

Validazione di un algoritmo per la stima della manto nevoso basato su dati MODIS a 250 m con immagini LANDSAT e dati a terra

Nico Mölg (*), Martial Duguay (*), Thomas Schellenberger (*),
Anke Tetzlaff (*), Armin Costa (*), Luca Irsara (**), Roberto Monsorno (*),
Christian Steurer (*), Marc Zebisch (*), Claudia Notarnicola (*)

(*) EURAC-Institute for Applied Remote Sensing, Viale Druso 1, Bolzano, Italia
(**) QBUS s.r.l., Abtei/Badia, Italy

Riassunto

Le mappe della neve contenute nei prodotti standard MODIS MOD10 sono utilizzate in numerosi contesti applicativi, sebbene uno dei problemi di cui risentono maggiormente, a causa della risoluzione di 500 m, è legato alla difficoltà di monitorare in modo accurato ambienti con notevole variabilità su piccola scala. Questa necessità, spesso evidenziata per il monitoraggio delle aree alpine, ha portato allo sviluppo di algoritmi che sfruttino la massima risoluzione del sensore MODIS ossia 250 m. In questo lavoro viene presentata la validazione di un algoritmo per la discriminazione della copertura nevosa ottenuta considerando esclusivamente le informazioni contenute nelle bande con risoluzione di 250 m. L'algoritmo include un modulo per la copertura nuvolosa specificatamente sviluppato e verificato per le aree alpine e sull'area europea. Per la validazione dell'algoritmo, sono stati utilizzati sia i dati satellitari a più alta risoluzione LANDSAT (30 m) che dati a terra di stazioni nivometriche distribuite sul territorio dell'Europa Centrale. Il confronto delle mappe MODIS con quelle derivate dal sensore LANDSAT indica un accordo pari a 93.6% su 16 immagini analizzate. Il disaccordo fra i due dati risiede essenzialmente nelle aree ricoperte da foreste vista la ben nota difficoltà di rilevare la neve al di sotto del manto vegetale denso.

Nel confronto con i dati a terra, sono state analizzate circa 148 stazioni distribuite fra Germania, Austria, Italia e Slovacchia. Nella maggior parte delle aree l'accuratezza è del 95% e diminuisce fino a 80% in aree con pendenze elevate ed esposizione Nord che rimangono prevalentemente in ombra durante l'acquisizione mattutina del satellite TERRA.

Abstract

Despite the availability and general performance of the MODIS MOD10 Snow Product, obvious limitations affect the monitoring of local environment and stress the need for an adapted and robust algorithm to map snow cover with the highest possible amount of spatial details. They can enable an improved determination of snow as well as more accurate depiction of the winter snowline.

This paper presents the extensive validation of an algorithm for snow cover monitoring based on MODIS satellite images. In the proposed approach, the main goal is to maintain the resolution as high as possible thus exploiting the 250 m resolution bands of MODIS. Having snow maps at 250 m improves notably the snow detection, especially in mountainous areas, characterized by extreme landscape variability. The detection algorithm also includes a dedicated cloud mask which has been already verified over the Alpine area and Central Europe. The data are processed at EURAC's processing & archiving facility conceived to deal with near-real time images, directly received through the EURAC receiving station located at Renon Peak (2230m).

The algorithm validation activities are carried out by using: high resolution snow maps derived from LANDSAT images and snow depth data from ground stations in selected test sites in Central Europe. A comparison of MODIS images to sixteen snow cover maps derived from LANDSAT showed an overall accuracy of 93.6 %. The residual mismatch area is often linked to forest, presumably due to changes in forest areas and is therefore linked to limited abilities of MODIS to accurately detect the snow under forest especially under extreme illumination conditions.

For the comparison with ground data, snow depth measurements from 148 ground stations in Germany, Austria, Italy and Slovakia were used. In most of the areas, the overall accuracy is around 95%. It decreases to around 80% in very rugged terrain restricted to in-situ stations along Northern facing slopes, which lie in shadow in winter during the early TERRA acquisition.

Introduzione

La conoscenza dell'estensione del manto nevoso e delle sue variazioni stagionali costituiscono informazioni chiave in numerosi campi di applicazione come l'idrologia, la meteorologia, la prevenzione di disastri naturali (alluvioni e valanghe). Negli ultimi anni, abbondanti nevicate si sono alternate con periodi siccitosi, sulle Alpi, dando luogo ad eventi valanghivi significativi oppure periodi di magre primaverili ed estive. Alcune di queste considerazioni anche in riferimento alla evoluzione stagionale ed inter-annuale del manto nevoso, possono essere seguite con gli strumenti propri del telerilevamento. In questo contesto, grazie alla sua alta frequenza temporale, il sensore NASA MODIS (*Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer*) è utile per molte applicazioni globali e regionali legate all'evoluzione del manto nevoso (Hall et al., 2002; Wang et al., 2008). Tuttavia, per analisi regionali e/o locali, i prodotti MODIS standard MOD10 non sempre sono soddisfacenti ed in numerosi lavori si evidenzia la necessità di sviluppi che tengano in considerazione gli aspetti locali dell'area di studio (Hall & Riggs, 2007; Hall et al., 2002; Klein & Barnett, 2003; Liang et al., 2008; Maurer et al., 2003; Zhou et al., 2005). Alcune delle limitazioni che il prodotto MOD10 presenta a livello locale sono: la risoluzione spaziale di 500 m ed la scarsa accuratezza della copertura nuvolosa. Questo lavoro presenta lo sviluppo di un nuovo algoritmo per la copertura nevosa e la relativa validazione tramite l'uso di immagini LANDSAT e dati a terra derivanti da stazioni nivometriche. L'algoritmo comprende sia l'utilizzo delle bande MODIS a 250 m ed un modulo per la copertura nuvolosa (Cappelluti et al., 2006, Notarnicola et al., 2011).

Il lavoro si articola nel seguente modo. Dopo una descrizione dell'area di studio e dei dati satellitari ed ausiliari utilizzati, viene introdotto l'algoritmo con i suoi aspetti specifici. I risultati derivanti dall'applicazione di questo algoritmo vengono poi validati con le mappe della neve ottenute da dati LANDSAT e con i dati a terra di stazioni nivometriche. Vengono, infine, presentati e discussi i risultati della validazione.

Descrizione dell'area di studio, dei dati satellitari ed ausiliari

L'area di test considerata per le attività di definizione dell'algoritmo per la mappatura della neve con dati MODIS a 250 m è relativa all'Europa Centrale definita dalle coordinate geografiche riportate in tabella 1.

	Longitudine (gradi)	Latitudine (gradi)
Nord-Ovest	5.0	51.0
Sud-Est	30.0	42.0

Tabella 1 – Coordinante geografiche indicanti i limiti dell'area di studio.

In tale area rimangono escluse gran parte delle aree scandinave e la zona centrale e sud della Spagna.

I dati MODIS necessari per lo sviluppo dell' algoritmo sono i seguenti:

- MODIS MOD09GQ e MOD09GA (TERRA – AQUA): dati di riflettenza corretta per il contributo atmosferico con bande a risoluzione di 250m e 500m;
- MODIS MOD021KM, dati di riflettenza non corretta per il contributo atmosferico con bande a risoluzione di 1 km utilizzati per l'identificazione della copertura nuvolosa;
- MOD03 : data set utile alla corretta geolocalizzazione del dato.

Come dati ausiliari sono stati considerati: un modello digitale del terreno (DEM) derivante da dati SRTM ricampionato a 250 m; mappe di uso del suolo per le varie classi forestali (conifere, latifoglie e boschi misti) estratte dalla carta CORINE Landcover 2006 disponibile al seguente sito web :

http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data#c12=corine+land+cover+version+13&b_start=0&c17=CLC2006.

Per l'area della Svizzera, è stata considerata la mappa elaborata dal Joint Research Center (JRC) disponibile al seguente sito web: <http://forest.jrc.ec.europa.eu/forest-mapping>

Per la validazione sono state considerate immagini LANDSAT 7 ETM+ relative al periodo di studio Agosto 2005- Luglio 2006 acquisite in contemporanea con il dato MODIS e che presentavano un limitata copertura nuvolosa. I dati a terra considerati nello stesso periodo provengono da stazioni nivometriche ubicate in Austria, Germania, Slovacchia ed Italia (Alto-Adige).

Algoritmo per la generazione delle mappe della neve da dati MODIS

La seguente sezione contiene una breve descrizione degli vari algoritmi utilizzati per il calcolo della copertura nevosa. Lo schema generale dell' algoritmo è riportato nella figura 2.

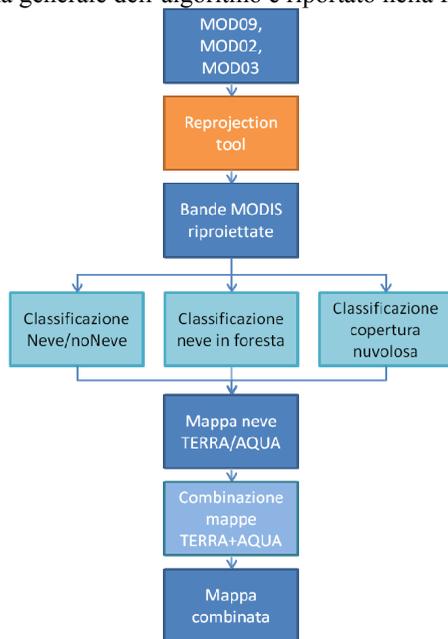


Figura 2 – Diagramma di flusso utilizzato per la determinazione delle mappe della neve con le immagini MODIS.

Nella fase iniziale di pre-elaborazione tutti i dati MODIS (MOD09, MOD02 e MOD03) ed in particolare le bande utilizzate nell'algoritmo vengono riportati nella proiezione ETRS-LAEA. Il modulo di riproiezione è sviluppato in modo da poter elaborare sia i prodotti standard MODIS che i granuli derivati direttamente da stazioni di ricezione satellitare come quella appartenente all'EURAC situata sul corno del Renon (Steurer et al., 2011).

L'individuazione delle classi avviene tramite l'uso di un classificatore a soglie, con valori che sono ottimizzati per tenere in considerazione la variabilità tipica dell'area di studio. Il vantaggio principale di questo algoritmo rispetto allo standard MODIS MOD10 è l'utilizzo esclusivo della banda 1 e 2 per la rivelazione delle classi Neve/NoNeve con conseguente maggiore risoluzione del prodotto finale (250 m). Il concetto applicato in questo algoritmo e sviluppato da Metsämäki et al., 2002 and Malcher et al., 2003 si basa sul fatto che la copertura nevosa può essere ben discriminata con l'uso delle bande del rosso e del vicino infrarosso, nonché con l'indice NDVI (*Normalized Differential Vegetation Index*) da esse derivato.

Una parte del classificatore è anche dedicato alla rilevazione della neve sotto le foreste ottenuta confrontando gli indici NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) fra un'immagine invernale e un'immagine estiva usata come riferimento (Klein et al., 1998).

Per la copertura nuvolosa si è applicato l'algoritmo sviluppato da Cappelluti et al., 2006, e validato da Notarnicola et al., 2011 che sfrutta un adattamento locale delle soglie al fine di meglio adattare la discriminazione dei corpi nuvolosi alle caratteristiche peculiari dell'area di studio.

Infine, per ridurre i problemi legati alla presenza delle nubi, e la presenza di "no data" dovuti all'angolo di incidenza del sensore e alla topografia, nelle stesse date, è stato inserito un modulo che combina le mappe della neve derivate da MODIS TERRA ed AQUA.

L'algoritmo fornisce in uscita anche alcuni indici di qualità relativamente alla qualità dei dati di input, alla mappatura della neve basata sull'indice NDSI (*Normalized Differential Neve Index*) ed alla mappa di copertura nuvolosa basandosi sulle classi di probabilità che vengono definite all'interno dell'algoritmo stesso di copertura nuvolosa (Cappelluti et al., 2006, Ackermann et al., 2006).

Validazione dell'algoritmo con dati LANDSAT e discussione dei risultati

Per la determinazione delle mappe della neve da dati LANDSAT è stato utilizzato un algoritmo sviluppato da Hall et al., 1995 e successivamente adattato soprattutto per quanto riguarda le aree montane da Rastner et al., 2009. Per il periodo 2005/2006, 16 immagini LANDSAT 7 ETM+ sono state scelte in modo che fossero distribuite omogeneamente sull'area di studio e nell'arco temporale considerato, con scarsa copertura nuvolosa ed elaborate con l'algoritmo sopra citato. Per il dato MODIS, il confronto è avvenuto con le mappe derivate dalle acquisizioni del sensore TERRA.

Poiché l'obiettivo è la valutazione delle classi Neve/NoNeve sono state mascherate le seguenti aree:

- Corpi nuvolosi presenti sia nel dato MODIS che in quello LANDSAT (si sottolinea che i dati anche se acquisiti lo stesso giorno presentano un'ora di acquisizione differente);
- I corpi idrici;
- I valori non elaborati dovuti ad errori nel dato di input ed indicati come "no data";
- Le aree affette da errore delle immagini LANDSAT7 ETM+ che dal 2003 a cause di un malfunzionamento del sensore si presentano sotto forma di strisce equispaziate dove è totalmente assente il segnale registrato dal sensore (http://landsat.usgs.gov/products_slc_off_data_information.php).

La mappa LANDSAT infine viene ricampionata a 250 m con una soglia pari a 50% per l'identificazione di un pixel aggregato come classe "Neve". Un esempio di confronto fra le due mappe è mostrato in fig. 3.

Nel confronto fra mappe MODIS e LANDSAT, sebbene un accordo generale buono soprattutto a livello di *pattern* spaziali e con una accuratezza intorno al 90%, sono state individuate aree particolarmente critiche dove la discriminazione della neve da parte del sensore LANDSAT può essere difficoltosa, come le aree coperte da foreste, le aree in ombra nei mesi invernali e le aree al limitare dei corpi nuvolosi. Per localizzare meglio la distribuzione degli errori, sono state mascherate oltre a quelle aree già incluse all'inizio quali corpi idrici, *no data*, corpi nuvolosi ed errori LANDSAT, successivamente prima le aree ai bordi dei corpi nuvolosi e le zone in ombra e poi anche le foreste. I risultati globali di accuratezza su tutte le scene analizzate sono riportati nel grafico in fig. 4.

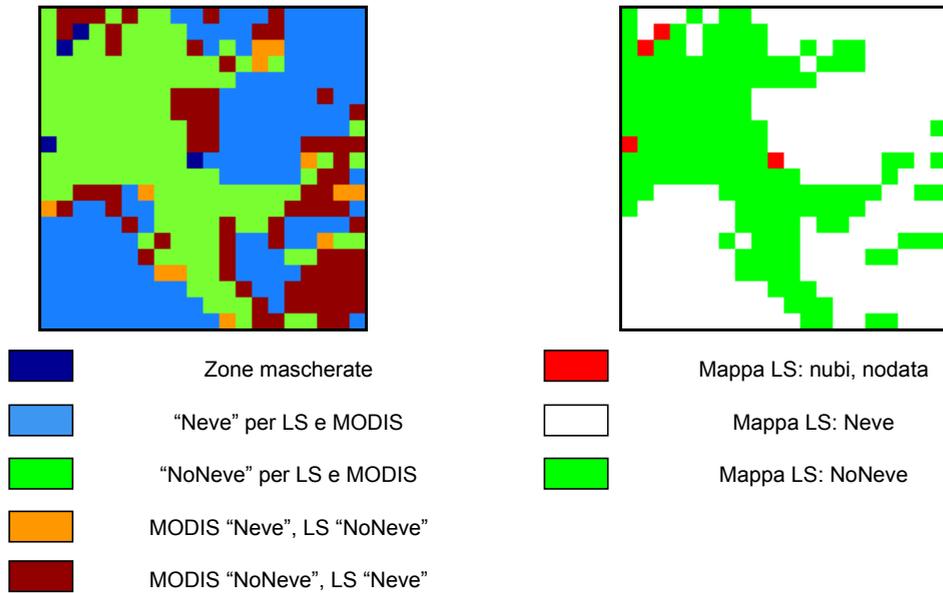


Figura 3 – Esempio di confronto fra le mappe MODIS e LANDSAT (LS).

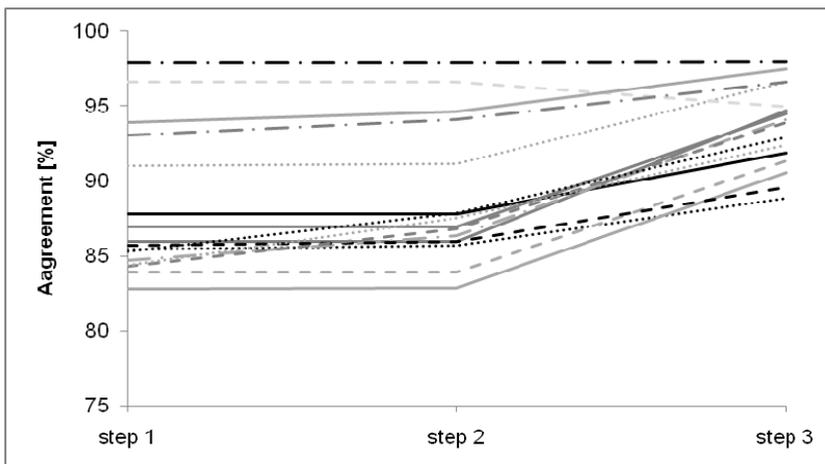


Figura 4 – Valori di accuratezza sulla classe "neve" in tre fasi successive. Step1: mascheramento dei corpi idrici, nuvolosi, nodata ed errori LANDSAT; step 2: mascheramento delle aree in ombra e delle aree ai bordi dei corpi nuvolosi; step 3: mascheramento delle aree di foresta.

Si osserva che nel passare dal passaggio 1 al passaggio 2 non si ottiene un netto miglioramento, quale è invece evidente con l'aggiunta del passaggio 3. Questo indica quindi che la discriminazione della neve in aree di foresta rimane un problema, che ovviamente non può essere imputabile solo al dato MODIS, ma può ritrovarsi anche nella classificazione del dato LANDSAT. La classificazione della neve nelle aree forestate è riconosciuto essere un problema legato anche all'utilizzo di tecniche automatiche di discriminazione delle neve basate su soglie fisse (Hall et al. 2000; Klein et al. 1997; Klein et al. 1998). In tabella 5, vengono riportati i risultati ottenuti nel caso del passaggio 3

indicato nella fig.4, dove sono anche indicati gli errori di omissione e commissione per le diverse scene analizzate. Per ogni scena è indicato la data di acquisizione ed il track e frame del dato LANDSAT (e.g. 20060302_183026: data 20060302, track 183, frame 026).

20060302	183026	MODIS		Overall match 97.96	20060206	191028	MODIS		Overall match 94.1	
		neve	no neve					neve		no neve
Landsat	neve	96.99	0.73		Landsat	neve	26.37	0.96		
	no neve	1.31	0.97			no neve	4.94	67.73		
20060302	183027	MODIS		Overall match 96.59	20051202	193025	MODIS		Overall match 89.55	
		neve	no neve					neve		no neve
Landsat	neve	95.55	0.09		Landsat	neve	56.41	0.51		
	no neve	3.32	1.04			no neve	9.93	33.14		
20060309	184027	MODIS		Overall match 88.85	20060204	193028	MODIS		Overall match 93.92	
		neve	no neve					neve		no neve
Landsat	neve	86.91	3.22		Landsat	neve	55.24	3.41		
	no neve	7.93	1.94			no neve	2.67	38.68		
20060325	184027	MODIS		Overall match 90.53	20060612	193028	MODIS		Overall match 94.95	
		neve	no neve					neve		no neve
Landsat	neve	41.96	1.02		Landsat	neve	4.15	0.47		
	no neve	8.45	48.57			no neve	4.58	90.8		
20060307	186025	MODIS		Overall match 91.85	20051107	194027	MODIS		Overall match 97.46	
		neve	no neve					neve		no neve
Landsat	neve	84.08	1.84		Landsat	neve	5.38	1.78		
	no neve	6.31	7.77			no neve	0.75	92.08		
20060307	186026	MODIS		Overall match 94.72	20060202	195028	MODIS		Overall match 92.39	
		neve	no neve					neve		no neve
Landsat	neve	91.41	1.58		Landsat	neve	64.25	4.42		
	no neve	3.7	3.31			no neve	3.19	28.14		
20060321	188026	MODIS		Overall match 91.32	20060202	195029	MODIS		Overall match 92.92	
		neve	no neve					neve		no neve
Landsat	neve	57.35	1.83		Landsat	neve	49.33	3.34		
	no neve	6.85	33.97			no neve	3.74	43.59		
20060206	191026	MODIS		Overall match 94.52	20060313	196029	MODIS		Overall match 96.61	
		neve	no neve					neve		no neve
Landsat	neve	94.19	0.22		Landsat	neve	13.02	0.39		
	no neve	5.26	0.33			no neve	3	83.59		

Tabella 5– Matrici di confusione per le classi Neve e NoNeve fra MODIS e LANDSAT 7 ETM+.

Validazione dell' algoritmo con dati a terra e discussione dei risultati

Le mappe MODIS sono state anche confrontate con dati derivanti da 148 stazioni nivometriche localizzate in Austria, Germania, Slovacchia e Italia. Lo scopo di questo ulteriore confronto è:

- Verificare l'accuratezza globale del prodotto MODIS anche in riferimento a dati a terra;
- Valutare come tale accuratezza cambia nel tempo;
- Localizzare le eventuali discrepanze fra dato MODIS e dato delle stazioni a terra.

I dati delle stazioni tedesche coprono la parte centrale e sud della Germania e sono stati ottenuti grazie al servizio meteorologici tedesco (*Deutscher Wetterdienst*), i dati delle stazioni austriache appartengono alla provincia *Land Niederösterreich*, i dati delle stazioni italiane provengono dalla provincia autonoma di Bolzano, i dati delle stazioni slovacche coprono l'intera nazione e sono del centro slovacche per le valanghe.

Le acquisizioni sono continue per tutto il periodo 2005/2006 per Germania, Austria, Slovacchia e due stazioni in Alto Adige. Il confronto fra un dato puntuale ed uno spazialmente distribuito pone dei problemi legati al fatto che il dato puntuale spesso non è rappresentativo dell'intera area occupata da un pixel MODIS (250m x 250m). I risultati di tale confronto sono riportati in tabella 6 ed indicano una variabilità nell'accuratezza tra 82% e 94%.

Germania del Sud		EURAC MODIS PRODUCT			
		Neve [%]	No neve [%]	Total	
in situ	Neve [%]	85.4	14.6	460	OA
in situ	No neve [%]	4.9	95.1	2735	93.7
Alto Adige (Italia)		EURAC MODIS PRODUCT			
		Neve [%]	No neve [%]	Total	
in situ	Neve [%]	79.2	20.7	1458	OA
in situ	No neve [%]	6.0	94.0	400	82.4
Austria del Sud		EURAC MODIS PRODUCT			
		Neve [%]	No neve [%]	Total	
in situ	Neve [%]	85	15	2567	OA
in situ	No neve [%]	9.7	90.3	13607	89.5
Slovacchia		EURAC MODIS PRODUCT			
		Neve [%]	No neve [%]	Total	
in situ	Neve [%]	72.1	27.9	365	OA
in situ	No neve [%]	6.1	93.9	704	86.4

Tabella 6 – Matrici di confusione del confronto tra mappe MODIS e dati delle stazioni nivometriche.

Si osserva una marcata dipendenza nel valore dell'accuratezza totale del numero di osservazioni in presenza o assenza di neve. Se il numero di stazioni in presenza di neve è maggiore si ottiene una diminuzione nel valore dell'accuratezza dovuto al fatto che l'errore di commissione (fra 5% e 10%) è sempre più basso dell'errore di omissione (fra 15% e 28%) in tutte le aree osservate. Questi errori per i siti in Germania ed Austria sono confrontabili con i risultati ottenuti da Parajka and Böschl (2006), con il prodotto standard MODIS MOD10 in Austria. In ogni caso, si osserva che mentre Parajka and Böschl (2006) hanno effettuato un confronto considerando solo giorni con completa assenza di copertura nuvolosa, nel nostro studio questa selezione non è stata effettuata.

Tekeli et al. (2005) osservano che alti valori di accuratezza (>88%) per il prodotto MOD10 si raggiungono solo in caso di assenza di corpi nuvolosi.

I valori di accuratezza per le aree dell'Austria e della Germania mostrano un andamento stagionale come indicato in tabella 7 con i valori più bassi durante i mesi invernali come anche rilevato per il prodotto standard MOD10.

Mese	Accuratezza globale in %	
	Germania	Austria
Agosto 05	98.2	98.5
Settembre 05	97.7	97.7
Ottobre 05	96.2	97.2
Novembre 05	90.5	89.9
Dicembre 05	80.2	68.8
Gennaio 06	81.3	71.4
Febbraio 06	87.1	68.0
Marzo 06	88.6	68.3
Aprile 06	92.7	90.5
May 06	95.4	96.4
Giugno 06	96.8	97.6
Luglio 06	96.1	99.3

Tabella 7 – Andamento stagionale dei valori di accuratezza per le stazioni localizzate in Germania e Austria.

Per quanto riguarda i valori bassi di accuratezza dell'area dell'Alto Adige si nota che le stazioni con i valori più bassi di accuratezza (tabella 8) Ausserrojen, Klausberg e Stausee Zoggl sono tutte situate su pendii molto ripidi ed esposizione Nord, Nord-Ovest, Nord-Est scarsamente illuminati nei periodi invernali durante l'ora di acquisizione del sensore MODIS-TERRA. Nell'algoritmo le aree che sono in ombra e dalle quali non è possibile ricavare alcuna informazione dal segnale registrato vengono mascherate imponendo un valore limite per la riflettanza. Ne consegue che questi risultati indicano la necessità di una ulteriore analisi e di imporre probabilmente soglie più restrittive. Le due stazioni localizzate in Germania, Frankfurt Airport e Zugspitze, con i valori di accuratezza più bassi rispetto agli altri della stessa regione, risultano essere non rappresentativi dell'area. Il primo localizzato nelle vicinanze dell'aeroporto di Francoforte è una zona molto eterogenea che include in un'area di 250 m anche costruzioni ed edifici. Il secondo è localizzato in cima ad un rilievo montuoso circondato da pendii molto scoscesi.

Germania		Italia (Alto Adige)	
Station	Overall Agreement	Station	Overall Agreement
Augsburg	96.0	Ausserrojen	67.5
Bamberg	97.4	Ciampinoi	83.3
Fichtelberg	92.0	Gitschberg	88.2
Frankfurt	84.0	Klausberg	65.4
Hof	98.0	Lazauneralm	100.0
Hohenpeissenberg	91.7	Maritsch	78.4
Karlsruhe	96.6	Melag	96.7
Kempten	97.3	Obereggen	98.8
Konstanz	94.3	Pfelders	74.4
Linderberg	92.5	Piz la Ila	85.5
Meiningen	94.8	Rossbänke	97.6
München	95.9	Sexten	99.0
Nürnberg-Bahrweiler	95.5	Stausee Neves	93.0
Nürnberg	95.9	Stausee Zoggl	65.9
Saarbrücken	95.2	Waidmannalm	95.1
Straubing	96.4	Weissbrunn	90.8
Stuttgart	97.4		
Trier	95.7		
Würzburg	92.9		
Zugspitze	80.4		

Tabella 8 – Andamento dei valori di accuratezza per le diverse stazioni localizzate in Germania ed Italia (Alto Adige).

Conclusioni

In questo lavoro è stata presentata l'analisi per la validazione di un nuovo algoritmo per la determinazione di mappe della copertura nevosa con dato MODIS a 250 m.

Nel confronto con il dato LANDSAT si ottiene un valore di accuratezza sulle classi Neve/NoNeve pari al 94% quando vengono esclusi oltre ai corpi idrici, nuvolosi, errori nel dato LANDSAT, no data anche l'area relativa alla copertura forestale. La differenza nell'inclusione o esclusione di questa copertura determina un incremento del 4% sul valore totale di accuratezza.

Nel confronto con i dati a terra si rileva che il prodotto EURAC ha una accuratezza compresa fra 90% e 94% per le stazioni localizzate in Austria e Germania. I valori di accuratezza sono simili a quelli a quelli ottenuto dal prodotto MOD10 nella regione austriaca.

Gli errori di omissione sono più alti per Slovacchia ed Italia variabili fra 6% e 10% legati soprattutto a stazioni localizzate in aree che potrebbero essere in ombra durante le acquisizioni mattutine del sensore TERRA. Per le altre stazioni l'accuratezza varia fra 75% e 99%, risultato incoraggiante se si tiene in considerazione la complessa orografia dell'area alpina.

Prossimi sviluppi comprendono sia il miglioramento della correzione topografiche al fine di ridurre le problematiche con le zone in ombra e un confronto diretto con il prodotto MOD10.

Bibliografia

Ackerman, S., K.Strabala, P.Menzel, R.Frey, C. Moeller, L. Gumley, B.Baum, S. W. Seemann, and H. Zhang (2006), "Discriminating clear-sky from cloud with MODIS algorithm theoretical basis document (MOD35)", MODIS Cloud Mask Team Version 5.0 October 2006.

Cappelluti, G., Morea, A., Notarnicola, C., Posa, F. (2006), "Automatic detection of local cloud systems from MODIS data", *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 45, no.8, p. 1056-1072.

Hall, D.K., G.A. Riggs and V.V. Salomonson, (1995). "Development of methods for mapping global snow cover using moderate resolution imaging spectroradiometer data", *Remote Sensing of Environment*, 54, pp 127-140.

Hall, D.K., G.A. Riggs and V.V. Salomonson, V. V. (2000): MODIS/Terra Snow Cover 5-Min L2 Swath 500m V004, December 2003 to March 2004. http://nsidc.org/data/mod10_l2.html.

Hall, D. K., Riggs, G., Salomonson, V. V., DiGirolamo, N. E., & Bayr, K. J. (2002), "MODIS snow-cover products", *Remote Sensing of Environment*, 83, 181-194.

Hall, D. K., & Riggs, G. A. (2007), "Accuracy assessment of the MODIS snow products", *Hydrological Processes*, 21, 1534-1547.

Klein, A.G., Hall, D. K., Riggs, G. A. (1997): Improving the MODIS Global Snow-Mapping Algorithm. In: IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium Proceedings, 619-621.

Klein AG, Hall D.K., Riggs, G.A. (1998), "Improving snow-cover mapping in forests through the use of a canopy reflectance model", *Hydrological Processes*, 12: 1723-1744.

Klein, A. G., & Barnett, A. C. (2003), "Validation of daily MODIS snow cover maps of the Upper Rio Grande River Basin for the 2000-2001 snow year", *Remote Sensing of Environment*, 86, 162-176.

Liang, T. G., Huang, X. D., Wu, C. X., Liu, X. Y., Li, W. L., Guo, Z. G., et al. (2008),"An application of MODIS data to snow cover monitoring in a pastoral area: A case study in Northern Xinjiang, China", *Remote Sensing of Environment*, 112, 514-526.

Malcher, P., Floricioiu, D., Rott, H. (2003), "Snow mapping in Alpine areas using medium resolution spectrometric sensors", *Proceedings Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS*, Volume 4, Page(s): 2835 - 2837.

Maurer, E. P., Rhoads, J. D., Dubayah, R. O., & Lettenmaier, D. P. (2003),"Evaluation of the snow covered area data product from MODIS", *Hydrological Processes*, 17, 59-71.

Metsämäki, S., Vepsäläinen, J., Pulliainen, J., & Sucksdorff, Y. (2002), "Improved linear interpolation method for the estimation of snow-covered area from optical data", *Remote Sensing of Environment*, 82, 64–78.

Notarnicola, C., Di Rosa, D., Posa, F. (2011), "Cross-Comparison of MODIS and CloudSat Data as a Tool to Validate Local Cloud Cover Masks", *Atmosphere* 2011, 2(3), 242-255; doi:10.3390/atmos2030242.

Parajka, J., and G. Blöschl, (2006), "Validation of MODIS snow cover images over Austria", *Hydrology and Earth System Sciences*, 10, 679 - 689.

Rastner, P., L. Irsara, T. Schellenberger, S. Della Chiesa, G. Bertoldi, S. Endrizzi, C. Notarnicola, C. Steurer, M. Zebisch, (2009), "Snow cover monitoring and modelling in the Alps using multi temporal MODIS data", *International Snow Science Workshop*, Davos, September 2009.

Steurer, C., Notarnicola, C., Monsorno, R., Tetzlaff, A., Costa, A., Irsara, L., Zebisch, M. (2011), "A user driven approach for a satellite data based near-realtime observing system at local/regional scale", *International Conference, Data Flow from Space to Earth Applications and Interoperability*, Venice, 21-23 Marzo.

Wang, X., Xie, H., & Liang, T. (2008), "Evaluation of MODIS snow cover and cloud mask and its application in Northern Xinjiang, China", *Remote Sensing of Environment*, 112, 1497–1513.

Zhou, X., Xie, H., & Hendrickx, M. H. J. (2005), "Statistical evaluation of remotely sensed snow-cover products with constraints from streamflow and SNOTEL measurements", *Remote Sensing of Environment*, 94, 214–231. doi:10.1016/j.rse.2004.10.007.