

EURAC

MAPS

Monitoraggio automatico del manto nevoso sull'arco alpino con dati satellitari MODIS

**Claudia Notarnicola,
Mattia Callegari,
Armin Costa,
Ludovica De Gregorio,
Alexander Jacob,
Carlo Marin,
Roberto Monsorno,
Antonio Padovano,
Bartolomeo Ventura e
Marc Zebisch**

EURAC, Istituto per il
Telerilevamento Applicato, Bolzano
claudia.notarnicola@eurac.edu

Questo articolo presenta i risultati di un algoritmo innovativo EURACSnow per il monitoraggio della copertura nevosa in aree alpine, tramite l'utilizzo di dati telerilevati acquisiti con il sensore MODIS della NASA. Questo algoritmo è stato ideato per sfruttare la massima risoluzione del sensore ossia 250 m. Questa più alta risoluzione consente di migliorare l'accuratezza nella rilevazione del manto nevoso, soprattutto in aree montane caratterizzate da una estrema eterogeneità topografica. Tramite l'utilizzo di questo algoritmo sono state generate mappe giornaliere di estensione del manto nevoso per l'arco alpino e per l'intero periodo dal 2002 al 2015. Inoltre per meglio analizzare e comprendere la variabilità inter-annuale sono stati creati per ogni anno prodotti specifici che indicano la durata del manto nevoso, il giorno della prima nevicata e l'ultimo giorno di innevamento.



Snow

MONITORAGGIO CONTINUO DEL MANTO NEVOSO CON DATI SATELLITARI

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, sulle Alpi, si sono alternate abbondanti nevicate con periodi siccitosi, dando luogo ad eventi valanghivi significativi oppure periodi di magre primaverili ed estive. Alcune di queste considerazioni anche in riferimento alla evoluzione stagionale ed interannuale 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). Tuttavia, per analisi regionali e/o locali, i prodotti MODIS standard MOD10-MYD10 (MOD si riferisce al sensore TERRA e MYD al sensore AQUA) non sempre sono soddisfa-

centi ed in numerosi lavori si evidenzia la necessità di sviluppi che tengano in considerazione gli aspetti locali dell'area di studio (Hall & Riggs, 2007; Liang et al., 2008; Maurer et al., 2003; Zhou et al., 2005). Alcune delle limitazioni che il prodotto MOD10-MYD10 presenta a livello locale sono: la risoluzione spaziale di 500 m e la scarsa accuratezza della copertura nuvolosa. In questo contesto EURAC ha sviluppato un nuovo algoritmo **EURACSnow** per la copertura nevosa che utilizza la risoluzione di 250 m, la più alta attualmente ottenibile con questo tipo di dati satellitari a frequenza giornaliera. Le mappe della neve sono state validate tramite l'uso di immagini LANDSAT e dati a terra derivanti da stazioni nivometriche (Notarnicola et al., 2013a, 2013b). Questo lavoro illustra la metodologia applicata per lo sviluppo delle mappe di copertura della neve con dati satellitari MODIS, nonché la validazione con dati a terra e dati satellitari ad alta risoluzione. Inoltre verranno illustrati prodotti derivati dalle serie temporali al fine di monitorare la variabilità interannuale del manto nevoso.

L'ALGORITMO EURACSnow

Descrizione dell'area di studio e dati satellitari

Lo sviluppo dell'algoritmo ha interessato nella prima fase l'area del centro Europa per il periodo 2005-2006. Una volta validato è stato applicato all'area relativa all'intero arco alpino per il periodo 2002 - 2015. I dati MODIS necessari per lo sviluppo dell'algoritmo sono i seguenti:

- MODIS MOD09GQ-MYD09GQ e MOD09GA-

MYD09GA (TERRA - AQUA): dati di riflettanza corretta per il contributo atmosferico con bande a risoluzione di 250 m e 500 m;
 - MODIS MOD021KM-MYD021KM: dati di riflettanza non corretta per il contributo atmosferico con bande a risoluzione di 1 km utilizzati per l'identificazione della copertura nuvolosa;
 - MOD03-MYD03: 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 (inferiore al 20%). I dati a terra considerati nello stesso periodo provengono da stazioni nivometriche ubicate in Austria, Germania, Slovacchia ed Italia (Alto Adige/Südtirol).

L'algoritmo è stato costruito per gestire sia dati MODIS scaricabili dai differenti siti della NASA sia con i dati MODIS direttamente acquisiti con l'antenna di ricezione dell'EURAC situata sul Corno del Renon (2300 m). L'area di acquisizione dell'antenna è indicata in rosso in figura 1.

METODOLOGIA

La seguente sezione contiene una breve descrizione delle differenti parti dell'algoritmo EURACSnow utilizzati per il calcolo della copertura nevosa. Lo schema generale dell'algoritmo è riportato nella figura 2. Nella fase iniziale di pre-elaborazione tutti i dati MODIS (MOD09-MYD09, MOD02-MYD02

Fig. 1 - A sinistra: l'antenna di ricezione dati satellitare dell'EURAC. A destra: l'area coperta dalle acquisizioni dell'antenna è riportata in rosso, in ciano viene riportata l'area dell'arco alpino per cui sono disponibili le mappe della neve dal 2002 ad oggi ed in giallo l'area per cui sono disponibili le mappe dal 2005 al 2006.

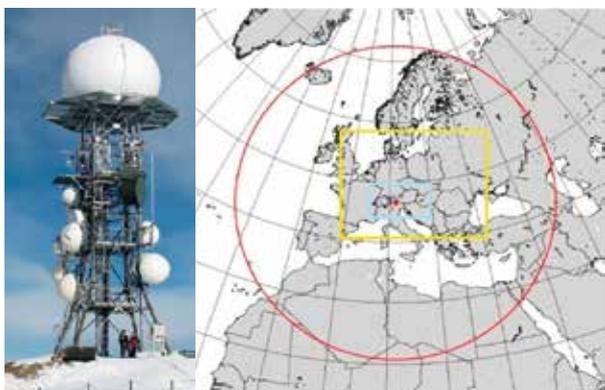
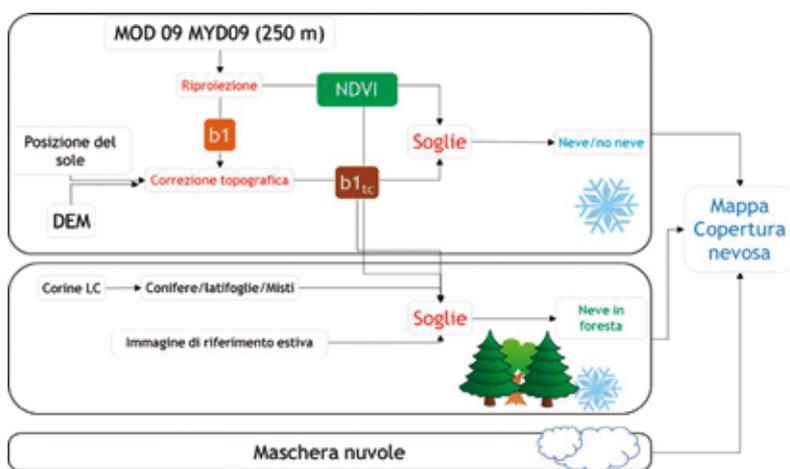


Fig. 2 - Schema generale per la determinazione delle mappe della neve a 250 m con le immagini MODIS con l'algoritmo EURACSnow.



e MOD03-MYD03) ed in particolare le bande utilizzate nell'algoritmo vengono riportati nella proiezione LAT/LON oppure in altre proiezioni a seconda dei casi o di specifiche richieste. 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.

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-MYD10 è l'utilizzo esclusivo della banda 1 e 2 e dell'indice NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) calcolato con queste bande per la rivelazione delle classi Neve/NoNeve con conseguente maggiore risoluzione del prodotto finale (250 m). Il concetto applicato in questo algoritmo è sviluppato da Metsämäki et al., 2002 e 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 dal comportamento di altre classi di uso del suolo.

Una parte del classificatore è anche dedicato alla rilevazione della neve sotto le foreste ottenuta confrontando gli indici NDVI fra un'immagine invernale e un'immagine estiva usata come riferimento (Klein et al., 1998). Differenti valori di soglie sono individuati per le classi di conifere, latifoglie e boschi misti.

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.

L'algoritmo ha come ulteriore opzione la possibilità di prendere in ingresso la maschera della copertura nuvolosa proveniente da dati MODIS. In questo modo si riduce notevolmente il tempo di elaborazione delle mappe della neve.

Infine, per ridurre i problemi legati alla pre-

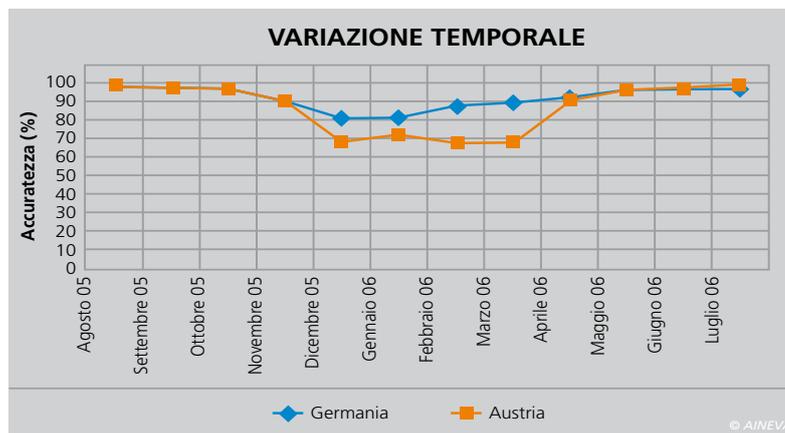


Fig. 3 - Andamento stagionale dei valori di accuratezza per le stazioni localizzate in Germania e Austria.

senza 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 acquisite lo stesso giorno.

VALIDAZIONE

La validazione delle mappe MODIS ottenute con il nuovo algoritmo è avvenuta tramite il confronto con dati a terra puntuali derivanti da stazioni nivometriche. Successivamente per avere informazioni anche sull'accuratezza della distribuzione spaziale, le mappe MODIS sono state confrontate con mappe delle neve ottenute da immagini ad alta risoluzione derivanti dal satellite LANDSAT.

Validazione dell'algoritmo con dati a terra

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

- Verificare l'accuratezza del prodotto MODIS in riferimento a dati a terra sull'area di interesse;
- Valutare la variabilità dell'accuratezza in funzione dei diversi periodi di acquisizione;
- Localizzare ed interpretare le eventuali discrepanze fra dato MODIS e dato delle stazioni a terra.

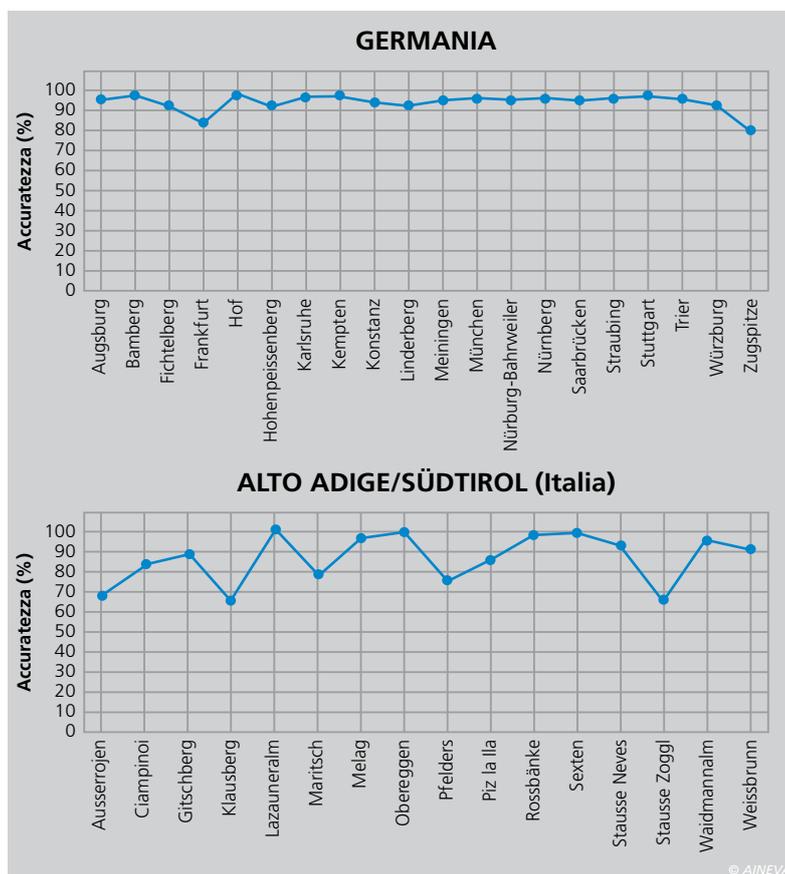
Le acquisizioni sono continue per tutto il periodo 2005/2006 per Germania, Austria, Slovacchia e due stazioni in Alto Adige/Südtirol (Italia). I dati delle stazioni tedesche coprono la parte centrale e meridionale della Germania e sono stati ottenuti

grazie al servizio meteorologico tedesco (*Deutscher Wetterdienst*), i dati delle stazioni austriache appartengono al *Land Niederösterreich*, i dati delle stazioni italiane provengono dalla provincia autonoma di Bolzano, i dati delle stazioni slovacche coprono l'intera nazione e sono forniti dal centro slovacco per le valanghe.

I risultati del confronto fra dati delle stazioni e le mappe della neve indicano una variabilità nell'accuratezza tra 82.4% e 93.7%. Per comprendere questa variabilità è necessario considerare alcuni fattori che vengono illustrati e discussi di seguito.

Si osserva una marcata dipendenza dal numero totale di osservazioni in presenza o assenza di neve nel valore dell'accuratezza totale. 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 nella classe "neve" (fra 5% e 10%) è sempre più basso dell'errore di "no neve" (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. In effetti, come indicato da Tekeli et al. (2005), alti valori di accuratezza (>88%) per il prodotto MOD10 si raggiungono solo in caso di assenza di corpi nuvolosi in quanto vengono esclusi errori di classificazione fra le classi neve e corpi nuvolosi. È stata anche analizzata la dipendenza stagionale dei valori di accuratezza in par-

Fig. 4 - Andamento dei valori di accuratezza per le diverse stazioni localizzate in Germania ed Italia (Alto Adige/Südtirol).



icolare per le aree dell'Austria e della Germania poiché questi siti presentavano una disponibilità continua di dati meteorologici per l'intero anno. Come indicato in figura 3 i valori più bassi di accuratezza si hanno durante i mesi di dicembre e gennaio per i siti in Germania e da dicembre a marzo per quelli in Austria come anche rilevato per il prodotto standard MODIS (Simic et al. 2004; Parajka et al., 2006).

Errori di classificazione fra i dati a terra e mappa raster possono derivare da differenti fattori come ad esempio un mancato controllo di qualità sui dati a terra oppure inaccuratezza nel dato satellitare in ingresso all'algoritmo e anche errori di geocodifica. Inoltre, un aspetto importante da considerare è che 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 (250 m x 250 m), effetto che si accentua in aree con elevata eterogeneità spaziale come le zone montuose. Per una valutazione su questo ultimo punto sono stati considerati due siti con caratteristiche geografiche molto differenti: le stazioni in Germania

che sono localizzate principalmente in aree pianeggianti e quelle in Alto Adige/Südtirol (Italia) localizzate invece in aree dalla topografia estremamente variabile. Alcune mappe sono state ispezionate anche visivamente per comprendere se i punti dove sono sistemate le stazioni possono essere rappresentative dell'area di un pixel di dimensioni 250 m x 250 m.

Come era da attendersi i valori di accuratezza sulle stazioni in Germania sono elevati e variano fra 80% e 98% mentre per le stazioni in Alto Adige/Südtirol si nota una maggiore variabilità con valori che oscillano fra 65% e 99% (fig.4).

Per quanto riguarda l'area dell'Alto Adige/Südtirol si nota che le stazioni con i valori più bassi di accuratezza, ovvero 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 rappresentative dell'area. La prima, localizzata nelle vicinanze dell'aeroporto di Francoforte è una zona molto eterogenea che include in un'area di 250 m anche costruzioni ed edifici. La seconda è localizzate in cima ad un rilievo montuoso circondato da pendii molto scoscesi.

Confronto con dati ad alta risoluzione LANDSAT

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 sopracitato. Per il dato MODIS, il confronto è avvenuto con le mappe derivate dalle acquisizioni del sensore TERRA in quanto maggiormente vicine per l'ora di acquisizione.

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 causa 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).

Per un confronto con stessa griglia spaziale, la mappa LANDSAT viene successivamente ricampionata a 250 m con una soglia pari a 50% per l'identificazione di un pixel aggregato come classe "Neve".

Nel confronto fra mappe MODIS e LANDSAT, nonostante 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 successivamente, oltre a quelle aree già incluse all'inizio quali corpi idrici, *no data*, corpi nuvolosi ed errori LANDSAT, anche le aree ai bordi dei corpi nuvolosi e le zone in ombra e infine le foreste. Si osserva che dopo il mascheramento dei corpi idrici, *no data*, errori LANDSAT e dei corpi nuvolosi incluse le aree di bordo, non si ottiene un netto miglioramento, quale è invece evidente con l'aggiunta del passaggio successivo ossia dove non viene considerata l'area ricoperta da foresta. 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 boschive 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). La figura 5 illustra la variazione della accuratezza globale nel confronto fra le mappe MODIS e LANDSAT includendo ed escludendo le aree di foresta.

Se le aree di foresta rimangono incluse nel confronto l'accuratezza risulta variabile fra 85% e 95% mentre al di fuori di queste aree l'accuratezza si concentra negli intervalli fra 95% e 100%.

Disponibilità delle mappe della neve MODIS basate sull'algoritmo EURACSnow

Le mappe della neve ottenute tramite i dati

MODIS ricevuti all'antenna EURAC sono disponibili in *near real-time* il giorno dell'acquisizione stessa dei dati MODIS. Le mappe possono anche essere visualizzate tramite un servizio WEBGIS EURAC al seguente indirizzo: <http://webgis.eurac.edu/snowalps>, dove i dati sono aggiornati giornalmente (figura 6).

La stessa applicazione Web permette anche il download delle mappe, tramite una sezione "download" specifica.

PRODOTTI DERIVATI

Le mappe MODIS sono state generate giornalmente per tutto il periodo dal 2002 al 2015. A partire da queste serie temporali sono stati derivati dei prodotti specifici per analizzare la variabilità interannuale del manto nevoso. In particolare sono stati sviluppati i seguenti prodotti generati per ogni anno idrologico considerato a partire dal 1° ottobre di ogni anno fino al 30 settembre dell'anno successivo:

- **Mappe di durata della neve:** dove sono calcolati il numero di giorni di copertura nevosa per ogni pixel. La presenza delle nuvole viene interpolata considerando i giorni precedenti o successivi.
- **Mappe della prima nevicata:** indica il giorno in cui nel periodo indicato si è verificata la prima nevicata
- **Mappe dell'ultimo giorno di innevamento:** indica il giorno in cui è stata rilevata per l'ultima volta la presenza della neve.
- **Andamenti temporali delle coperture nevose e della quota neve nei diversi anni:** indicano la variazione della copertura della neve con medie mensili nei diversi anni.

Esempi di questi prodotti sono riportati di seguito. Nella figura 7 sono riportati gli andamenti temporali della copertura della neve mensile (*Snow Cover Area, SCA*) e della quota neve (*Snow Line Altitude, SLA*) a partire da gennaio 2002 fino a set-

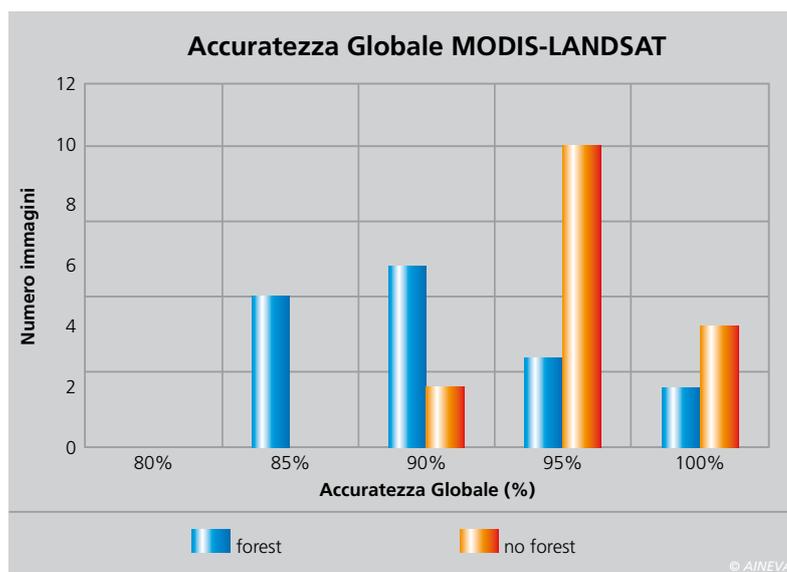


Fig. 5 - Distribuzione dei valori di accuratezza globale (overall accuracy espressa in %) per il confronto fra le mappe MODIS e LANDSAT includendo (forest) ed escludendo (no forest) le aree di foresta.

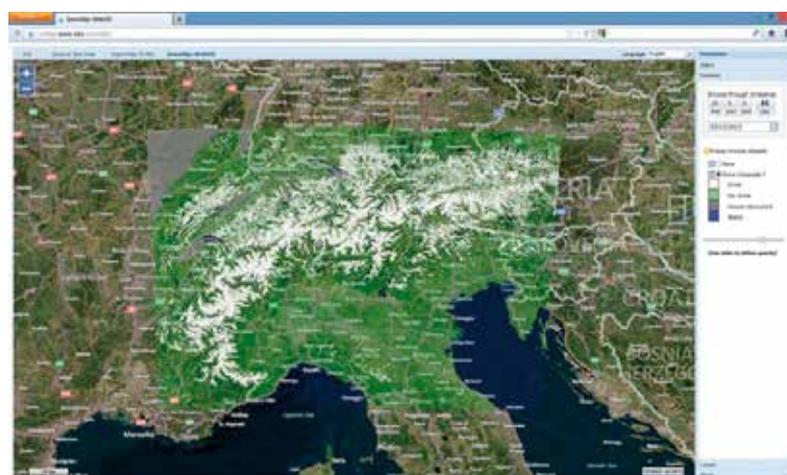


Fig. 6 - Schermata del WEBGIS EURAC dove le mappe della neve derivanti dall'algoritmo EURACSnow vengono aggiornate giornalmente (<http://webgis.eurac.edu/snowalps>).

Fig. 7 - Andamento delle medie mensili della copertura della neve (in alto) e della quota neve (in basso) per il periodo che va da gennaio 2002 fino a settembre 2015. Vengono riportate anche le medie dei mesi da novembre ad aprile (linea gialla) e da maggio ad ottobre (linea viola).

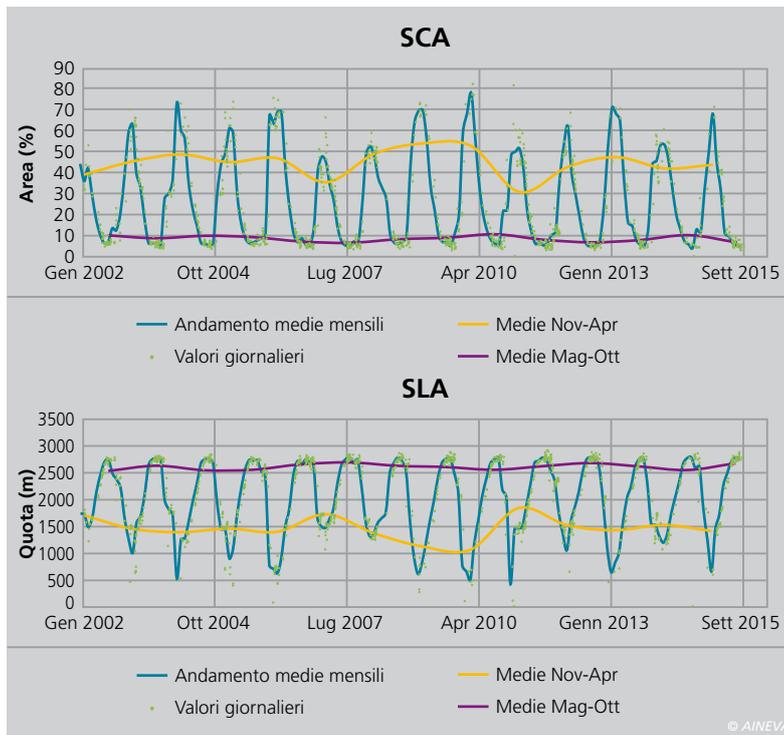


Fig. 8 - Mappe di durata della neve (Snow Cover Duration, SCD) per gli anni 2006-2007 e gli anni 2009-2010.

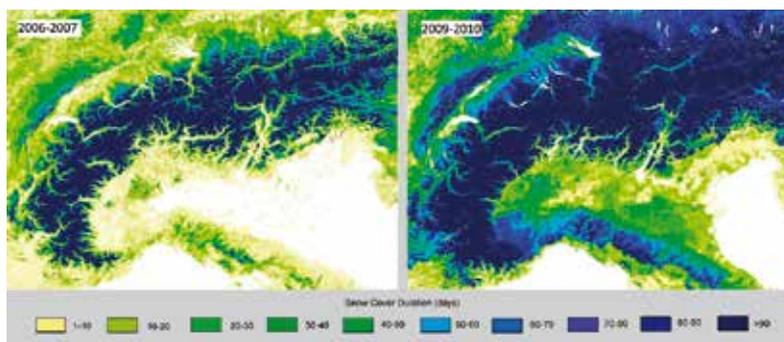
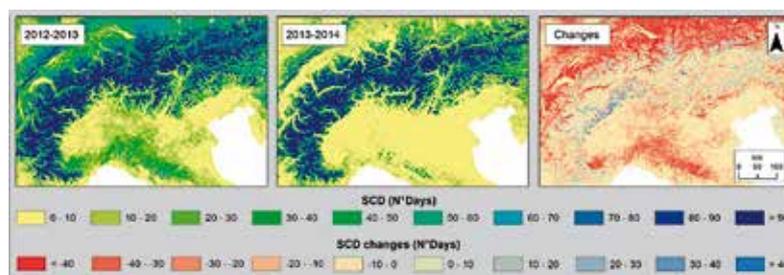


Fig. 9 - Mappe di durata della neve per gli anni 2012-2013 e 2013-2014 con relativa mappa dei cambiamenti fra questi due anni.



tembre 2015. Oltre agli andamenti mensili è stata anche calcolata la media stagionale dei mesi da novembre ad aprile e da maggio ad ottobre per meglio sottolineare le variazioni fra un anno ed il successivo. Con questi grafici è possibile osservare la variabilità interannuale della copertura nevosa e conseguentemente della quota neve. A titolo di esempio consideriamo gli inverni del 2006-2007 e del 2009-2010: nel primo caso, a causa di un innevamento ridotto, la copertura ha raggiunto in media il 50% e la quota neve media è rimasta intorno ai 1500 m, mentre nell'inverno

2009-2010, caratterizzato da nevicate copiose, la copertura ha raggiunto in media l'80% dell'area alpina e la quota neve media è scesa fino a 500 m e con eventi fino a quote bassissime. Analogo comportamento per questi due anni estremi nel periodo 2002-2015 si può osservare dalle mappe di durata della neve (figura 8). Dalle mappe di durata della neve si possono derivare anche informazioni circa le anomalie ed i cambiamenti fra due o più anni. Un esempio è mostrato in figura 9 dove l'anno 2012-13 è confrontato

con l'anno 2013-2014. L'anno 2013-2014 è stato caratterizzato da ridotto numero di giorni di innevamento sul fronte nord delle Alpi (Austria e sud della Germania) come viene evidenziato quando si considerano i cambiamenti rispetto all'anno precedente 2012-2013. La diminuzione in giorni di neve arriva fino a circa 40 in queste aree.

Come ultimo esempio vengono riportate le mappe relative al primo e ultimo giorno in cui si è rilevata la presenza della neve per l'anno 2010-2011. In questo modo è possibile, analizzando i diversi anni, individuare anomalie riguardo l'inizio di stagione (anticipato o ritardato) e l'inizio della fase di fusione del manto nevoso (fig. 10).

Gli strumenti prodotti possono essere utilizzati congiuntamente con dati a terra per individuare la variabilità del manto nevoso in tempo reale (i prodotti giornalieri) e poi gli andamenti stagionali tramite le informazioni di durate della neve e di inizio e fine della copertura nevosa.

CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

In questo lavoro è stato presentato un nuovo algoritmo **EURACSnow** per la generazione di mappe di copertura nevosa giornaliera con risoluzione al suolo di 250 metri, migliorata rispetto al prodotto standard MODIS che presenta una risoluzione spaziale di 500 m. Nel confronto dei prodotti con il dato LANDSAT si ottiene un valore di accuratezza sulle classi Neve/NoNeve pari al 94% quando viene esclusa, 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 medio del 4% sul valore totale di accuratezza. Nel confronto con i dati a terra si rileva che il prodotto **EURACSnow** 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

Nella pagina a fianco in alto: fig. 10 - Esempio di mappe per i prodotti che riportano il primo giorno di innevamento (in alto) e l'ultimo (in basso) per l'anno 2010-2011.

stazioni localizzate in aree che potrebbero essere in ombra durante le acquisizioni mattutine del sensore MODIS-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.

A partire da queste serie temporali sono stati derivati diversi prodotti che consentono una approfondita e dettagliata analisi dei *pattern* spaziali e temporali presenti sull'interno arco alpino.

Prossimi sviluppi comprendono sia il miglioramento per la rilevazione della neve in foresta sia lo sviluppo di specifici prodotti per le aree di montagna con dati satellitari ad alta risoluzione come LANDSAT-8 (30 m di risoluzione) e Sentinel-2 (10-20 m di risoluzione al suolo).

In particolare la missione dell'Agenzia Spaziale Europea, Sentinel-2, costituita di due satelliti, fornirà dati ogni 5 giorni senza costi per l'utente, contro gli attuali 16 giorni della missione LANDSAT-8. Questo aprirà nuovi scenari per il monitoraggio automatico della neve da satellite. In figura 11 riportiamo, ad esempio, il confronto tra dati LANDSAT-8 e MODIS acquisiti lo stesso giorno sulle Alpi Sarentine/Sarntaler Alpen. Confrontando le immagini acquisite dai due sensori si può apprezzare il maggior dettaglio geometrico fornito dai dati LANDSAT-8 e come questo si rifletta in un maggior dettaglio della mappa della copertura nevosa. Risultati simili si otterranno con dati Sentinel-2 riducendo però di un terzo il tempo di rivisitazione del sensore.

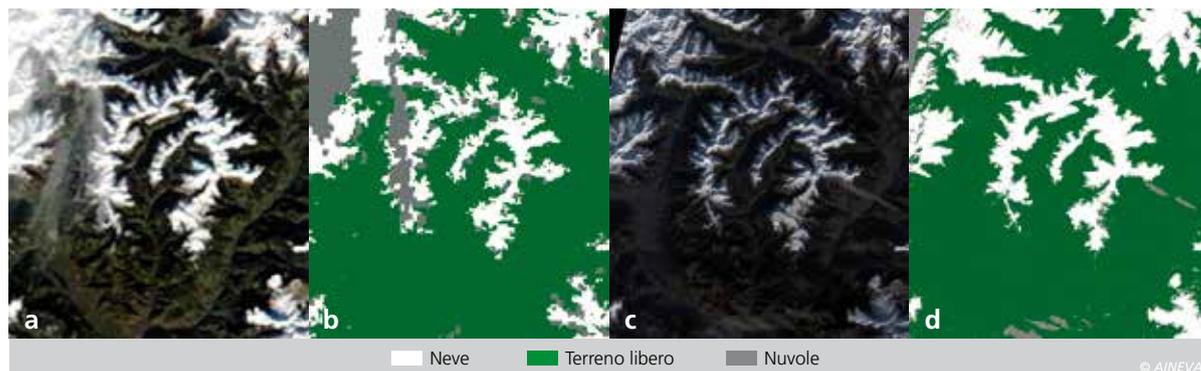
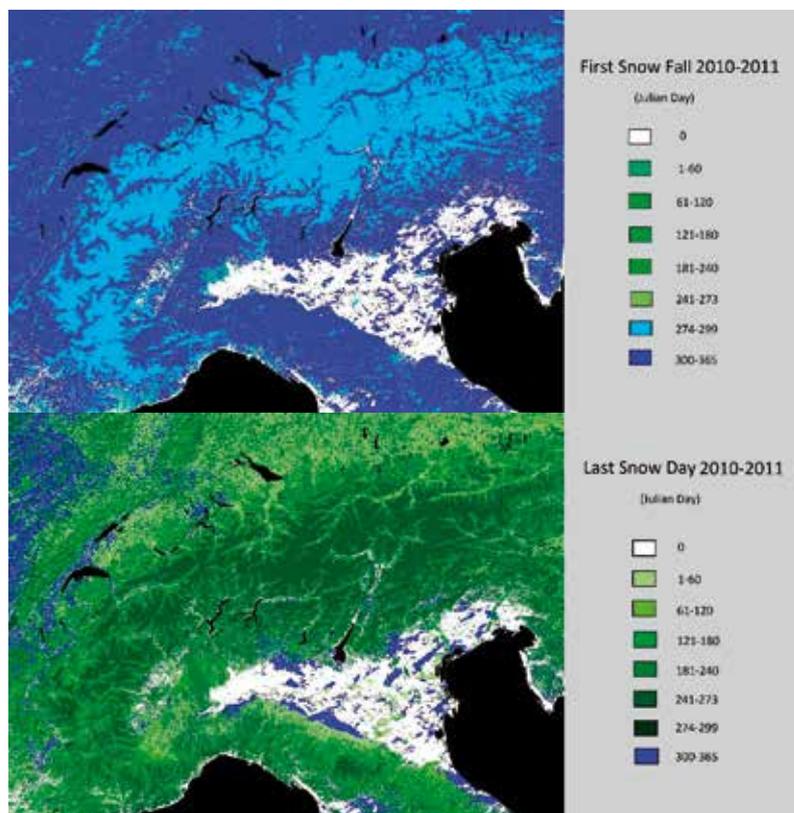


Fig. 11 - Confronto tra prodotti MODIS e LANDSAT-8 acquisiti sulle Alpi Sarentine/Sarntaler Alpen: (a) immagine MODIS del 11 Dicembre 2014 a colori veri a 250 m; (b) mappa di copertura nevosa derivata dall'immagine MODIS; (c) immagine LANDSAT-8 del 12 Dicembre 2014 a colori veri a 30 m; (d) mappa di copertura nevosa derivata dall'immagine LANDSAT-8.

Bibliografia

- 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_j2.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.
- 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, 514-1526.
- 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.
- Notarnicola, C.; Duguay, M.; Moelg, N.; Schellenberger, T.; Tetzlaff, A.; Monsorno, R.; Costa, A.; Steurer, C.; Zebisch, M. Snow Cover Maps from MODIS Images at 250 m Resolution, Part 1: Algorithm Description. Remote Sens. 2013a, 5, 110-126.
- Notarnicola, C.; Duguay, M.; Moelg, N.; Schellenberger, T.; Tetzlaff, A.; Monsorno, R.; Costa, A.; Steurer, C.; Zebisch, M. Snow Cover Maps from MODIS Images at 250 m Resolution, Part 2: Validation. Remote Sens. 2013b, 5, 1568-1587.
- 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.
- Simic, A.; Fernandes, R.; Brown, R.; Romanov, P.; Park, W. Validation of VEGETATION, MODIS, and GOES+SSM/I snow cover products over Canada based on surface snow depth observations. Hydrol. Process. 2004, 18, 1089-1104.
- 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.