

Applicazione di reti neurali a dati SSM/I multi-temporali per la stima di parametri del manto nevoso

Marco Tedesco e Emanuele Santi

Istituto CNR – IFAC, Via Panciatichi 64 – 50127 Firenze. E-mail: e.santi@ifac.cnr.it

Riassunto

In questo articolo vengono proposte e studiate differenti configurazioni di reti neurali per la estrazione di parametri del manto nevoso da dati radiometrici telerilevati. Le temperature di brillantezza misurate dal sensore SSM/I a 19 e 37 GHz sono utilizzate per estrarre lo spessore del manto nevoso, la frazione di volume, la temperatura e la dimensione dei grani della neve. Le reti sono allenate sia con dati sperimentali che con dati simulati attraverso un modello basato sulla Teoria del Trasporto Radiativo dei Mezzi Densi (DMRT). La zona scelta per lo studio è nel Nord dell'Europa e i dati esaminati riguardano un periodo che va dal 1997 al 1999.

Abstract

In this paper, different configurations of artificial neural networks are proposed and analysed for the extraction of snow parameters from radiometric remotely-sensed data. Brightness temperatures collected at 19 and 37 GHz by the SSM/I are used to retrieve snow depth, fractional volume, temperature and mean particle size. Artificial neural networks are trained either with experimental data and with brightness temperatures simulated by means of a model based on the Dense Medium Theory (DMRT). The area selected for our study is located in North Europe by using data collected between the years 1996 and 1999.

Introduzione

Tra i principali obiettivi della radiometria a microonde per applicazioni nivologiche vi sono la stima dell'estensione delle zone innevate e l'estrazione di parametri quali lo spessore del manto nevoso, la dimensione dei grani di ghiaccio, la frazione di volume e la temperatura. Quest'ultimi sono di fondamentale importanza per lo sviluppo e la verifica di modelli idrologici nell'ambito della stima delle risorse idriche e di difesa dalle valanghe, per le previsioni legate alla produzione di energia idroelettrica e per indagini di tipo climatologico sull'influenza che la neve stessa esercita sul clima sia a livello locale che globale. In generale, la determinazione delle caratteristiche del manto nevoso a partire dai dati telerilevati richiede l'inversione delle equazioni che descrivono il legame tra i parametri geo-fisici e nivologici e quelli elettromagnetici, come ad esempio nel caso dell'equazione del trasporto radiativo. L'inversione in questione non è di fatto semplice, sia perché la relazione, descritta da equazioni integro – differenziali, non è lineare e sia perché il problema è, come si dice, 'mal posto' (diverse combinazioni dei parametri della copertura nevosa possono dare come risultato lo stesso valore di temperatura di brillantezza).

Uno strumento efficace per lo studio delle caratteristiche del manto nevoso tramite radiometria e' rappresentato dal radiometro SSM/I, il quale garantisce una copertura giornaliera di più dell'80% della superficie terrestre. Un problema legato a tale strumento è dato dalla scarsa risoluzione a terra che ha come conseguenza il fatto che, ogni pixel comprende contributi di superfici differenti, purtroppo non determinabili a priori. Questo fattore introduce ulteriore rumore nel processo, rendendo l'inversione ancora più problematica.

Con queste premesse è stata presa in considerazione l'applicazione delle Reti Neurali (ANN – *Artificial Neural Networks*) come tecnica in grado di consentire l'inversione di funzioni non lineari e l'analisi di problemi mal posti. Nel presente lavoro vengono, perciò, esaminate le potenzialità delle reti neurali allenate con dati sperimentali o simulati per la determinazione dei parametri della neve da dati SSM/I.

Sensore SSM/I e descrizione delle aree di test

Lo "*Special Sensor Microwave Imager*" (SSM/I) è un radiometro in polarizzazione lineare, a quattro frequenze e sette canali, che vola a bordo dei satelliti della serie DMSP (*Defense Meteorological Satellite Program*). La risoluzione spaziale varia dai 69x43km a 19 GHz ai 12,5x12,5 Km ad 85 GHz. [Hollinger, 1989]. Nel presente lavoro sono utilizzati i canali a 19 e 37 GHz in entrambe le polarizzazioni V ed H. A queste frequenze, l'emissione a microonde si è dimostrata sensibile alle variazioni delle proprietà fisiche e dielettriche della neve [Macelloni et al., 2001, Tedesco 2003, Tedesco et al., 2004]: il radiometro SSM/I può essere, pertanto, un utile strumento per l'osservazione del manto nevoso ed i dati raccolti da tale sensore possono essere utilizzati per una caratterizzazione a grande scala delle condizioni stagionali della copertura nevosa. La regione scelta per l'indagine è collocata nell'Europa del Nord, delimitata da un rettangolo con le seguenti coordinate (Fig. 1):

Tabella 1 - Coordinate dell'area contenente le aree di studio.

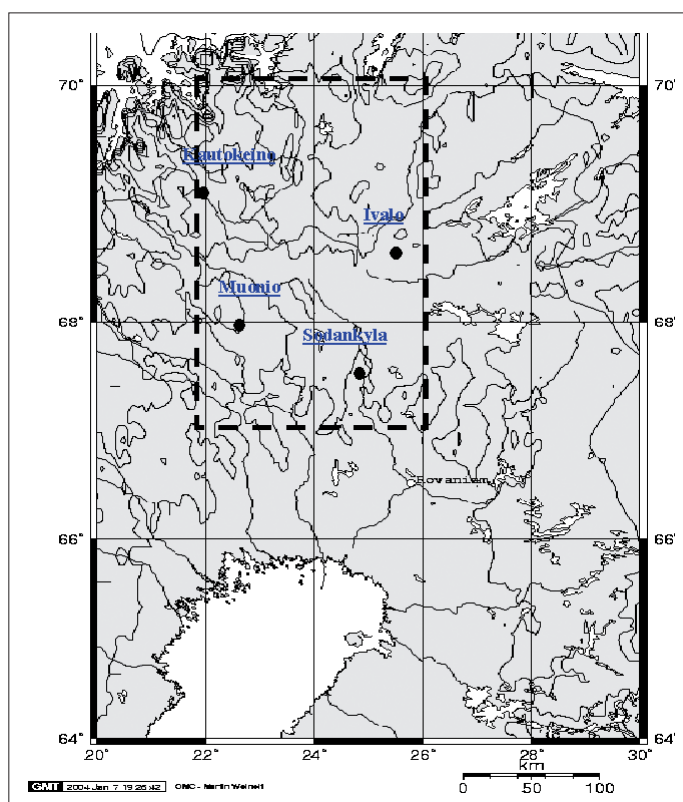
Nord	70°
Sud	67°
Est	28°
Ovest	23°

Nell'area scelta la neve è presente da Ottobre a Maggio, raggiungendo il massimo spessore tra Marzo ed Aprile. La copertura vegetale è principalmente costituita da vegetazione bassa (tundra), ma, data la scarsa risoluzione del sensore SSM/I, una percentuale non nota della scena osservata può essere composta da foreste, le quali possono influire fortemente sull'emissione osservata [Kurvonen e Hallikainen, 1997]. Inoltre, nel caso di neve asciutta, l'emissione a microonde può essere influenzata anche dalle caratteristiche del terreno sottostante. Nell'area osservata sono state individuate quattro stazioni meteorologiche in grado di fornire misure dirette dei parametri della neve: tre sono in Finlandia mentre l'ultima è situata in Norvegia. Le coordinate delle zone di test sono elencate nella tabella seguente (Tab. 2), individuata sulla mappa di Figura 1:

Tabella 2 - Coordinate delle zone di test.

Area	Ovest	Est	Sud	Nord
Ivalo	27.20	27.60	68.40	68.80
Kautokeino	22.80	23.20	68.80	69.20
Muonio	23.50	23.90	67.80	68.20
Sodankyla	26.40	26.80	67.20	67.60

Figura 1 - Mappa dell'area di test.



I dati misurati da queste stazioni sono: valor medio, minimo e massimo di temperatura giornaliera dell'aria, velocità del vento, punto di rugiada, pressione e spessore del manto nevoso. La temperatura della superficie osservata è stata assunta uguale a quella minima dell'aria per le acquisizioni in orbita ascendente (primo mattino) ed uguale alla massima per il passaggio discendente (ore centrali della giornata) [Mc Farland et al., 1990], a causa dell'ora a cui il radiometro SSM/I passa sulle zone in questione.

Le reti neurali

Negli ultimi anni le reti neurali hanno avuto una notevole diffusione e sono state applicate con successo a problemi di inversione in molti campi. Come riferimento per le diverse applicazioni delle reti neurali e per la teoria di seguito proposta si consiglia di consultare [Haykin, 1996]. Tra le varie tipologie di reti neurali, quelle note come "*multi-layer perceptrons*" (MLP) sono risultate particolarmente adatte alla soluzione di problemi di inversione di dati da telerilevamento [Davis et al., 1993].

Le MLP sono reti neurali di tipo "*feed-forward*" che presentano uno o più strati di neuroni intermedi tra lo strato di ingresso (*input layer*) e lo strato di uscita (*output*). Gli strati di neuroni sono interconnessi tra di loro ed il peso di tali connessioni è controllato da opportuni coefficienti. In letteratura [Hornik, 1989] è stato dimostrato che le reti MLP possono essere allenate per rappresentare *relazioni arbitrarie tra ingressi ed uscite*. Una rete MLP è determinata dalla sua architettura e dai pesi delle connessioni tra i diversi neuroni. Il vettore di ingresso attraversa direttamente il primo strato di pesi delle connessioni e l'input di ciascun neurone dello strato successivo è la somma di tutti i pesi delle connessioni entranti multipli-

cati per il valore della funzione di attivazione del corrispondente neurone dello strato precedente. Il valore di offset associato al neurone è inserito nella somma ed il risultato è passato attraverso la funzione non lineare del neurone, generalmente di tipo sigmoideale.

Per l'allenamento della MLP viene utilizzata la regola di apprendimento nota come *back-propagation* (BP), che minimizza l'errore quadratico medio calcolato tra i valori desiderati e quelli ottenuti in uscita. I pesi vengono continuamente aggiornati tramite una costante di apprendimento sulla base del gradiente dell'errore corrente e della precedente variazione del peso. Le reti utilizzate nel presente lavoro hanno uno strato intermedio tra ingresso ed uscita composto da 10 neuroni. La scelta di tale numero deriva da prove di convergenza operate sulla rete stessa, variando il numero di neuroni e valutando l'errore quadratico medio raggiunto al termine dell'allenamento. Tale errore decresce con l'aumentare dei neuroni fino al raggiungimento di una soglia, oltre la quale aumenta nuovamente.

Il numero di cicli per l'allenamento era fissato a 5000 nel caso l'errore quadratico medio non scendesse sotto al limite di 0.1 K.

In generale, il set di allenamento delle reti neurali può essere costituito da valori simulati o misurati. Nel presente lavoro, sono state utilizzate due differenti tipologie di *training set*: la prima è basata sui dati SSM/I e le misure a terra (rete allenata con valori misurati) mentre la seconda utilizza un modello basato sulla Teoria del Trasporto Radiativo dei Mezzi Densi (*Dense Medium Radiative Transfer Theory* - DMRT) per generare il set di training (rete allenata con modello). La DMRT [Tsang et al., 1985, Jin Q., 1993] è utilizzata poiché tiene conto degli effetti di *scattering* per i mezzi densi (dove la frazione di volume occupata dai grani di ghiaccio è superiore al 10 %) [Macelloni et al., 2001; Tedesco, 2003].

Il problema dell'inversione con l'utilizzo di una ANN può essere risolto in due modi, a seconda di come si assegnano gli ingressi e le uscite:

1. Allenare la ANN utilizzando i valori di temperatura di brillanza come elementi del vettore di uscita ed i corrispondenti parametri della neve come elementi del vettore di ingresso e poi invertire la rete allenata mediante un algoritmo sviluppato da Linden and Kindermann [Linden et al., 1989]. Il metodo, applicabile a reti multistrato, calcola iterativamente il vettore di ingresso che meglio approssima l'uscita desiderata, applicando il metodo dei minimi quadrati. In questo caso si parlerà di inversione non esplicita.
2. Allenare la ANN scambiando i vettori di ingresso e di uscita rispetto al caso precedente e quindi avendo come ingresso le temperature di brillanza e come uscite i parametri della neve (questo caso sarà chiamato esplicito perché si riconduce ad una inversione diretta).

I parametri della neve da stimare sono la dimensione media dei grani, la densità, lo spessore e la temperatura. Nel caso esplicito, poiché differenti combinazioni dei parametri della neve corrispondono allo stesso valore di temperatura di brillanza, l'uscita della ANN allenata utilizzando le temperature di brillanza come ingresso risulta essere una interpolazione di tutte le combinazioni dei corrispondenti parametri della neve: l'errore che si ottiene è quindi generalmente elevato. Risultati più soddisfacenti possono essere invece ottenuti col metodo non esplicito, allenando la ANN con i parametri della neve come input e le temperature di brillanza come output. Una volta allenata la rete in maniera *non esplicita*, per operare il processo di inversione è necessario stabilire un punto iniziale, scelto arbitrariamente o come migliore condizione iniziale (*best initial guess*). Durante la fase di *'interrogazione'*, i valori delle temperature di brillanza misurati sono utilizzati come ingresso del processo. Viene quindi calcolato un primo set di temperature di brillanza che vengono confrontate con l'uscita desiderata per determinare l'errore. A questo punto, viene calcolato il gradiente dell'errore rispetto al valore di ingresso della rete allenata, che è rappresentato dal set dei parametri della neve. Questo ultimo viene, quindi, aggiornato e il procedimento viene ripetuto

per un fissato numero di iterazioni o fino a quando l'errore scende sotto una soglia assegnata. L'algoritmo di inversione, quindi, è un metodo iterativo che parte da una soluzione iniziale e che si muove gradualmente verso un minimo sulla superficie dell'errore. Esso è inoltre strutturato in modo che sia possibile imporre limitazioni alla direzione di movimento verso la soluzione desiderata.

L'inversione iterativa della rete nel caso non-esplicito dimostra maggiori flessibilità e precisione di quelle consentite nel caso esplicito e porta ad un errore RMS molto più basso di quello ottenuto con l'altra tecnica [Davis et al, 1993; Tsang et al, 1992].

In generale il problema dell'inversione è, come si dice, *mal posto*, per cui non sono garantite né l'esistenza di una soluzione né la sua unicità. Inoltre, qualora esista, la soluzione è spesso instabile per cui piccole variazioni dei parametri in ingresso portano a forti variazioni dei valori in uscita. Nel caso di problemi mal posti, è possibile incorrere nei cosiddetti minimi locali nella superficie dell'errore, a cui corrisponde una soluzione "non voluta". In questi casi si rivela determinante la scelta delle condizioni iniziali, che permettono di introdurre dei vincoli e fissare un punto di partenza sulla superficie dell'errore da cui cominciare a cercare la soluzione. Inoltre, un fattore fondamentale che influenza la scelta della condizione iniziale è rappresentato dalla sensibilità della soluzione al parametro considerato: una elevata sensibilità corrisponde a minimi ben definiti e stretti sulla superficie dell'errore. D'altra parte, nel caso in cui non ci sia sensibilità alle variazioni del parametro considerato, non può esistere sensibilità nell'inversione. La sensibilità al parametro è, di fatto, un fattore fondamentale che definisce la possibilità di stimarlo correttamente con un margine di errore definito.

Stima dei parametri della neve

Per la stima dei parametri della neve (dimensione media dei grani, densità, spessore e temperatura) dai dati SSM/I, sono state prese in considerazione due reti neurali: la prima, ANN1, è stata allenata con i dati sperimentali mentre la seconda, ANN2, è stata allenata con i dati di modello DMRT.

Nei lavori in cui è effettuata l'inversione [Tsang et al., 1992, Davis et al., 1993] la miglior condizione iniziale viene determinata utilizzando modelli idrologici capaci di simulare le condizioni iniziali della copertura nevosa, una volta conosciuti gli opportuni parametri meteorologici. Nei modelli considerati, viene assunto come raggio delle particelle un valore medio, calcolato assumendo la stessa dimensione per tutte le particelle. In realtà il raggio efficace, utilizzato nel modello DMRT, è la media dei valori assunti da due funzioni di distribuzione e tiene conto della posizione delle particelle [Jin, 1993]. È noto che il raggio effettivo è abbastanza diverso da quello medio [Jin, 1993] e la relazione tra i due è espressa da una funzione di tipo Gamma. Tale relazione dipende da parametri diversi, non disponibili in questo caso, a seconda del tipo di neve considerata: pertanto nel presente lavoro non è stato possibile paragonare i due raggi, medio ed effettivo, come in altri lavori di letteratura. Inoltre i modelli idrologici necessitano di ulteriori informazioni, come l'intensità della radiazione solare, l'albedo della neve nell'infrarosso, le precipitazioni ed altri per fornire buone approssimazioni. Non essendo queste informazioni disponibili per le zone considerate, le condizioni iniziali ottimali della rete ANN2 sono ottenute mediante la rete ANN1, allenata tramite i dati sperimentali.

La rete ANN1 ha come ingresso i parametri della neve misurati e come uscite le temperature di brillantezza acquisite dal satellite mentre la rete ANN2 presenta in ingresso i parametri del modello e in uscita le temperature simulate da confrontare con quelle misurate. Anche una procedura basata sul solo uso della rete ANN1 è stata analizzata e i risultati sono stati confrontati con quelli ottenuti mediante l'utilizzo di entrambe le reti. Questo anche per verificare l'ipotesi di utilizzo dei risultati della prima rete come *best initial guess* per la seconda.

I risultati che seguono si riferiscono all'inversione effettuata utilizzando temperature di brillantezza a 19 e 37 GHz, in polarizzazione verticale e orizzontale, acquisite durante la sola fase di orbita ascendente.

Risultati e commenti

La rete ANN1 è stata allenata considerando come ingressi la temperatura e lo spessore del manto nevoso (essendo questi ultimi i soli dati a disposizione a terra). Tre anni consecutivi sono stati presi in considerazione per l'analisi dal 1997 al 1999.

In un primo approccio sperimentale, i dati acquisiti durante il 1997 sono stati utilizzati per allenare la rete ANN1 e interrogarla mediante i dati acquisiti nel 1998, mentre in un secondo i dati acquisiti nel 1999 sono stati utilizzati per interrogare due differenti reti allenate la prima con i dati del 1997 e 1998 insieme, e la seconda con i dati del 1997 più i dati ricavati dalla stima dei valori della prima rete e di quella allenata con il modello.

La rete ANN2 ha invece in ingresso temperatura, densità, spessore e dimensione media dei grani di ghiaccio del manto nevoso, derivati dai valori utilizzati nel modello per generare le temperature di brillantezza. La rete ANN1 è stata allenata con la sequenza di dati collezionati durante il 1997 e quindi "interrogata" utilizzando i dati SMM/I del 1998. I risultati di spessore del manto nevoso (medie sui quattro giorni considerati ogni mese per l'analisi) con le corrispondenti misure a terra sono riportati in Figura 2, per tutte e quattro le diverse zone selezionate per lo studio. È possibile osservare che il metodo funziona bene nel periodo Dicembre-Marzo. Nel mese di Novembre invece, lo spessore del manto è troppo piccolo per offrire sufficiente sensibilità al metodo. Nel mese di Aprile ed in generale in primavera inoltrata, l'errore elevato potrebbe essere dovuto a condizioni di neve umida o alla forte stratificazione che caratterizza la neve in quel periodo.

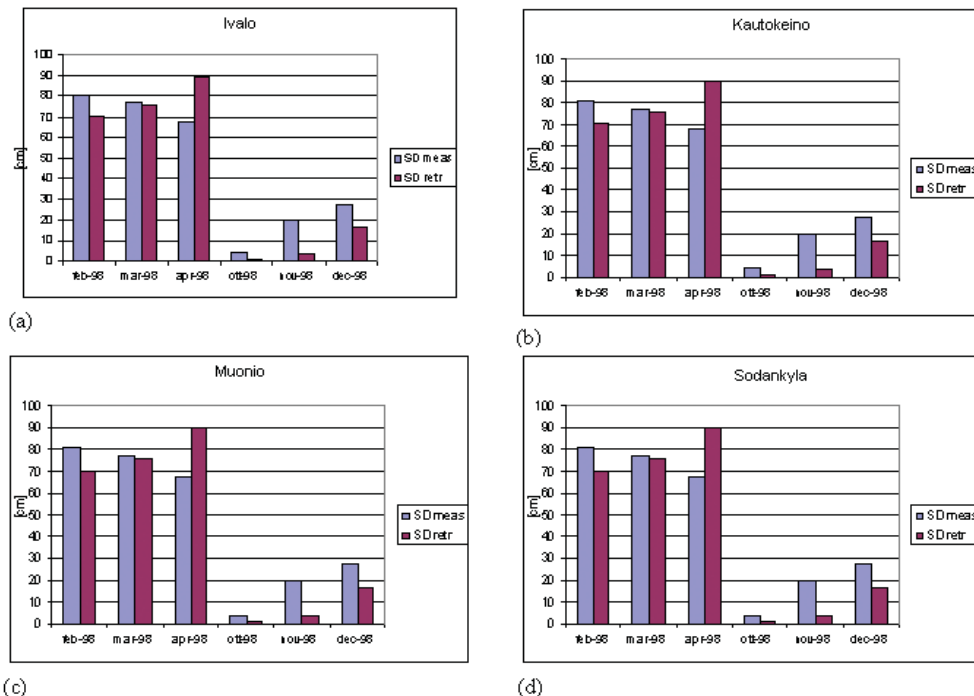
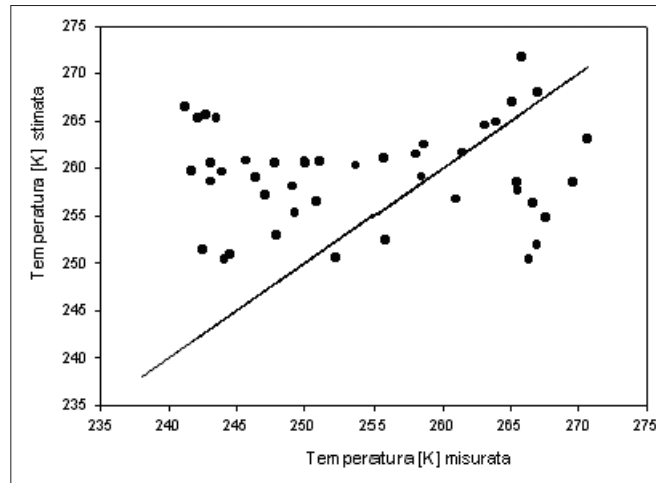


Figura 2 - Confronto tra spessore della neve stimato e misurato per il 1998 in Ivalo (a), Kautokeino (b), Muonio (c) e Sodankyla (d).

Figura 3 - Stima della temperatura della neve per il 1998 utilizzando la rete neurale allenata con i dati di orbita ascendente del 1997.



La Figura 3 mostra invece i valori stimati di temperatura della neve in funzione di quelli misurati per tutte le stazioni. Si può notare che il metodo proposto non sembra efficiente per bassi valori di temperatura. Per interpretare il fenomeno sono state formulate alcune ipotesi: alcuni tra i dati per cui la stima non produce risultati attendibili sono relativi al mese di Novembre, mese per il quale fallisce anche la stima dello spessore. In questo caso però i cicli di scioglimento e rigelo del sottile strato nevoso influenzano l'umidità del suolo sottostante e quindi l'emissione. Inoltre l'approssimazione usata di considerare la temperatura della neve equivalente a quella dell'aria può non essere sempre valida [Tedesco, 2002]: ad esempio è noto che la neve è un ottimo isolante termico e tende a conservare la propria temperatura anche quando la temperatura dell'aria scende a valori molto bassi [Macelloni et al., 2001]. In conclusione, la stima sembra possibile solo se la temperatura dell'aria non è troppo bassa e non nel periodo primaverile.

Per operare l'inversione con le misure acquisite durante l'anno 1999 sono stati confrontati i risultati di due approcci :

1. allenare la rete ANN1 con i dati sperimentali di entrambi gli anni 1997 e 1998;
2. allenare la rete ANN1 con le misure del 1997 e utilizzare i dati stimati del 1998 da ANN1 come condizione iniziale di ANN2.

La Figura 4 mostra il confronto tra le misure e le stime dello spessore del manto nevoso per le quattro stazioni considerate ottenute nei due differenti casi. In generale, l'inversione per il 1999 dà risultati peggiori di quelli del 1998, sia per il primo che per il secondo caso analizzato. Tuttavia, le reti allenata con i soli dati sperimentali mostra risultati migliori. Nel solo caso di Sodankyla, la rete che utilizza il modello fornisce risultati migliori o confrontabili con quelli della rete allenata con i dati sperimentali.

In Figura 5 è rappresentata la temperatura stimata della neve in funzione della misurata per tutte e quattro le stazioni e tutti i giorni dell'anno. Anche in questo caso la stima non sembra possibile per temperature estremamente basse ed in generale maggiori approfondimenti su tale argomento sono necessari.

ANN2 è stata utilizzata per stimare i valori della frazione di volume e del raggio medio delle particelle. Oltre alle temperature di brillantezza misurate, anche lo spessore del manto nevoso e la temperatura della neve sono state utilizzate per invertire la rete, che presenta in ingresso la frazione di volume e la dimensione dei grani di ghiaccio simulate tramite il modello. La Figura 6 mostra il grafico che confronta il valor medio mensile del raggio dei grani per le 4 stazioni,

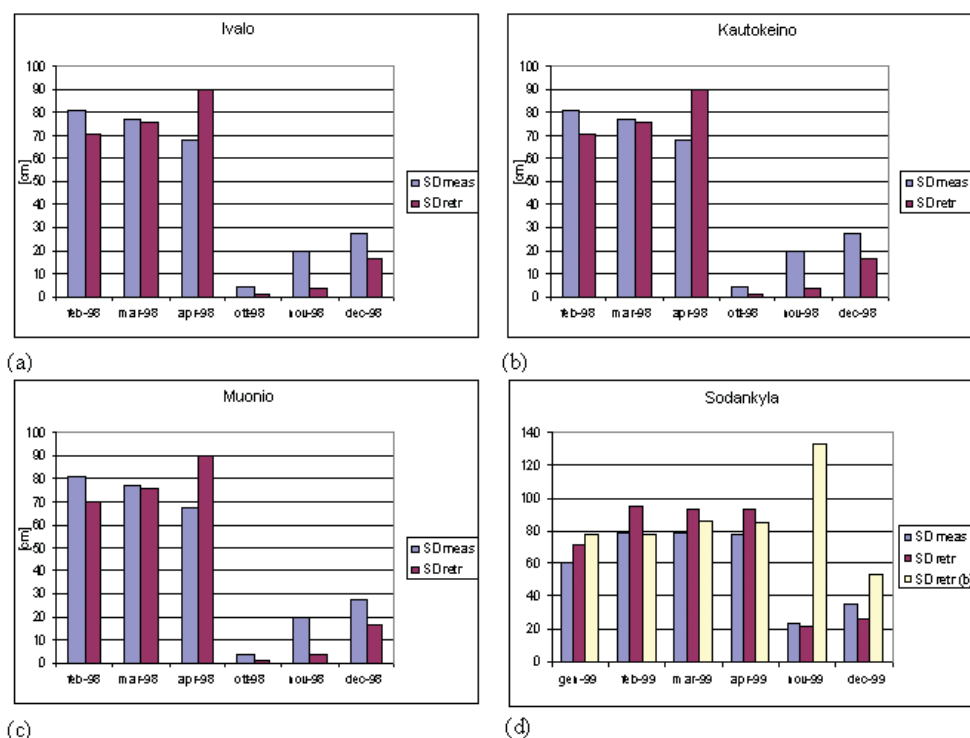


Figura 4 - Spessore della neve stimata e misurata nel 1999. Il caso (b) è riferito alla rete allenata solo con dati a terra del 1997.

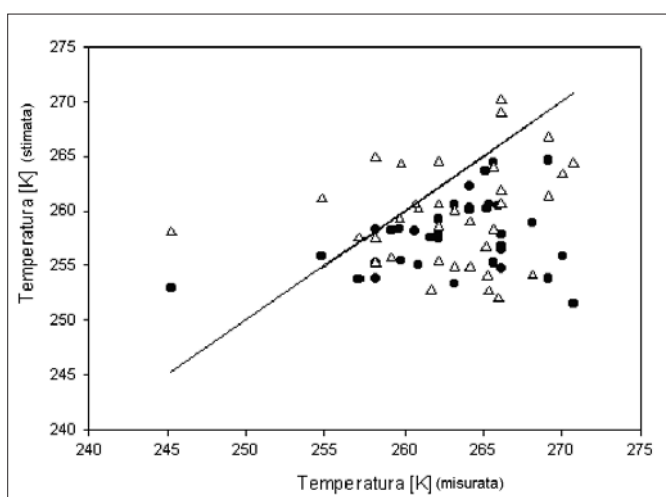


Figura 5 - Stima della temperatura della neve per il 1999 utilizzando una rete allenata con dati a terra del 1997 e: dati simulati utilizzando la rete per il 1998 (triangoli); dati a terra per il 1998 (cerchietti).

mentre la Figura 7 si riferisce alla frazione di volume.

Anche se non è stato possibile confrontare i valori misurati con quelli simulati, si può osservare che i valori estratti dai dati SSM/I ben interpretano gli andamenti stagionali degli stessi parametri. Ad esempio la dimensione dei grani a Novembre è molto piccola a causa delle nevicate presenti in quel periodo mentre nel mese di Marzo tali valori crescono a causa dei

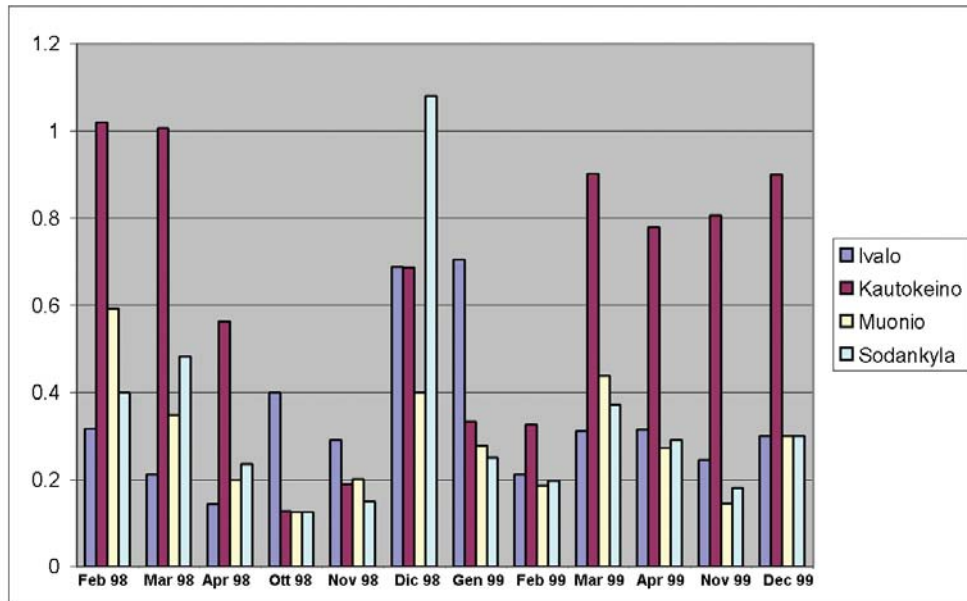


Figura 6 - Stima della dimensione media su base mensile dei grani utilizzando la rete ANN2.

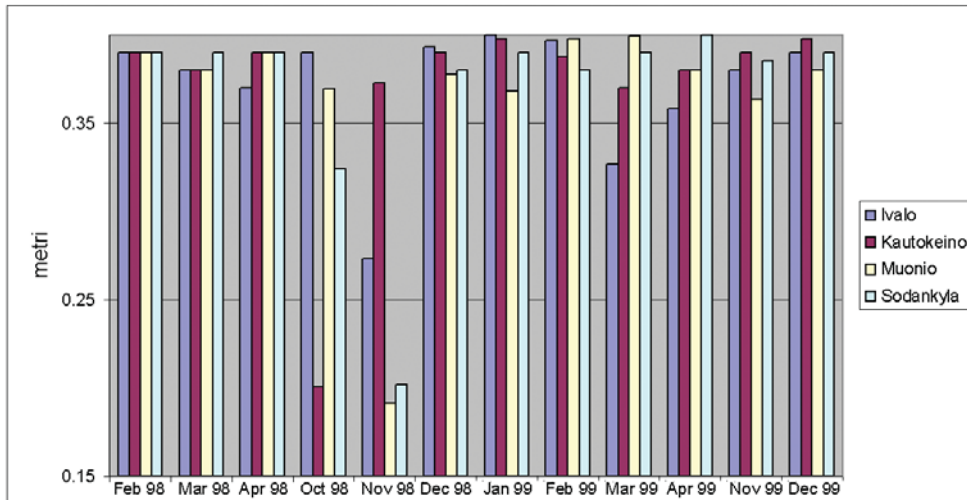


Figura 7 - Stima della frazione di volume mediata su base mensile per tutte e quattro le stazioni meteo considerate (rete ANN2).

fenomeni di fusione-rigelo. Tali considerazioni si applicano a tutte le stazioni di riferimento e ad entrambi i parametri (frazione di volume e raggio). E' opportuno osservare che, una volta fissati spessore e temperatura del manto nevoso, il problema dell'inversione non risulta più mal posto; pertanto dimensione media dei grani e frazione di volume possono essere univocamente ottenute invertendo le equazioni DMRT. In questo caso l'utilizzo di una rete neurale al posto dell'inversione del modello porta vantaggi in termini di tempo di calcolo, poiché permette di evitare di risolvere le equazioni per ogni passo dell'iterazione.

Conclusioni

Nel presente lavoro sono state esaminate le potenzialità delle reti neurali nella stima dei parametri della neve da dati SSM/I. L'impiego di una rete allenata soltanto con i dati di modello DMRT non permette una corretta stima dei parametri perché il problema risulta mal posto. Appropriate condizioni iniziali ricavate da misure dirette o modelli idrologici sono pertanto indispensabili per una corretta stima delle grandezze considerate.

Il metodo proposto è realizzato in due passi: nel primo, i valori misurati nel 1997 di spessore e temperatura del manto nevoso vengono utilizzati per stimare i corrispondenti valori per il 1998 e successivamente viene tentato il recupero dei parametri della neve per il 1999 utilizzando le sole misure SSM/I e la rete allenata con i dati del 1997 e 1998. Nel passo successivo, un'altra ANN, allenata con il modello DMRT viene utilizzata per stimare la frazione di volume e la dimensione media dei grani dai valori di spessore e temperatura del manto nevoso stimati con ANN1 dai dati SSM/I per il 1997.

I risultati per la temperatura e lo spessore sono in buon accordo con le misure, tranne che in presenza di temperature fisiche molto basse. Per quanto riguarda frazione di volume e dimensione media dei grani non sono disponibili misure dirette per il confronto ma va osservato che, una volta determinate la temperatura e lo spessore, il problema dell'inversione non risulta più mal posto e i parametri sconosciuti possono essere correttamente stimati. In questo caso l'utilizzo della rete neurale consente un notevole risparmio in termini di tempo di calcolo, rispetto all'inversione del modello DMRT.

Bibliografia

- Davis D.T., Chen Z., Tsang L., Hwang J-N., Chang A.T. (1993) - *Retrieval of snow parameters by iterative inversion of a neural network*. TGARS, 31(4): 842-852.
- Haykin S. (1998) - *Neural networks: A Comprehensive Foundation (2nd Edition)*. Pearson Education; 2nd edition, ISBN: 0132733501.
- Hollinger J. (1989) - *DMSP Special Sensor Microwave/imager calibration/validation*. Final report, vol.1.
- Hornik K. (1989) - *Multilayer feedforward network are universal approximators*. Neural Networks, 2 (5): 359-366.
- Jin Y. Q. (1993) - *Electromagnetic scattering modelling for quantitative remote sensing*. World Scientific Press.
- Kurvonen L., Hallikainen M. (1997) - *Influence of land-cover category on brightness temperature of snow*. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 35 (2): 367-373.
- Linden, Kinderman J. (1989) - *Inversion of multi-layer nets*. In Proc. Int. Joint Conf. Neural Networks, 2: 425-435.
- Macelloni G., Paloscia S., Pampaloni P., Tedesco M. (2001) - *Microwave emission from dry snow: a comparison of experimental and model results*. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 39 (12): 2649-2656.
- Mc Farland M.J., Miller R.L., Neale C.M.U. (1990) - *Land surface temperature derived from the SSM/I passive microwave brightness temperatures*. IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, 28 (5): 839-845.
- Tedesco M. (2002) - *Dry snow mapping in Finland employing space-borne microwave observations and artificial neural networks*. Helsinki University of Technology Report No. 50, Laboratory of Space Technology – Espoo, September 2002 – ISBN 951-22-6105-7 – ISSN 0786-8154.
- Tedesco M. (2003) - *Microwave Remote Sensing of Snow*. PhD Thesis, Istituto di Fisica Applicata 'Carrara', CNR, Firenze.

- Tedesco M., Pulliainen J., Pampaloni P., Hallikainen M. (2004) - *Artificial neural network based techniques for the retrieval of swe and snow depth from SSM/I data*. Remote Sensing of Environment, 90(1): 76-85.
- Tsang L., Kong J. A., Shin R. T. (1985) - *Theory of microwave remote sensing*. Wiley-Interscience.
- Tsang L., CHen Z., Oh S., Marks R.J., II, Chang A.T.C. (1992) - *Inversion of snow parameters from passive microwave remote sensing measurements by a Neural Network trained with a multiple scattering model*. IEEE Trans. Geosci Remote Sensing, 30, (5): 1015-1024.

Manoscritto ricevuto il 16/02/2004, accettato il 27/07/2004.
