intera stagione invernale anche se le abbondanti e ripetute nevicate stagionali, hanno periodicamente compromesso la funzionalità della stazione a causa della completa sommersione della stessa per periodi prolungati. Nell'area di studio è stata quindi realizzata una serie temporale di misure continue WCR CS616 seppur occorra evidenziare che la continuità e significatività dei dataset acquisiti è stata strettamente connessa con il corretto funzionamento dei singoli sensori e con le condizioni ambientali risultanti al momento dell'acquisizione. Lo scopo è quello di applicare una relazione empirica trovata tra la densità della neve ed il periodo del CS616 per avere un monitoraggio continuo della densità della neve.

La tecnica WCR può ottenere la stima della densità della neve seguendo lo stesso approccio della tecnica TDR ma, a differenza di quest'ultimo, le sonde WCR presentano una circuiteria elettronica integrata nella testa della sonda stessa che genera ed analizza le onde elettromagnetiche in

modo diretto, eliminando la necessità di uno strumento TDR esterno (Hansson and Lundin 2006) e una soggettività di analisi in post-processing. Entrando in dettaglio, il circuito elettronico genera un'onda elettromagnetica che si propaga lungo i sensori e fornisce un'onda quadra identificabile anche con il segnale di output del sensore WCR. Bilskie (1997) suggerisce una relazione generale per il periodo P di onde quadre:

$$P = 2 \cdot t_{circuit} + 2L\sqrt{\epsilon_a} / c$$

dove $t_{circuit}$ rappresenta il time delay. Il periodo di onda quadra P è ridimensionato dal circuito elettronico nella testa del sensore per renderlo compatibile con il sistema convenzionale di acquisizione dati. L'output della sonda P_{op} , così può quindi essere riscritto come $P_{op} = CP$ dove C rappresenta una costante dipendente dal modello di sonda. Hansson and Lundin (2006) spiegano come l'output P del WCR possa essere usato per ottenere il valore di permittività

Fig. 10 - Mappa di densità della neve (kg/m³) dedotta, per i due sottobacini, attraverso l'analisi multivariata ottenuta interpolando alcune variabili topografiche dedotte dal DEM campionato con maglia 5x5 m. Le misure TDR sono indicate dai punti neri.

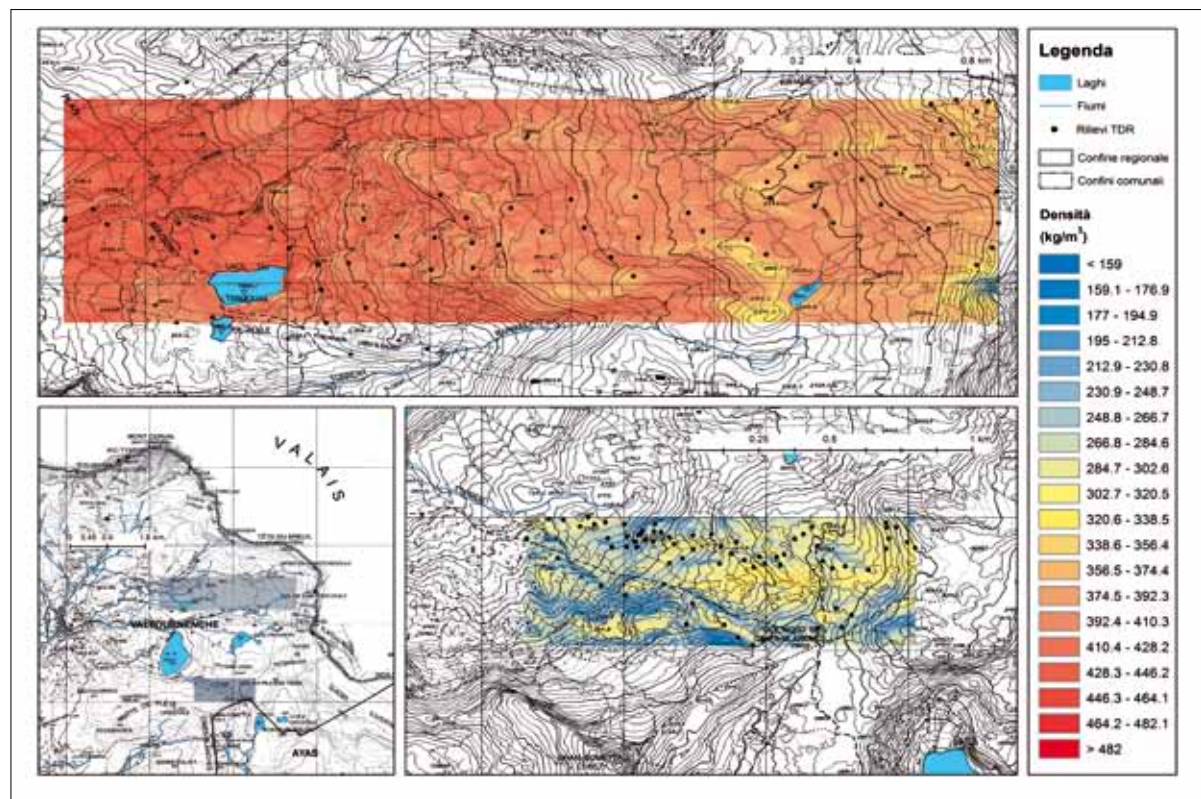


Fig. 11 - Stazione di monitoraggio installata nel 2008. I sostegni in legno e il palo in plexiglas sono destinati alle piastre di flusso, ai sensori WCR e alle sonde di temperatura.



Fig. 12 - Sistema James, costituito da valigia compatta e impermeabile contenente batteria, acquisitore e collegabile tramite connettori stagni a 3 sonde WCR. Strumentazione DITAG - Politecnico di Torino.



dielettrica apparente del mezzo usando:

$$K_a = \left(\frac{(P - 2a_1)}{(2a_2 + 4L/C)} \right)^2$$

dove a_1 e a_2 sono i coefficienti di calibrazione delle sonde.

manto nevoso sono state effettuate, con condizioni di elevata densità del manto nevoso, impiegando un sistema portatile (Fig. 12) composto da acquisitore (CR850, Campbell Scientific Inc.), batteria e 3 sonde WCR (aste da 30 cm) analoghe a quelle installate in stazione. Il sistema è stato reso disponibile dal DITAG del Politecnico di Torino.

Per ciascun punto di misura, oltre al valore del periodo delle sonde WCR CS616 sono stati misurati i valori di densità dello strato nevoso corrispondente.

Le misure sono state condotte da inizio inverno fino a tarda primavera per poter esplorare un ampio range di valori di densità. I risultati preliminari relativi al primo anno hanno inizialmente suggerito la possibilità di ricavare una relazione accettabile tra la densità della neve ed il periodo di output fornito dalle sonde WCR CS616. Le immagini in figura 13 mostrano infatti una relazione (seppur debole) con i valori rilevati nella neve tardo-primaverile, ovvero, quando è presumibile un incremento del contenuto di acqua libera. Durante il secondo anno si è invece evidenziato che, allo stato attuale delle conoscenze, la relazione lineare fra misure di densità (in campo) e misure di periodo

Le sonde WCR usate in questo studio sono le CS616 - Campbell Scientific. Lo scopo dell'acquisizione dati trovare può quindi tradursi nella ricerca di una relazione empirica tra la densità della neve e l'output WCR (ovvero P periodo d'onda quadra). Al fine di verificare il funzionamento del WCR per applicazioni spazializzate, nel primo anno di attività sono stati inoltre realizzati campionamenti diffusi nella parte più interna del bacino (zona "Bontadini") caratterizzata da esposizioni meridionali e maggiore protezione dalle correnti dominanti. In tale settore (tra i 2.800 ed i 3.400 m s.l.m.), le indagini sul

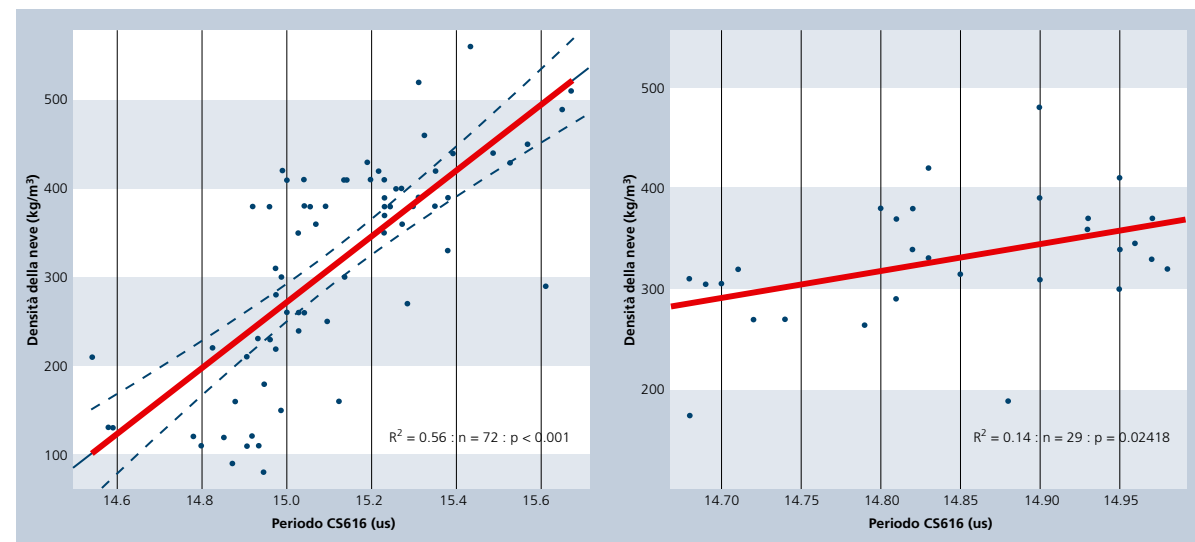


Fig. 13 - Relazione lineare sperimentale tra densità della neve e periodo CS616 ottenuta con i dati ottenuti con sistema portatile James (a) e stazione fissa (b).

delle sonde WCR CS616 sottostima chiaramente il parametro di densità rispetto alle misure manuali o alle misure TDR (che invece ha evidenziato una elevata potenzialità applicativa). Ciò può essere anche dovuto alla scarsa conoscenza della risposta dei sensori CS616 all'interno di materiale nevoso.

CONCLUSIONI

I principali risultati raggiunti di questo biennio di attività, possono essere discussi sulla base di quanto ottenuto da un punto di vista metodologico e dal punto di vista delle informazioni complementari, ottenibili dall'utilizzo di tecniche d'indagine non convenzionali (elettromagnetiche) per la misura dei parametri necessari alla stima dello Snow Water Equivalent a scala di bacino. Questo studio è stato principalmente svolto per verificare l'effettiva applicabilità ed attendibilità dei dati ottenuti da tre tecniche elettromagnetiche mobili (GPR, TDR e WCR) ed un sistema fisso (WCR), rispetto ai risultati delle metodologie tradizionali più onerose in termini di tempo e risorse umane, nonché difficilmente applicabili a scala di bacino. Sul piano dei metodi, il progetto ha permesso di confermare l'applicabilità delle tecniche elettromagnetiche mobili GPR e TDR (sebbene l'accuratezza del risultato rimanga subordinata alla possibilità di acquisizione di misure ad elevata qualità) al fine del rilievo a scala di bacino dello spessore del manto nevoso e della sua densità media.

Elevata correlazione è stata inoltre indi-

viduata tra valori di densità ricavati da misure tradizionali (manuali) e misure di velocità di propagazione del segnale TDR nel mezzo nevoso con grandi potenzialità applicative soprattutto per i rilievi su larga scala.

Risultati differenti si sono invece presentati per la tecnica WCR, usualmente impiegata in suoli. Al di là delle problematiche incontrate per l'installazione di centraline fisse WCR, con i dati a disposizione non è stato possibile verificare l'impiego di sensori WCR fissi per il rilievo in continuo del valore di densità media di uno strato del manto nevoso. In conclusione, il progetto conferma la possibile efficace applicazione di strumenti "veloci", affidabili ed accurati per la misura dei parametri nivologici della copertura, quali spessore, densità del manto e permittività apparente del mezzo al fine di valutare il volume idrico equivalente (SWE).

Ciò è indispensabile per la quantificazione in ambiente alpino della stima dello SWE a scala di bacino o regionale di interesse per la disponibilità di risorsa idrica a fini idrologici, potabili ed energetici, nonché per la valutazione dell'influenza dei cambiamenti climatici sulle dinamiche di accumulo e di fusione della neve.

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia la Fondazione CRT per il supporto finanziario, la società d'impianti a fune Cervino S.p.a., il Comune di Valtournenche (AO) e la Società delle Guide del Cervino per il supporto logistico.

Bibliografia

- Bilskie J. *Using dielectric properties to measure soil water content*. Sensors Magazine 1997;14:26-32.
- Birkeland, K.W., (2001). *Spatial patterns of snow stability throughout a small mountain range*. J. Glaciol. 47, pp. 176-186.
- Conway, H., Abrahamson, J., (1984). *Snow stability index*. J. Glaciol. 30, 321-327.
- Evans, S. (1965). *Dielectric properties of ice and snow*. J. Glaciol., 5, 773-792.
- Gerdel, R.W., 1954. *The transmission of water through snow*. Transactions, American Geophysical Union, 35(3), pp. 475-485.
- Godio A. (2008). *Performance and experimental evidence of GPR in density estimates of snowpack*. Bollettino di Geofisica Teorica e Applicata. 49, 279-298.
- Knight, J.H. 1992. *Sensitivity of time domain reflectometry measurements to lateral variation in soil water content*. Water Resour. Res., 28, pp. 2345-2352.
- Koh G., Yankielun N.E., Baptista A.I. 1996. *Snow cover characterization using multiband FMCW radars*. Hydrol. Process. 10, pp. 1609-1617.
- Hansson, K. and Lundin, L. 2006. *Water Content Reflectometer Application to Construction Materials and its Relation to Time Domain Reflectometry*. Vadose Zone J., Mar 2006; 5: 459 - 468.
- Harper J. T., Bradford J. H. 2003. *Snow stratigraphy over a uniform depositional surface: spatial variability and measurement tools*. Cold Reg. Sci. Technol. 37, pp. 289 - 298.
- Heimovaara, T.J., W. Bouten, and J.M. Verstraten, 1994. *Frequency domain analysis of time domain reflectometry waveforms. 2. A four component complex dielectric mixing model for soils*. Water Resour. Res. 30, pp. 201-209.
- Looyenga, H., 1965. *Dielectric constant of heterogeneous mixtures: Physics*, 31, pp. 401-406.
- Marshall H-P., Schneebeli M., Koh G. (2007). *Snow stratigraphy measurements with high-frequency FMCW radar: Comparison with snow micro-penetrator*. Cold Reg. Sci. Technol. 47,108-117.
- Mätzler, C., 1996. *Microwave permittivity of dry snow*. IEEE Transactions Geosc. and Rem. Sens., 34, pp. 573 - 581.
- Or, D., S. B. Jones, J. R. VanSchaar, S. D. Humphries, and L. Koberstein, 2004. *WinTDR v. 6.1: A Windows-based Time Domain Reflectometry program for measurement of soil water content and electrical conductivity*. User Manual. freedownloadbooks.net/wintdr-pdf-3.html
- Robinson, D.A., S.B Jones, J.M. Wraith, D. Or, S.P. Friedman, 2003. *A review of advances in dielectric and electrical conductivity measurement using time domain reflectometry: simultaneous measurement of water content and bulk electrical conductivity in soils and porous media*. Vadose Zone J. 2, pp. 444-475.
- Sand K, Bruland O. 1998. *Application of georadar for snow cover surveying*. Nordic Hydrology 29, pp. 361-370.
- Stein, J., D.L. Kane, 1983. *Monitoring the unfrozen water content of soil and snow using time-domain reflectometry*. Water Resour. Res. 19, pp. 1573-1584.