

Analisi di serie temporali di mappe di copertura nevosa ottenute da immagini Cosmo-SkyMed in aree alpine

B. Ventura (*), T. Schellenberger (*), C. Notarnicola (*), M. Zebisch (*)
V. Maddalena (**), L. Tampellini (**), R. Ratti (**)

(*) EURAC-Institute for Applied Remote Sensing, Viale Druso 1, Bolzano, Italia

(**) CGS-Compagnia Generale per lo Spazio, Via Gallarate 150, Milano, Italia

Riassunto

Questo lavoro presenta i risultati ottenuti nel progetto “SNOX- Snow cover and glacier monitoring in alpine areas with COSMO-SkyMed X-band data” finanziato dall’Agenzia Spaziale Italiana. I principali argomenti discussi in questo lavoro sono: lo sviluppo di una tecnica per la definizione della copertura nevosa e l’analisi della serie temporale delle mappe ottenute al fine di meglio comprendere quanto robusta è la metodologia identificata rispetto alla scelta delle immagini di riferimento ed i diversi valori di soglia utilizzati. Sono state elaborate immagini COSMO-SkyMed in modalità *Stripmap PingPong* e doppia polarizzazione duale VV-VH acquisite nel periodo 2010-2011 sull’area di test in Alto Adige. La metodologia per l’identificazione e il monitoraggio della copertura nevosa con le immagini COSMO-SkyMed si basa principalmente sulla differenza del segnale retrodiffuso dalla neve bagnata rispetto alla aree non ricoperte da neve o con neve asciutta. Le diverse tecniche di filtraggio usate per ridurre lo *speckle* e consentire una migliore distinzione fra le distribuzioni delle aree con neve e senza neve, indicano che il filtro FROST e il filtro Gamma DEMAP con una finestra 7x7 soddisfano tali requisiti. Successivamente sono state definite le soglie per il riconoscimento delle aree ricoperte da neve rispetto a quelle senza neve in base alla differenti classi di uso del suolo (ad es. rocce, suolo nudo e praterie alpine). L’utilizzo di differenti soglie determina una variazione della copertura nevosa identificabile tra il 2% e l’8% rispetto alla copertura nevosa ottenuta da immagini LANDSAT e considerate come riferimento durante l’analisi.

Abstract

This work presents the results carried out in the project “SNOX- Snow cover and glacier monitoring in alpine areas with COSMO-SkyMed X-band data” funded by the Italian Space Agency. The work addresses two main topics: the development of a snow cover mapping technique by using COSMO-SkyMed images and the analysis of the proposed methods with respect to the parameters used to define the presence of snow such as the reference image and chosen threshold snow/no snow.

Stripmap PingPong mode, dual polarizations VV-VH images have been acquired on the test site, located in South Tyrol (Northern Italy) from November 2010 to April-May 2011.

The methodology for identification and monitoring the snow cover area with COSMO-SkyMed images is mainly based on the difference in backscattering behavior between snow covered and snow free areas. Two aspects have been deeply investigated: the noise reduction and how to have more efficient snow detection. Frost and Gamma DEMAP filter at a filter size 7x7 show good results for a clearer distinction of distribution of backscattering coefficients for snow and no-snow areas. Second, the thresholds for detection of snow and no-snow areas are defined based on different land-use classes (e.g. grassland and rocks). The use of different thresholds determines a variation of snow cover area (SCA) between 2% and 8% with respect to SCA obtained from LANDSAT images and considered as a reference in this study.

Introduzione

La conoscenza dell'estensione del manto nevoso e dello stato dei suoi costituenti (contenuto di acqua, dimensione dei grani) forniscono informazioni fondamentali in numerosi campi di applicazione come l'idrologia, la meteorologia, la prevenzione di disastri naturali (alluvioni e valanghe). A causa della rapidità con la quale le caratteristiche fisiche e morfologiche della neve possono evolvere, il telerilevamento rappresenta un strumento chiave per lo studio dei fenomeni correlati alle dinamiche del manto nevoso. In particolare, l'utilizzo di tecniche di telerilevamento radar mediante sensori SAR (*Synthetic Aperture Radar*) può rappresentare lo strumento necessario per tale obiettivo poiché supera una delle principali limitazioni dei sensori ottici: la copertura nuvolosa. Naturalmente, la possibilità di utilizzare le informazioni derivanti sia da immagini ottiche che SAR rappresenta un potente strumento per il monitoraggio della neve.

Negli ultimi anni numerose ricerche sono state condotte per l'utilizzo dei sensori SAR in banda C ($\lambda \sim 5\text{cm}$) (Nagler et al., 1998, Nagler, Rott, 2000, Malnes, Guneriusen, 2002) ai fini della mappatura della neve e basandosi sul rilevamento dei cambiamenti dello stato della neve (*change detection technique*) (Nagler, Rott, 2005). Si è mostrato che nel caso di immagini in banda C, tale metodologia produce risultati ampiamente variabili dallo stato della neve in particolare dal suo contenuto di acqua liquida. Scarsa presenza di acqua all'interno del manto nevoso o assenza (caso della "neve asciutta", *dry snow*) risulta in una debole interazione con il segnale elettromagnetico.

La costellazione *COSMO-SkyMed* (CSK), il più grande programma spaziale italiano dedicato all'osservazione della Terra, rappresenta una grande opportunità per poter ampliare le conoscenze relative alla risposta della neve nel campo delle microonde. Infatti, l'uso di una lunghezza d'onda più piccola, $\lambda = 3.12\text{ cm}$, parallelamente ad una alta risoluzione (fino ad 1 m) e ad una maggiore frequenza nei passaggi radar (8 giorni in modalità standard con costellazione completa), fornisce la possibilità di analizzare il problema del monitoraggio e la generazione di mappe della neve con una elevata risoluzione spaziale e con tempi di risposta rapidi. Inoltre, data la ridotta lunghezza d'onda, la banda X potrebbe essere più sensibile alle dimensioni dei costituenti del manto nevoso determinando quindi maggiori informazioni sui costituenti interni dello strato di neve.

Gli obiettivi della ricerca illustrata in questo lavoro sono:

- adattare gli algoritmi per il monitoraggio della neve con elevato contenuto di acqua liquida (*wet snow*) sviluppati per le immagini in banda C, al caso delle immagini in banda X utilizzando i dati COSMO-SkyMed acquisiti sull'area alpina dell'Alto Adige;
- effettuare uno studio di sensibilità dell'algoritmo rispetto ad alcuni dei suoi parametri chiave come la scelta delle immagini di riferimento e dei valori di soglia per la distinzione fra la presenza ed/o assenza di neve.

Nella prossima sezione verranno descritte le caratteristiche dell'area di test e dei dati CSK utilizzati; successivamente verranno presentate le tecniche utilizzate per ottenere le mappe della neve. Particolare attenzione verrà data alla fase di filtraggio effettuata in fase di pre-elaborazione della immagine e alla determinazione della conseguente soglia per l'identificazione delle aree neve/non neve. Nell'ultima sezione verranno illustrati e discussi i risultati ottenuti con la metodologia proposta.

Descrizione dell'area di studio e delle immagini CSK acquisite

L'area di test considerata per le attività di definizione dell'algoritmo per la mappatura della neve con dati CSK è localizzata in Val d'Ultimo (Alto Adige, Italia). La superficie dell'Alto Adige è di circa 7.400 km² con un'altezza minima di 190 m e massima di 3.890 m. L'area è coperta da neve per circa 2-3 mesi l'anno e l'altezza del manto nevoso può raggiungere i 3-5 m durante la stagione invernale alle quote più alte. Relativamente a questa area è disponibile inoltre una eccellente rete di misure nivometriche costituita da 8 stazioni automatiche che misurano altezza del manto nevoso e dati meteorologici, e 30 stazioni di osservazioni settimanali per diverse misure nivometriche. In particolare, la Val d'Ultimo è una valle d'alta montagna in cui è ubicato il ghiacciaio Weisbrunn Ferner, uno dei più intensivamente monitorati in Alto Adige. In tale area sono inoltre ubicati una

stazione di misurazione automatica della neve ed una stazione meteorologica. L'area di interesse è definita da un rettangolo con le seguenti coordinate geografiche: UL: lat 46.67472N, long. 10.76805; LR: lat. 46.44277N long. 11.08500E.

Sono state acquisite sull'area della Val d'Ultimo una serie temporale di immagini CSK in modalità Ping-Pong, doppia polarizzazione VV-VH con angolo di incidenza medio di 36.39°. Le immagini CSK sono state acquisite nell'intervallo di tempo che va da aprile 2010 ad aprile 2011 in modo tale da avere riferimenti relativi sia alla stagione invernale che a quella dello scioglimento della neve. Le immagini acquisite nel periodo estivo sono utilizzate per fornire un segnale di riferimento in assenza di copertura nevosa. I dettagli delle acquisizioni sono riportati in tabella 1.

Alcune campagne di misura sono state effettuate in contemporanea alle acquisizioni CSK in modo da raccogliere informazioni *in situ* dello stato delle neve con le misure dei seguenti parametri: densità della neve, umidità della neve, temperatura della neve, profondità della neve e rugosità superficiale.

<i>Data di acquisizione</i>	<i>Periodo di interesse</i>	<i>Geometria di acquisizione</i>
20.10-04-26	scioglimento	RA – PP 10
2010-04-27*	scioglimento	RA – PP 10
2010-09-01	estive	RA – PP 10
2010-09-02	estive	RA – PP 10
2010-09-17	estive	RA – PP 10
2010-11-28*	invernale	RA – PP 10
2010-12-23	invernale	RA – PP 10
2011-01-23*	invernale	RA – PP 10
2011-03-12	scioglimento	RA – PP 10
2011-04-05*	scioglimento	RA – PP 10

*Tabella 1 – Lista delle immagini COSMO-SkyMed acquisite. RA=Right Ascending; PP10 = Ping-Pong con beam 10. Tutte le immagini hanno doppia polarizzazione VV – VH. L'asterisco * indica le date in cui sono state condotte le campagne di misura.*

Algoritmo per la generazione delle mappe della neve

Lo sviluppo della metodologia per il monitoraggio della copertura nevosa è stato ottenuto adattando alle caratteristiche della banda X e alla maggiore risoluzione delle immagini CSK, la metodologia sviluppata da (Nagler Rott, 2000) per immagini SAR acquisite in banda C. Da un punto di visto elettromagnetico, in banda X l'interazione con la neve è regolata dallo stato della neve (Ulaby et al., 1986). Possono essere identificati due differenti stati della neve in base al contenuto di acqua liquida contenuto in essi, denominati come neve bagnata (*wet snow*) e neve asciutta (*dry snow*). La risposta elettromagnetica è differente nei due casi ed è regolata principalmente dalle proprietà dielettriche del mezzo. Quando la neve presenta un alto contenuto di acqua liquida, infatti, la differenza del valore della costante dielettrica all'interfaccia aria-neve è elevata e di conseguenza il valore del coefficiente di retrodiffusione misurato dal sensore è basso poiché è influenzato dai fenomeni dispersivi legati all'assorbimento negli strati superficiali piuttosto che al contributo volumetrico. Nel caso di neve asciutta il rapporto tra le costanti dielettriche aria-neve è vicino alla unità e, quindi, il segnale risulta essere più alto poiché diventano predominanti gli effetti della diffusione volumetrica degli strati sottostanti e soprattutto all'interfaccia con lo strato di suolo sottostante. Tale differenza nella risposta elettromagnetica della neve bagnata rispetto alle aree ricoperte da neve asciutta oppure in assenza di neve è alla base della metodologia sviluppata in questo lavoro come illustrato in figura 2. Queste considerazioni indicano anche una delle limitazioni del dato SAR nel monitoraggio della neve poiché con i sensori attuali solo la neve con notevole contenuto di acqua liquida è in grado di produrre variazioni significative nel segnale SAR.

Nella fase iniziale (*pre-processing*), le immagini CSK vengono elaborate mediante operazioni di *multilooking*, filtraggio, e geocodifica (contemporaneamente alla correzione radiometrica) con l'utilizzo del software SARscape® v. 4.2. L'operazione di filtraggio e l'analisi sui diversi filtri è utile al fine di meglio definire i valori di soglia che consentono di distinguere tra il contributo dovuto alla neve bagnata e quello imputabile al suolo con assenza di neve (o con presenza di neve asciutta). Lo scopo di tale analisi è di ridurre al minimo eventuali errori di classificazione quando si considera il rapporto tra le distribuzioni relative alle aree coperte da neve rispetto a quelle senza neve. I filtri di Frost, e Gamma DEMAP (*Distribution Entropy A Posteriori Mean*) con differenti dimensioni delle finestre sono stati applicati alle immagini CSK. La capacità da parte di un filtro di ridurre lo *speckle* può essere misurato confrontando l'*effective number of looks* ($enl = \text{media}/\text{varianza}$) prima e dopo il filtraggio.

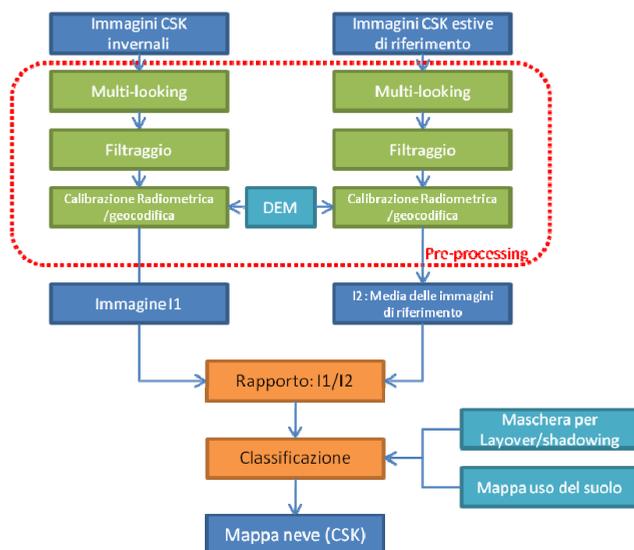


Figura 2 – Diagramma di flusso utilizzato per la determinazione delle mappe della neve con le immagini COSMO-SkyMed.

<i>Filtri</i>	<i>Dimensione</i>	<i>enl (filter input)</i>	<i>enl (VH)</i>	<i>enl (VV)</i>
Nessun filtro	-	-	0.76	1.03
Frost	5x5	1	2.56	4.27
Frost	7x7	1	2.81	4.76
Frost	9x9	1	2.86	4.90
Gamma DEMAP	5x5	1	2.40	4.18
Gamma DEMAP	7x7	1	2.40	4.34
Gamma DEMAP	9x9	1	2.39	4.38

Tabella 2 – Effetti dei differenti filtri utilizzati per ridurre lo *speckle* con indicazione delle dimensioni della finestra di filtraggio e del numero equivalente di look (*enl*).

Per ciascun filtro è stata inoltre analizzata la dipendenza dalla dimensione della finestra considerando i casi: 3x3, 5x5, 7x7 e 9x9 pixel. Nel caso della finestra di dimensione 7x7, il filtro Gamma DEMAP e il filtro Frost risultano essere caratterizzati non solo da una riduzione della varianza, ma anche da una minore influenza rispetto alla *texture*. La dipendenza della soglia dal tipo di filtro non è predominante poiché il filtraggio non ha molto influenza sul valore medio del coefficiente di retrodiffusione e sulla media del rapporto (figura 3), serve tuttavia a ridurre gli errori di classificazione in quanto riduce la dimensione delle code delle distribuzioni, proprio dove si presenta la sovrapposizione delle due distribuzioni. Considerando il filtro Gamma DEMAP sono state determinate soglie più basse (tabella 4) rispetto a quelle identificate nella banda C, normalmente pari a circa -3 dB. Le soglie ottenute sono relative a diverse coperture del suolo predominanti nell'area di interesse quali suolo nudo/roccia ed praterie alpine.

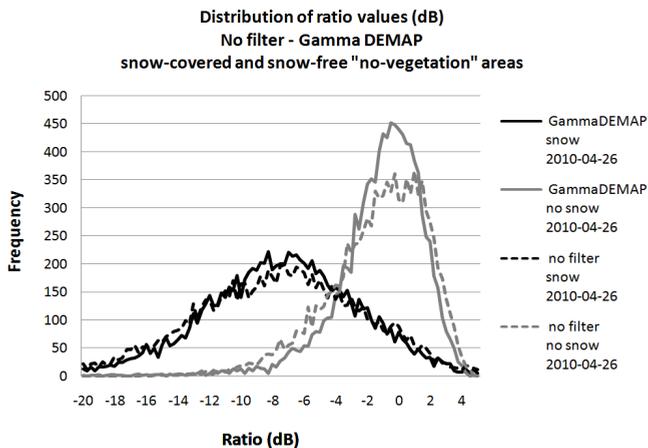


Figura 3 – Distribuzione del rapporto nel caso di aree ricoperte da neve oppure senza neve (snow-no snow areas).

Gamma DEMAP (7x7)	Praterie alpine	suolo nudo
VV	-2.3 dB	-2.2 dB
VH	-2.0 dB	-1.3 dB

Tabella 4 – Soglie ottenute a partire dal filtraggio Gamma DEMAP per la distinzione neve-non neve rispetto alla polarizzazione e al tipo di suolo.

Dopo aver ottenuto l'immagine geocodificata e corretta radiometricamente è stata calcolata l'immagine rapporto (con valori lineari dei coefficienti di backscattering) dividendo l'immagine acquisita durante il periodo invernale rispetto alla immagine estiva ovvero caratterizzata da assenza di copertura nevosa. Tutti i pixel aventi un valore al di sotto della soglia definita sono classificati come neve bagnata. La soglia r_0 è calcolata come segue:

$$r_0 = \sqrt{R_{snow} \cdot R_{no-snow}} \quad [1]$$

nell'ipotesi che le distribuzioni dei rapporti fra i coefficienti di backscattering in presenza ed assenza di neve abbiano la stessa probabilità a priori (Rignot et al. 1993). R_{snow} rappresenta la media della distribuzione del rapporto delle aree ricoperte da neve; $R_{no-snow}$ è invece relativo alle aree dove vi è assenza di neve. I valori di soglia che ne derivano si ottengono da una indagine statistica sulle diverse immagini a disposizione considerando diverse aree omogenee e tenendo anche in considerazione le diverse coperture del suolo. Il termine $R_{no-snow}$ è molto importante nel calcolo del

rapporto poiché rappresenta il rapporto tra aree nelle due acquisizioni differenti dove non vi è copertura nevosa. Ne deriva quindi che oltre alla tecnica di filtraggio usata e allo stato del suolo dell'area osservata, il valore di soglia dipende anche dalla immagine di riferimento. Per poter determinare quantitativamente tale dipendenza, si è analizzato sia il caso in cui come immagine di riferimento si è utilizzata la media delle tre immagini di Settembre 2010 (tabella 1) sia il caso in cui è stata considerata ciascuna singola immagine come riferimento.

Inoltre, poiché le distribuzioni delle aree neve e non-neve si sovrappongono parzialmente, la scelta del valore di soglia risulta essere un aspetto importante per l'analisi presentata. Per analizzare la dipendenza della SCA da r_0 sono state confrontate le mappe di copertura nevosa ottenute con $r_0 = -2.3$ dB, con quelle ottenute utilizzando il valore di soglia tipico per le immagini in banda C, $r_0 = -3.0$ dB ed anche ottenuto in analisi con i dati in banda X del sensore TERRASARX (Venkataraman et al., 2008).

Analisi e discussione dei risultati

Al fine di comprendere la capacità di individuare la presenza della neve da parte del sensore CSK, le mappe di copertura nevosa ottenute dalle immagini CSK sono state confrontate con mappe di copertura della neve derivanti da immagini ottiche LANDSAT 7 ETM+. Va sottolineato che i due strumenti sono sensibili a diversi aspetti della neve e che lavorando in due parti molto diverse dello spettro elettromagnetico individuano caratteristiche diverse del manto nevoso. Il confronto ha comunque il senso di indicare come si pone il dato SAR rispetto a quello ottico che viene normalmente utilizzato per questo monitoraggio e fino a che punto i risultati dei due tipi di sensori si possono integrare. Le immagini LANDSAT 7 ETM+ considerate hanno data di acquisizione vicine all'acquisizione CSK come indicato in tabella 5. Queste ultime sono state elaborate per ottenere le mappe della neve utilizzando l'algoritmo di classificazione sviluppato da Rastner et al. (Rastner, 2009)

<i>Sensore</i>	<i>data</i>
COSMO-SkyMed	26 Aprile 2010
LANDSAT 7 ETM+	20 Aprile 2010
COSMO-SkyMed	12 Marzo 2011
LANDSAT 7 ETM+	06 Marzo 2011
COSMO-SkyMed	05 Aprile 2011
LANDSAT 7 ETM+	07 Aprile 2011

Tabella 5 – Lista delle date di acquisizione per i sensori COSMO-SkyMed e LANDSAT 7 ETM+

E' importante notare che le immagini analizzate si riferiscono tutte al periodo di scioglimento della neve e, di conseguenza, la distanza tra le date di acquisizione potrebbe risultare un fattore determinante nel confronto delle mappe ottenute.

Il confronto tra le due mappe è stato effettuato mediante l'utilizzo della matrice di confusione (Schowengerdt, 1997) confrontando le classi: Neve e Non-Neve nelle due rispettive classificazioni. Per poter effettuare tale confronto le aree caratterizzate da effetti di *layover*, *shadowing* per le immagini CSK e con copertura nuvolosa per le immagini LANDSAT sono state mascherate. I risultati di tale confronto sono indicati nella tabella 6 e in figura 7.

L'utilizzo della soglia di -2.3 dB e -3.0 dB comporta una differenza nella SCA variabile da 2 a 6% nella classe "neve" e da 1 a 4% nella classe "no-neve". Si nota nella matrice di confusione il valore alto dell'errore di omissione del dato SAR rispetto a quello ottico variabile da 38 a 49%, osservabile anche in figura 7. Le differenze tra le mappe CSK e LANDSAT possono inoltre essere legate alla differente data di acquisizione, differente geometria di acquisizione, differente sensibilità rispetto

allo stato della neve e inaccuratezza nella geocodifica. La sovrastima della copertura nevosa da parte del dato LANDSAT rispetto al dato SAR è stata osservata in altri lavori analoghi (Nagler, 2000).

	NEVE - LANDSAT	NO NEVE - LANDSAT
<u>26 Aprile 2010</u>	%	%
NEVE - CSK	57.7 63.7	2.3 3.0
NO NEVE - CSK	42.3 36.3	93.6 97.1
<u>12 Marzo 2011</u>	%	%
NEVE - CSK	51.4 53.0	2.5 2.4
NO NEVE - CSK	48.6 46.9	97.5 97.6
<u>05 Aprile 2011</u>	%	%
NEVE - CSK	72.1 70.4	6.4 6.3
NO NEVE - CSK	27.9 29.6	93.6 93.7

Tabella 6 – Matrici di confusione del confronto tra le SCA ottenute da COSMO-SkyMed (CSK) e da LANDSAT 7 ETM+ utilizzando i valori di soglia $r_0 = -2.3$ dB e $r_0 = -3.0$ dB (in corsivo). Le percentuali sono considerate rispetto all'area totale delle classi neve e no-neve dell'immagine Landsat. In questa tabella si considera come immagine di riferimento SAR quella ottenuta come media delle 3 acquisizioni estive.

La scelta della immagine di riferimento risulta avere un considerevole effetto sul valore di soglia utilizzato (Luoju, 2009) e, quindi, anche sul risultato della classificazione. L'uso della soglia $r_0 = -2.3$ dB è stato ottenuto sia utilizzando come immagine di riferimento la media delle tre immagini di Settembre sia l'immagine del 17 Settembre. Quando si considerano separatamente le immagini del 1 e 2 Settembre il valore di r_0 assume rispettivamente valore -1.7 dB e -1.6 dB. Al variare di r_0 si nota una variazione della SCA fino al 6% utilizzando questi valori di soglia. Se invece si considera il valore di soglia $r_0 = -3.0$ dB (applicata sulle classi suolo nudo e praterie alpine) si trovano differenze fino al 12% per la SCA, sempre rispetto alla SCA LANDSAT usata come riferimento.

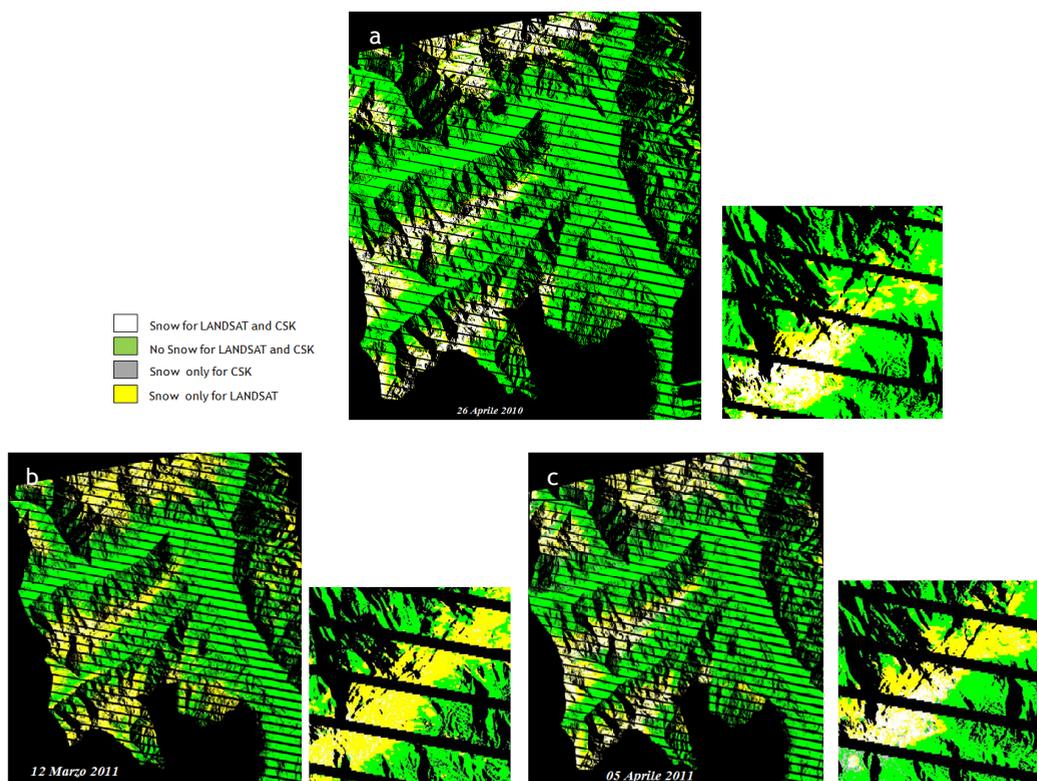


Figura 7 – Confronto delle SCA ottenute dalle immagini CSK e LANDSAT per le date del 26 Aprile 2010 (a), 12 Marzo 2011(b) e 05 Aprile 2011 (c). (COSMO-SkyMed -ASI ©- All rights reserved).

SCA (%)	r_0 (dB)	Ref. image
60.0	-3.0	01-02-17 Sept 2010 (media)
51.5	-3.0	01 Sept 2010
55.5	-3.0	02 Sept2010
63.0	-3.0	17 Sept 2010
65.9	-2.3	01-02-17 Sept 2010 (media)
61.8	-1.7	01 Sept 2010
66.1	-1.6	02 Sept2010
68.2	-2.3	17 Sept 2010

Tabella 6 – Analisi della dipendenza della SCA dal valore di soglia r_0 in dipendenza di diverse immagini di riferimento.

Conclusioni

In questo lavoro è stata analizzata la possibilità di distinguere aree ricoperte da neve bagnata rispetto ad aree con assenza di neve mediante l'uso dei dati COSMO-SkyMed.

E' stato effettuato uno studio sulle differenti tecniche di filtraggio per individuare quale potesse garantire una migliore distinzione tra le distribuzioni dei coefficienti di retrodiffusione per le aree ricoperte da neve rispetto alle aree senza copertura nevosa. Utilizzando una finestra di dimensione 7x7 sia il filtro Gamma DEMAP che il filtro FROST garantiscono una migliore distinzione delle due aree e una minore influenza sulla variabilità locale del segnale. La dipendenza della SCA dalla soglia è stata inoltre analizzata considerando una soglia di -2.3 dB rispetto ad una soglia di -3.0 dB, una variazione della SCA fino al 6% rispetto ad una SCA ottenuta da immagine LANDSAT usata come riferimento. Il valore di soglia utilizzato risulta essere dipendente anche dalla immagine estiva usata come riferimento. Se si considera la media delle immagini di riferimento il valore di soglia, che fornisce la migliore distinzione delle classi neve-non neve, risulta essere $r_0 = -2.3$ dB. Nel caso in cui si utilizzi una singola immagine la soglia può arrivare a -1.6/-1.7 dB. Considerata questa ampia variabilità per il valore di r_0 , è preferibile utilizzare una media delle immagini di riferimento così da poter ottenere una immagine che dovrebbe rappresentare un andamento medio delle condizioni al suolo durante il periodo estivo. L'analisi effettuata in questo lavoro verrà estesa sull'area del Brennero dove sono state acquisite immagini con differente geometria (*Right Descending*, e angolo di incidenza medio pari a 37.73°) e differente ora di acquisizione (acquisizione intorno alle 17.20) in modo tale da identificare altri aspetti del manto nevoso e meglio identificare potenzialità e svantaggi della metodologia descritta. Verranno inoltre analizzate le immagini dell'intero periodo invernale acquisite da Novembre a Maggio.

Il lavoro è stato svolto nell'ambito del contratto n. I/048/09/0 finanziato dall'Agenzia Spaziale Italiana.

Bibliografia

- Luoju K., Pulliainen J. and Metsamaki S. (2009), "Evaluation of the single Reference Image Snow-Covered Area Estimation Method for the Boreal Forest Zone", *Proc IGARSS'09*, pp. 867-870.
- Malnes E., Guneriussen, T. (2002), "Mapping of snow covered area with Radarsat in Norway", *Proc. IGARSS'02*, Toronto, Canada, 24-28 June.
- Nagler T., Rott, H. (2000), "Retrieval of wet snow by means of multitemporal SAR data", *IEEE Trans. Geosc. Rem. Sens.*, Vol. 38(2), 754-765.
- Nagler, T. and Rott H. (2000), "Retrieval of Wet Snow by Means of Multitemporal SAR Data", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, Vol. 38, No. 2.
- Nagler, T. and H. Rott (2005), "Snow classification algorithm for Envisat ASAR", *Proc. of the 2004 Envisat & ERS Symposium, ESA SP-572*.
- Nagler, T., Rott, H., Glendinning, G., (1998), "Snowmelt modelling using Radarsat data", *Proc. of ADRO final symposium*, Montreal.
- Rastner, P., Irsara L., Schellenberger T., Della Chiesa S., Bertoldi G., Endrizzi S., Notarnicola C., Steurer C., Zebisch M. (2009), "Snow cover monitoring and modeling in the Alps using multi temporal MODIS data", *International Snow Science Workshop -Davos, Switzerland*.
- Rignot, E e Van Zyl, J. (1993), "Change detection techniques for ESR-1 SAR data", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing* 31, 4 (1993), 896-906.
- Schowengerdt R. A. (1997), *Remote Sensing: models and method for image processing*, 310-323, Academic Press, San Diego, CA.
- Ulaby F. T., Moore, R. K., Fung, A. K. (1986). *Microwave remote sensing*, vol.3, Dedham, MA: Artech House.
- Venkataraman, G., Singh, G. and V. Kumar (2008), "Snow cover area monitoring using multi-temporal TerraSAR-X data", 3rd TerraSAR-X Science Team Meeting 25/26 November 2008, DLR – Oberpfaffenhofen.