

Generazione automatica
e analisi di dati e statistiche
sulla copertura nevosa mediante
immagini multi spettrali telerilevate

MAPPE NEVE DEL TRENTINO con CRIOPAT

**Lorenzo Bruzzone,
Carlo Marin,**

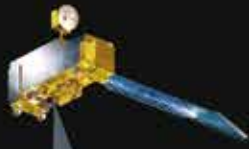
Massimo Santoni
Università degli Studi di Trento,
Dipartimento di Ingegneria e
Scienza dell'Informazione, Trento

Francesca Bovolo
FBK, Center for Information
Technology, Povo TN

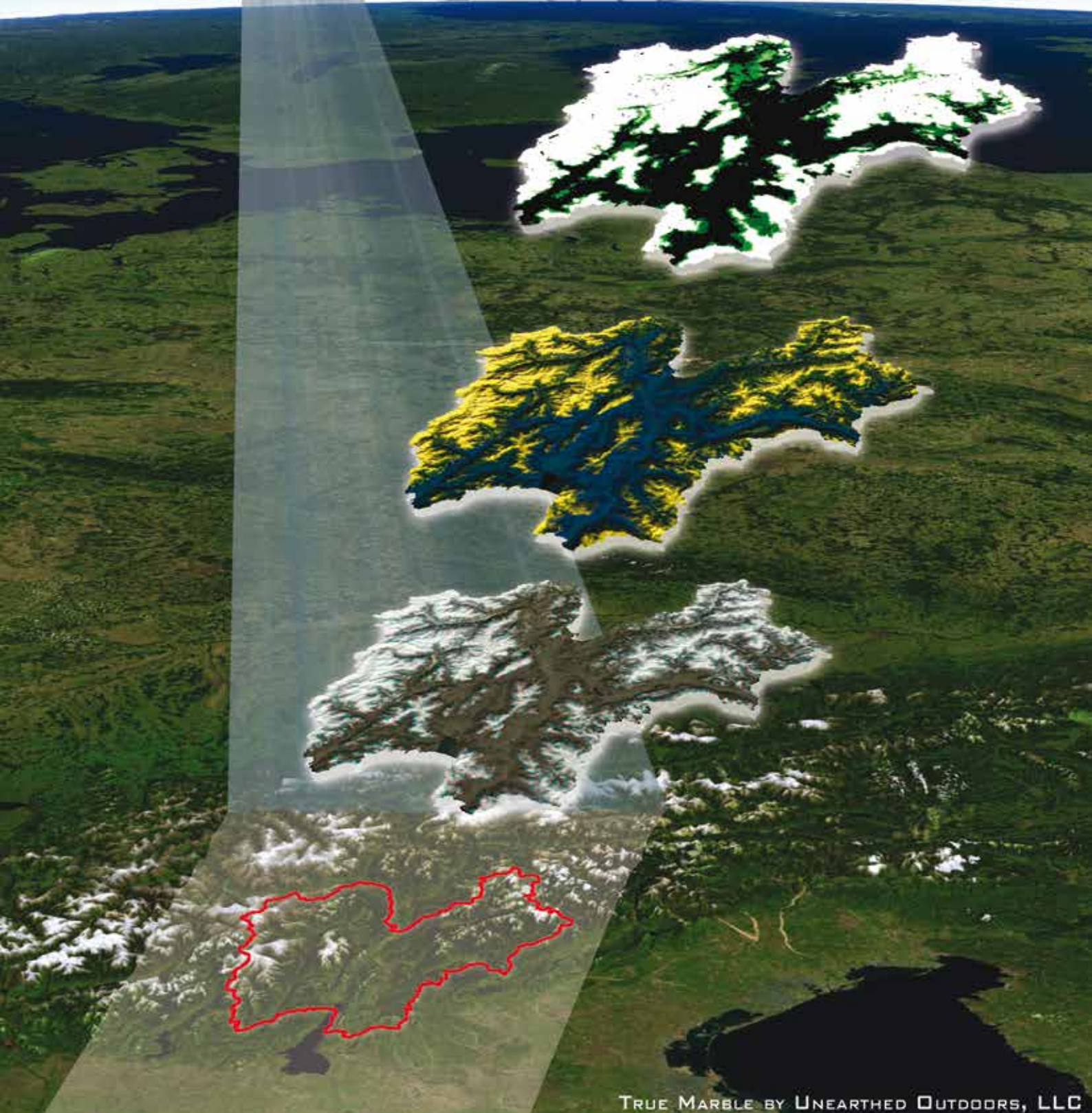
**Alberto Trenti,
Walter Beozzo**

Provincia Autonoma di Trento,
Ufficio Previsioni e Pianificazione, Trento
walter.beozzo@provincia.tn.it

Questo articolo presenta il progetto CRIOPAT nato dalla collaborazione tra l'Ufficio Previsioni e Pianificazione della Provincia Autonoma di Trento e il laboratorio di telerilevamento del Dipartimento di Ingegneria e Scienze dell'Informazione dell'Università di Trento. CRIOPAT è un sistema di analisi integrato in grado di estrarre automaticamente, con cadenza giornaliera, informazioni rilevanti sulla copertura nevosa del territorio trentino da immagini satellitari. In particolare il sistema è in grado di accedere automaticamente ai dati acquisiti dal sensore MODIS della NASA e generare mappe di copertura nevosa, mappe di persistenza nevosa e statistiche sui trend di evoluzione della copertura nevosa e sui limiti altitudinali di presenza neve del territorio trentino. Tali dati sono accessibili dagli utenti mediante intuitive interfacce web che permettono ad utenti autenticati di effettuare analisi personalizzate sui trend di evoluzione del manto nevoso per aree nivologicamente omogenee. I risultati ottenuti analizzando le immagini telerilevate a partire da febbraio del 2000 sono risultati coerenti con i dati storici in possesso dell'ufficio previsioni e pianificazione evidenziando la bontà del sistema CRIOPAT a livello operativo.



CRIOPAT



INTRODUZIONE

In Trentino i primi dati disponibili sulle osservazioni nivologiche risalgono al periodo austro-ungarico terminato con la fine della Grande guerra (novembre 1918) e l'annessione del Südtirol all'Italia. Gli uffici del Servizio Idrografico e Mareografico Italiano costituito nel 1917 hanno poi raccolto osservazioni meteorologiche e idrologiche giornalmente alle ore 9.00 in luoghi appositamente attrezzati. I parametri rilevati vanno dalla semplice constatazione della giornata nevosa alla misurazione dello spessore del manto nevoso o della neve fresca caduta al suolo. L'attenzione sui cambiamenti climatici in atto ha rinnovato l'interesse sulle serie storiche nivometriche sebbene si siano dimostrate non omogenee, discontinue e spesso mancanti delle informazioni sulle tecniche e l'ubicazione precisa delle misurazioni. Pertanto i dati disponibili risultano difficilmente spazializzabili. Negli ultimi anni lo sviluppo dei sistemi satellitari per il telerilevamento ha permesso l'acquisizione regolare di informazioni spazialmente distribuite su ampi territori. Da tali dati è possibile estrarre importanti informazioni ambientali riguardanti il nostro Pianeta mediante tecniche automatiche di elaborazione di immagini.

L'Ufficio Studi e Pianificazione della Provincia Autonoma di Trento ha voluto puntare sullo sfruttamento di queste tecnolo-

gie satellitari e sulle capacità scientifiche di Remote Sensing Laboratory (RSLab) del Dipartimento di Ingegneria e Scienza dell'Informazione (DISI) dell'Università degli Studi di Trento per ottenere delle mappe di copertura nevosa dell'intera area del Trentino a cadenza giornaliera e con una risoluzione spaziale il più possibile dettagliata. È nato così il progetto CRIOPAT il cui scopo è stato quello di creare una serie storica di immagini del Trentino che documentino l'evoluzione stagionale della copertura nevosa, in modo da superare i limiti del monitoraggio puntuale e creare i presupposti per studiare l'effetto del riscaldamento del pianeta sulla copertura nevosa del Trentino.

L'ARCHITETTURA DI CRIOPAT

Il vincolo stringente di produrre dati con cadenza giornaliera, ha condizionato fortemente la scelta della tipologia di immagini satellitari da impiegare nel progetto. Le immagini satellitari ritenute più appropriate per perseguire l'obiettivo dato sono state quelle del sensore MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) montato a bordo di due satelliti della NASA (National Aeronautics and Space Administration): *Terra e Aqua*.

La sequenza di immagini disponibile parte dal 25 febbraio 2000, data della prima acquisizione utile del sensore Terra.

Le orbite dei due satelliti sono state calcolate in modo tale che il primo attraversi il piano equatoriale alle 10.30 in direzione nord-sud, mentre il secondo lo attraversi alle 13.30 in direzione opposta. In questo modo si ottimizza la copertura del pianeta Terra. I due sensori MODIS acquisiscono entrambi in 36 bande spettrali (Tabella 1) con risoluzioni spaziali differenti. Come è possibile notare dalla Tabella 1 le prime due bande hanno una risoluzione geometrica di 250 m, cinque hanno risoluzione di 500 m e le restanti bande hanno risoluzione di 1000 m. Al fine di sfruttare il più possibile l'informazione spettrale mantenendo allo stesso tempo una risoluzione di 250 m, le cinque bande a 500 metri sono state riportate ad una risoluzione di 250 m mediante una tecnica avanzata di super-risoluzione, che verrà descritta nel seguito dell'articolo, generando così un'immagine multispettrale composta da 7 bande. La scarsa risoluzione delle bande a 1000 m ha invece pregiudicato l'utilizzo di queste ai fini del progetto. Queste scelte consentono al sistema CRIOPAT di generare dati giornalieri con una risoluzione spaziale di 250 m.

Il flusso dei dati per la generazione delle sequenze storiche di mappe di copertura nevosa è rappresentato in Figura 1. I dati vengono scaricati dal servizio Lance di NASA (<https://earthdata.nasa.gov/data/near-real-time-data>) mediante uno script automatico che seleziona tra tutte le immagini acquisite da MODIS quelle relative al territorio trentino. Tali immagini sono in proiezione sinusoidale e vengono riproiettate nel sistema UTM-WGS84. Successivamente vengono elaborate al fine di ottenere un'immagine multispettrale a 7 bande con risoluzione di 250 m. Il dato così ottenuto viene elaborato al fine di generare: i) mappe giornaliere di copertura nevosa; ii) mappe di persistenza mensile della neve al suolo; iii) statistiche sui trend di evoluzione della copertura nevosa e sui limiti altitudinali di presenza neve; iv) composizioni giornaliere in vero colore; e v) composizioni giornaliere in falsi colori che facilitano l'analisi delle informazioni contenute nelle differenti

Tab. 1 - Lunghezze d'onda e risoluzioni geometriche delle bande spettrali del sensore MODIS.

N°	LUNGHEZZA D'ONDA	RISOLUZIONE SPAZIALE	N°	LUNGHEZZA D'ONDA	RISOLUZIONE SPAZIALE
1	620-670 nm	250 m	19	915-965 nm	1000 m
2	841-876 nm	250 m	20	3.660-3.840 nm	1000 m
3	459-479 nm	500 m	21	3.929-3.989 nm	1000 m
4	545-565 nm	500 m	22	3.929-3.989 nm	1000 m
5	1230-1250 nm	500 m	23	4.020-4.080 nm	1000 m
6	1628-1652 nm	500 m	24	4.433-4.498 nm	1000 m
7	2105-2155 nm	500 m	25	4.482-4.549 nm	1000 m
8	405-420 nm	1000 m	26	1.360-1.390 nm	1000 m
9	438-448 nm	1000 m	27	6.535-6.895 nm	1000 m
10	483-493 nm	1000 m	28	7.175-7.475 nm	1000 m
11	526-536 nm	1000 m	29	8.400-8.700 nm	1000 m
12	546-556 nm	1000 m	30	9.580-9.880 nm	1000 m
13	662-672 nm	1000 m	31	10.780-11.280 nm	1000 m
14	673-683 nm	1000 m	32	11.770-12.270 nm	1000 m
15	743-753 nm	1000 m	33	13.185-13.485 nm	1000 m
16	862-877 nm	1000 m	34	13.485-13.785 nm	1000 m
17	890-920 nm	1000 m	35	13.785-14.085 nm	1000 m
18	931-941 nm	1000 m	36	14.085-14.385 nm	1000 m

© AINEVA

bande spettrali. Al fine di rendere fruibili tali prodotti in maniera semplice ed efficace i dati vengono resi disponibili sia in un database direttamente accessibile sia tramite delle intuitive e dedicate interfacce web che permettono di eseguire delle interrogazioni personalizzate dei dati statistici. Nel seguito ogni prodotto verrà descritto nel dettaglio.

Generazione mappe di copertura nevosa

L'articolato algoritmo per generare un'immagine multispettrale costituita da 7 bande a 250 m di risoluzione rappresenta uno dei punti principali del processo. L'originalità del procedimento è data dal fatto che le metodologie standard di fusione multirisoluzione prevedono che l'immagine ad elevata risoluzione utilizzata nella fusione sia acquisita su un insieme di lunghezze d'onda ampio capace di includere quello su cui sono acquisite quelle a bassa risoluzione. Tuttavia questa ipotesi non è verificata nel caso dei dati MODIS, dove le bande a 500 m (da 3 a 7 della Tabella 1) sono acquisite in lunghezze d'onda del tutto diverse e complementari a quelle in cui sono acquisite le immagini a 250 m (1 e 2 della Tabella 1). Pertanto è stata ottimizzata una tecnica nota in letteratura come Amélioration de la Résolution Spatiale par Injection de Structures (ARSIS) (Sirguy et al., 2007). ARSIS estrae, mediante trasformata di Wavelet, i dettagli geometrici (O-orizzontale; V-verticale; D-diagonale) dall'immagine a maggior risoluzione (I_{250}) e li inietta in quella a minor risoluzione (I_{500}), tramite un modello statistico supposto lineare i cui parametri sono stimati mediante l'uso delle corrispondenti sotto bande di dettaglio a 1000 m di risoluzione (si veda Figura 3). Dalle 7 immagini spettrali a 250 m di risoluzione tramite un classificatore supervisionato binario di tipo Support Vector Machine (SVM) (Melgani and Bruzzone, 2004) e l'ausilio di dati ancillari quali altitudine, pendenza, esposizione e degli indici spettrali NDSI (Normalized Difference Snow Index) e NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) è stato pos-

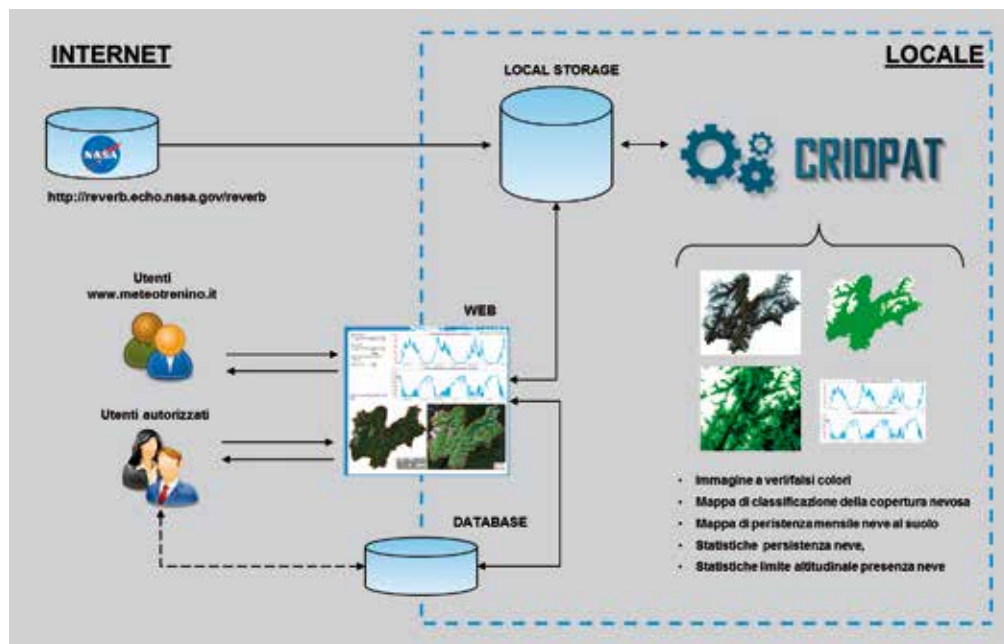


Fig. 1 - Architettura del sistema CRIOPAT.

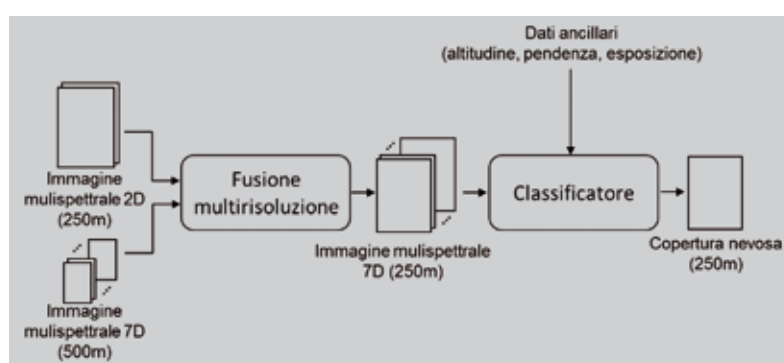


Fig. 2 - Schema a blocchi del processo di generazione delle mappe di copertura nevosa.

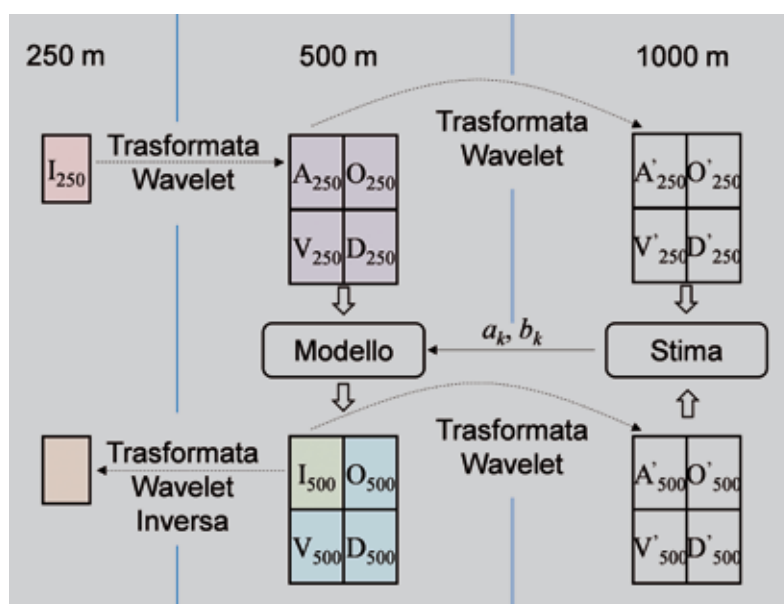


Fig. 3 - Schema a blocchi del metodo di fusione multirisoluzione sviluppato (ARSIS).

sibile calcolare le immagini di copertura nevosa caratterizzate da tre classi: "neve", "non neve" e "nuvole". In particolare, le informazioni di altitudine, esposizione e pendenza sono state ottenute dal LIDAR acquisito nel volo 2006 - 2007 della Provincia di Trento e dal dato SRTM (Shuttle

Radar Topography Mission) versione 4.1 riportato ad una risoluzione di 250 m. L'indice di neve normalizzato NDSI (utile per distinguere la classe "neve" dalla classe "nuvole") e l'indice di vegetazione normalizzato NDVI (utile per distinguere tra la classe "neve" e la classe "non neve")

sono stati calcolati come segue:

$$NDSI = \frac{\text{banda 4} - \text{banda 6}}{\text{banda 4} + \text{banda 6}}$$

$$NDVI = \frac{\text{banda 2} - \text{banda 1}}{\text{banda 2} + \text{banda 1}}$$

Poiché il classificatore utilizzato è di tipo supervisionato, esso necessita di essere allenato sulla base di informazione a priori nella fase di progettazione del sistema. A tal fine sono stati definiti dei campioni di *training* per le classi di interesse ovvero degli esempi da cui il classificatore potesse imparare a riconoscere le classi "neve", "non neve" e "nuvole". Considerato che il sistema elabora immagini acquisite durante tutto l'anno, sono stati creati due set di campioni di *training*: uno per l'inverno (dal 1° novembre al 30 aprile) e uno per l'estate (dal 1° maggio al 31 ottobre) con lo scopo di aumentare l'accuratezza della classificazione.

Particolare attenzione è stata dedicata al problema legato alla mappatura della neve in ombra (neve non direttamente

illuminata dal sole nel momento dell'acquisizione). I pixel associati a neve in ombra, pur essendo parte della classe "neve", presentano caratteristiche radiometriche diverse dai pixel di neve non in ombra. Questa problematica è particolarmente rilevante per aree come quella del Trentino dove le montagne e la topografia irregolare comportano la presenza di varie zone d'ombra anche nelle immagini satellitari alla risoluzione geometrica di quelle acquisite da MODIS. Per questo motivo sia nella scelta delle informazioni fornite in ingresso al classificatore sia nella scelta dei campioni di training è stata dedicata particolare attenzione alla modellazione di entrambe le sotto-classi legate alla neve: "neve in ombra" e "neve esposta alla radiazione solare". A questo proposito i dati ancillari legati al modello digitale del terreno giocano un ruolo molto importante.

Le mappe di copertura nevosa prodotte riportano in colore bianco le zone in cui è stata identificata la presenza di neve e in grigio quelle in cui è stata rilevata la copertura nuvolosa. Tutto ciò che non appartiene a una di queste due classi è stato lasciato trasparente.

Infine la mappa ottenuta è stata sovrapposta ad una rappresentazione pittorica del Trentino per migliorare l'impatto visivo e favorire l'interpretazione del risultato da parte degli utenti.

La validazione delle mappe di classificazione generate dal sistema è stata fatta sia da un punto di vista qualitativo che quantitativo. Dal punto di vista qualitativo le mappe ottenute con il sistema automatico sviluppato sono state confrontate visiva-

mente con le immagini MODIS alla risoluzione di 250 m. L'analisi ha dimostrato che le mappe sono conformi a quanto si percepisce osservando le immagini telerilevate. Per poter effettuare la validazione quantitativa, è stato necessario definire una verità a terra. Essa è costituita da un insieme di punti (pixel) la cui classe informativa è nota a priori.

L'individuazione dei punti di verità a terra è stata effettuata mediante foto-interpretazione.

Per alcune delle immagini disponibili è stata svolta un'analisi visiva che ha permesso di assegnare la classe di appartenenza ad un sottoinsieme di pixel.

Sono stati quindi definiti pixel di "neve", "non neve" e, a seconda delle condizioni meteorologiche, pixel di "nuvole".

I campioni (che sono differenti da quelli usati per l'allenamento del classificatore) sono stati utilizzati per la validazione dei risultati di classificazione. La validazione quantitativa ha portato ad un'accuratezza media di classificazione superiore al 92%. Si noti che il sistema fornisce come prodotto ausiliare anche la mappa di copertura nuvolosa giornaliera corrispondente all'ora di acquisizione del satellite.

Generazione di dati statistici

Dalle mappe di copertura nevosa sono stati derivati due prodotti statistici al fine di avere a disposizione strumenti per una valutazione oggettiva delle mappe di copertura nevosa ed eventualmente poter fare le prime considerazioni sulle dinamiche in atto. Essi sono:

- la percentuale di area coperta da neve;
- il limite altitudinale della presenza di neve;

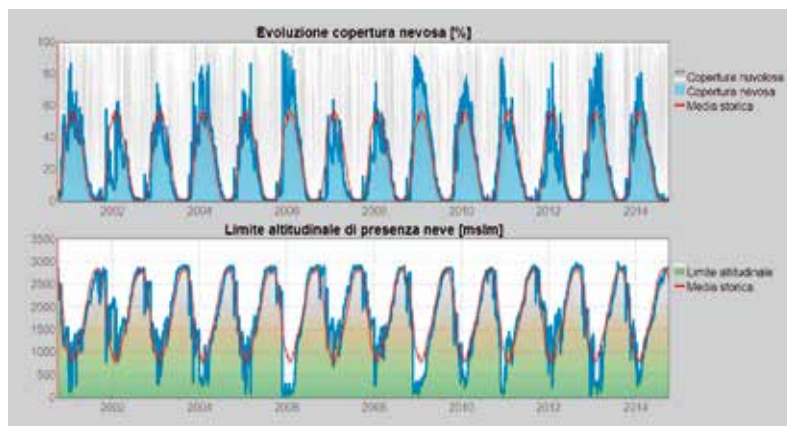
Entrambi i prodotti sono calcolati considerando alternativamente: la regione Trentino nel suo insieme, le 4 macro aree o le 21 zone omogenee dal punto di vista nivologico di Figura 4.

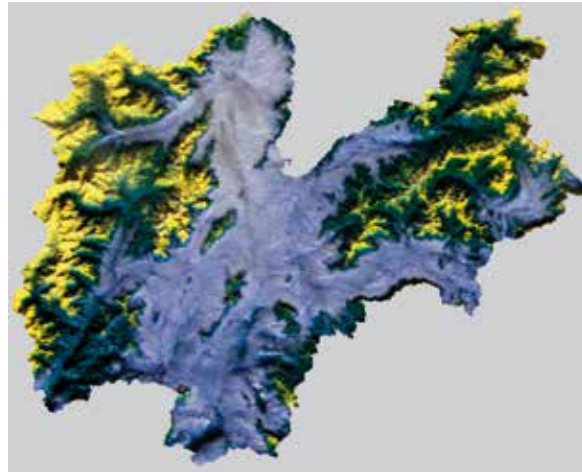
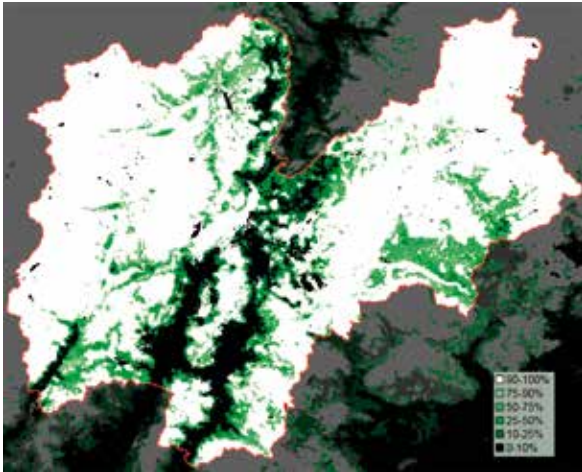
Questi parametri sono stati registrati in un database Access/MySQL al fine di facilitarne l'impiego per la visualizzazione e l'analisi statistica. In Figura 5 è riportato un esempio di tali grafici per l'intera area del Trentino.

Fig. 4 - Zone di interesse: in rosso le macro zone, e in bianco le zone omogenee dal punto di vista nivologico.



Fig. 5 - Grafici della copertura nevosa e del limite altitudinale relativi al periodo 25 febbraio 2000 - 13 ottobre 2014.





Da sinistra a destra:
Fig. 6 - Mappa mensile di persistenza nevosa per il mese di novembre 2012.

Fig. 7 - Composizioni in falso colore del 17 Novembre 2013 con nebbie di fondovalle.

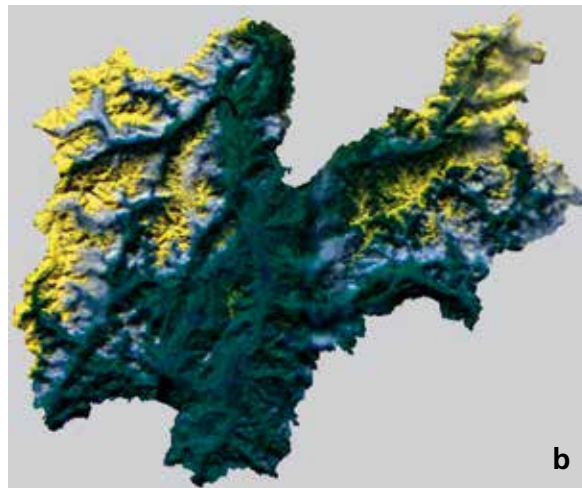
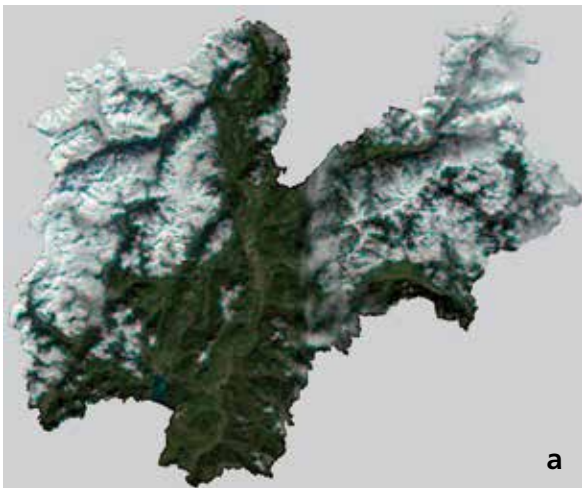


Fig. 8 - Composizioni in vero colore a) e in falso colore b) del 16 novembre 2012 in presenza di copertura nuvolosa parziale.

Generazione mappe di persistenza neve al suolo

In aggiunta a quanto descritto fin qui, sono state calcolate anche delle mappe mensili di persistenza della neve al suolo che indicano per ciascun pixel (area a terra di 250 m) la percentuale di tempo in cui esso è stato interessato dalla presenza di neve.

Le classi di persistenza adottate sono:

- 0 a 10%;
- da 10 a 25%;
- da 25% al 50%;
- dal 50% al 75%;
- dal 75% al 90%;
- dal 90% al 100%.

Per codificarle è stata usata una scala colori che va dal verde (bassa percentuale di copertura nevosa) al bianco (elevata percentuale di copertura nevosa) per favorire la percezione qualitativa dell'informazione. Le classi di persistenza sono state calcolate eliminando per ciascun pixel i giorni di copertura nuvolosa. Un esempio di tale prodotto è riportato in Figura 6.

Generazione immagini veri e falsi colori

Data la disponibilità di bande dell'infrarosso acquisite dal sensore MODIS, è stata definita una composizione in falso colore in grado di supportare in modo efficace l'analisi visiva delle immagini consentendo una miglior distinzione tra le classi di "neve" e "nuvole". Il falso colore è così composto: nel canale del rosso la banda 1, nel canale del verde la banda 2 e nel canale del blu la banda 5 sommata alle bande 6 e 7. L'infrarosso fornisce un'informazione direttamente legata alla temperatura della superficie investigata ed è pertanto particolarmente utile per identificare la copertura nevosa (più fredda) e distinguerla così da quella nuvolosa o altre coperture (più calde).

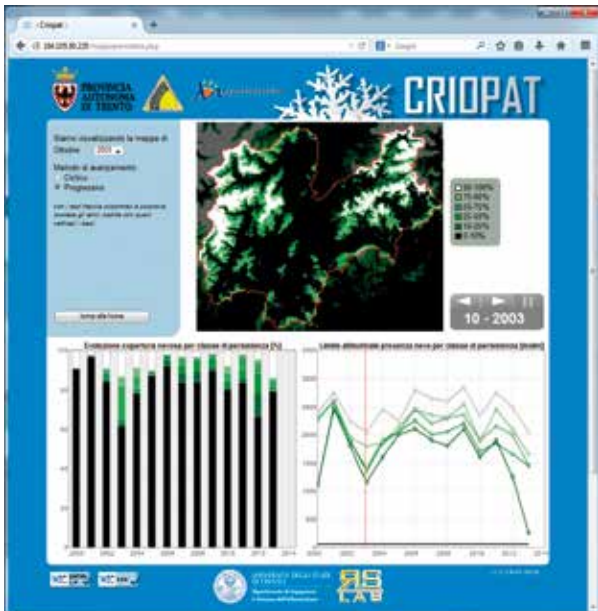
Si osservi per esempio la Figura 7 che evidenzia la presenza di nuvolosità in fondovalle. Il colore giallo è dato da una superficie a bassa temperatura e con riflettanza elevata nello spettro del rosso (potenzialmente neve) mentre le sfumature

verdi e blu corrispondono a zone di bassa riflettanza e più calde (potenzialmente e rispettivamente associabili a terreno nudo e nebbie di bassa quota).

Se si confrontano la composizione in vero colore di Figura 8a e quella in falso colore di Figura 8b (entrambe ottenute dall'immagine MODIS del 16 novembre 2012) si può notare che nella prima le nebbie di fondo valle risultano difficilmente distinguibili dalla neve presente in quota (si consideri ad esempio la zona della val di Pejo a nord-ovest) poiché entrambe assumono colore bianco/grigio, mentre nella seconda la distinzione è netta poiché le nebbie e la neve sono caratterizzate da temperature molto diverse, più calde le prime e più fredde le seconde.

L'interfaccia web per l'analisi completa dei dati

Per agevolare la consultazione di tutti i prodotti generati dal sistema è stata creata un'interfaccia web accessibile da personale autenticato tramite login e pas-



Dall'alto verso il basso:
Fig. 9 - Interfaccia web in cui è stata selezionata la macro zona del Trentino occidentale.

Fig. 10 - Interfaccia web per l'analisi dei dati relativi alla persistenza della neve al suolo.

sword di cui si riporta un esempio in Figura 9. L'interfaccia è suddivisa in tre aree. La prima area, in alto a sinistra, permette di selezionare il periodo e la zona da analizzare (Figura 4). La seconda area, posta in basso, riporta la composizione in vero colore ottenuta con i prodotti a risoluzione migliorata di 250 m e la mappa di copertura nevosa del giorno di interesse la cui data è evidenziata nel riquadro grigio con cursori di selezione avanti e indietro. Infine, la terza area contiene i grafici dell'andamento in percentuale della copertura nevosa e del limite altitudinale della presenza di neve con le relative medie storiche in tratto continuo rosso calcolate su tutti gli anni antecedenti all'anno idrologico attuale.

La media è calcolata considerando un intervallo fisso all'interno del mese (intervalli 1-9; 10-19; 20-fine mese).

Una barra di colore rosso mette in evidenza la data in esame così da poter confrontare il dato di copertura nevosa e di limite altitudinale giornaliero con quelli del periodo esaminato.

I grafici fanno sempre riferimento alla zona di interesse selezionata nell'area in alto a sinistra dell'interfaccia web.

Se durante l'utilizzo si sceglie, per esempio, di analizzare il Trentino occidentale (come in Figura 9) una serie di informazioni estratte dal database sull'area di interesse comparirà nell'area in alto a sinistra. Esse comprendono sia misure riguardanti il periodo selezionato, come la percentuale di copertura nevosa media sul periodo selezionato e la percentuale di copertura nevosa media degli ultimi 7 giorni, sia misure giornaliere come la superficie totale (in ha), la superficie nevosa (in ha), la percentuale di superficie coperta da neve, e il limite altitudinale della copertura nevosa (in m s.l.m.) per il dato giorno sotto analisi.

I grafici riportati nell'area centrale in alto rappresentano l'andamento della copertura nevosa e il limite altitudinale relativi al periodo e alla zona indicata.

Una maschera che enfatizza l'area interessata e oscura il resto del territorio compare nell'area delle immagini in basso.

È interessante notare la presenza di un grafico grigio ombreggiato sullo sfondo del grafico di copertura nevosa. Esso rappresenta l'andamento della copertura nuvolosa giornaliera utile per comprendere l'affidabilità delle informazioni estratte da CRIOPAT per il giorno considerato.

Bisogna infatti considerare che la presenza di nuvole occulta la superficie terrestre al sensore MODIS impedendo di stabilire se sotto la coltre nuvolosa vi sia presenza o meno di neve e conseguentemente di ottenere dati consistenti di copertura nevosa e di limite altitudinale.

Per evitare le oscillazioni sul dato causate dall'effetto indesiderato della copertura

nuvolosa è stata fatta l'ipotesi che ad ogni pixel coperto da nuvole sia assegnata la classe "non neve" o "neve" sulla base dell'ultimo giorno utile privo di nuvole. In questo modo il limite altitudinale di presenza di neve viene determinato identificando tra i pixel assunti coperti da neve quello che ha l'altitudine più bassa. È stato inoltre inserito un meccanismo per limitare l'impatto di possibili pixel classificati in modo errato.

Si quantizza l'informazione sull'altitudine in passi da 50 m e si calcola l'istogramma della copertura nevosa in funzione dell'altitudine normalizzandolo rispetto al numero totale di campioni alle differenti quote. L'andamento naturale che ci si aspetta di ottenere considerando tale istogramma è monotono crescente.

Nel caso in cui siano presenti dei picchi nell'istogramma che ne alterano l'andamento atteso (per esempio picchi a bassa quota isolati) questi non vengono considerati nel calcolo del limite altitudinale di presenza neve. Il sistema restituisce come limite altitudinale quello che corrisponde alla prima fascia altitudinale che supera il 20% di copertura nevosa.

Tramite il tasto "opzioni" è inoltre possibile visualizzare l'immagine in falso colore, la mappa stimata della copertura del manto nevoso priva della copertura nuvolosa e la posizione delle stazioni nivologiche presenti sul territorio trentino. Una volta completata l'analisi della copertura nevosa giornaliera è possibile passare alla pagina di analisi dei dati riguardanti la persistenza della neve al suolo calcolata su base mensile mediante il pulsante "Mappe di persistenza neve al suolo" (a sinistra nell'interfaccia di analisi della copertura nevosa di Figura 9).

L'interfaccia di tale pagina è riportata in Figura 10.

Come per la pagina principale anche questa pagina è divisa in 3 aree.

La prima area, in alto a sinistra, permette di selezionare l'anno su cui eseguire l'analisi e il metodo di scorrimento (ciclico sull'anno o progressivo sulla serie storica) per valutare i trend dell'andamento della persistenza della neve al suolo.

La seconda area, in alto a destra, contiene la mappa di persistenza mensile della neve al suolo. La terza, in basso, riporta i grafici raffiguranti l'andamento annuale della percentuale della copertura nevosa (a sinistra) e l'andamento del limite altitudinale per ogni classe di persistenza (a destra).

Interfaccia web accessibile dal pubblico

Al fine di divulgare al pubblico i risultati ottenuti da CRIOPAT una interfaccia web più semplice e intuitiva rispetto a quella completa ad uso interno descritta precedentemente, è stata pubblicata sul sito di Meteotrentino (<http://www.meteotrentino.it/neve-ghiacci/criopat/criopat.aspx>) e riportata in Figura 11.

All'apertura della pagina web l'utente pubblico senza autenticazione può visualizzare le immagini dell'ultimo giorno disponibile (generalmente il giorno prima della data corrente) e con l'ausilio della barra temporale consultare l'intero archivio fino al 25 febbraio 2000.

Il riquadro grigio posto nel centro pagina riporta la data dell'immagine visualizzata, la console con i tasti "avanti" e "indietro" per scorrere singolarmente ogni immagine e il tasto "play" che consente di eseguire l'intera sequenza di immagini a partire dalla data selezionata alla frequenza di un'immagine per secondo. La composizione in vero colore posta in alto (Figura 11) è ottenuta utilizzando le bande spettrali di MODIS acquisite nelle lunghezze d'onda del rosso (banda 1 alla risoluzione nativa di 250 m), del blu e del verde (rispettivamente banda 3 e banda 4 a risoluzione migliorata).

Le tre bande spettrali menzionate sono state opportunamente elaborate per migliorare l'impatto visivo delle immagini risultanti e fornire all'utente evidenza qualitativa della situazione al suolo rispetto alla presenza/assenza di neve e, in caso di situazioni meteorologiche avverse, della presenza di nuvole. La mappa di copertura nevosa posta in basso (Figura 11) è il risultato del processo di classificazione in cui ogni pixel è assegnato ad

una delle tre classi: "neve", "non neve" e "nuvole" già descritte in precedenza.

CONCLUSIONI

Questo articolo ha descritto il funzionamento del sistema CRIOPAT per l'analisi della copertura nevosa del territorio trentino. Il sistema è in grado di accedere automaticamente ai dati acquisiti dal sensore MODIS della NASA e generare a cadenza giornaliera mappe di copertura nevosa, mappe di persistenza nevosa e statistiche sui trend di evoluzione della copertura nevosa e sui limiti altitudinali di presenza neve sul territorio trentino.

Tali dati sono accessibili sia in un database dedicato sia mediante intuitive interfacce web che permettono ad utenti autenticati di effettuare analisi personalizzate sui trend di evoluzione del manto nevoso.

Il sistema produce come prodotto ausiliario la mappa di copertura nuvolosa giornaliera all'ora di acquisizione dell'immagine satellitare.

Oltre al collaudo eseguito direttamente dai produttori di CRIOPAT, i nivologi dell'Ufficio Previsioni e Pianificazione incaricati di emettere il bollettino valanghe hanno periodicamente confrontato le mappe di copertura nevosa generate giornalmente con le informazioni in loro possesso, trovandole ordinariamente coerenti.

La limitata estensione temporale (13 anni) della serie di dati prodotti dalle mappe di copertura nevosa non permette di evidenziare trend significativi riconducibili ai cambiamenti climatici in atto (il cui sviluppo è su scale temporali molto più estese), ma la futura analisi delle mappe prodotte con l'ausilio delle serie storiche dei dati acquisiti dalle stazioni meteorologiche potrà fornire interessanti osservazioni in merito.

La natura passiva dei dati telerilevati MODIS utilizzati per la stima della copertura nevosa soffre di un'intrinseca incertezza nel caso di presenza persistente ed estesa di copertura nuvolosa.

Nel sistema CRIOPAT ciò viene gestito da un lato con un opportuno meccanismo di stima, dall'altro riportando congiunta-

mente ai dati di copertura nevosa quelli di copertura nuvolosa per rendere evidente all'utente quali dati siano stati estratti da misure dirette e quali da stime.

Si noti che un possibile semplice upgrade del sistema è quello di sostituire i dati MODIS con i dati forniti quotidianamente dal nuovo sensore NPP Suomi, che dal punto di vista operativo può essere considerato il successore di MODIS.

In conclusione i risultati ottenuti dal sistema CRIOPAT si sono rivelati molto soddisfacenti e lo sviluppo di nuove missioni satellitari apre una prospettiva di ulteriore sviluppo del sistema ad una scala geometrica più dettagliata. Si tenga presente che l'architettura del sistema e i blocchi sviluppati sono generali e quindi potenzialmente estendibili a qualsiasi territorio al di fuori del Trentino.

Fig. 11 - Interfaccia web accessibile dal pubblico attraverso il sito di www.meteotrentino.it.



Bibliografia

- Melgani, F., L. Bruzzone, 2004. Classification of hyperspectral remote sensing images with support vector machines, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Vol. 42, N.8
- Sirguey, P.; R. Mathieu, Y. Arnaud, M.M. Khan, J. Chanussot, 2008. Improving MODIS Spatial Resolution for Snow Mapping Using Wavelet Fusion and ARSIS Concept. IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. Vol. 5, N.1

SITI INTERNET

- <https://earthdata.nasa.gov/data/near-real-time-data>. Servizio dati near-real time NASA
- <http://www.meteotrentino.it/neve-ghiacci/criopat/criopat.aspx>. Interfaccia web sul sito di Meteotrentino