

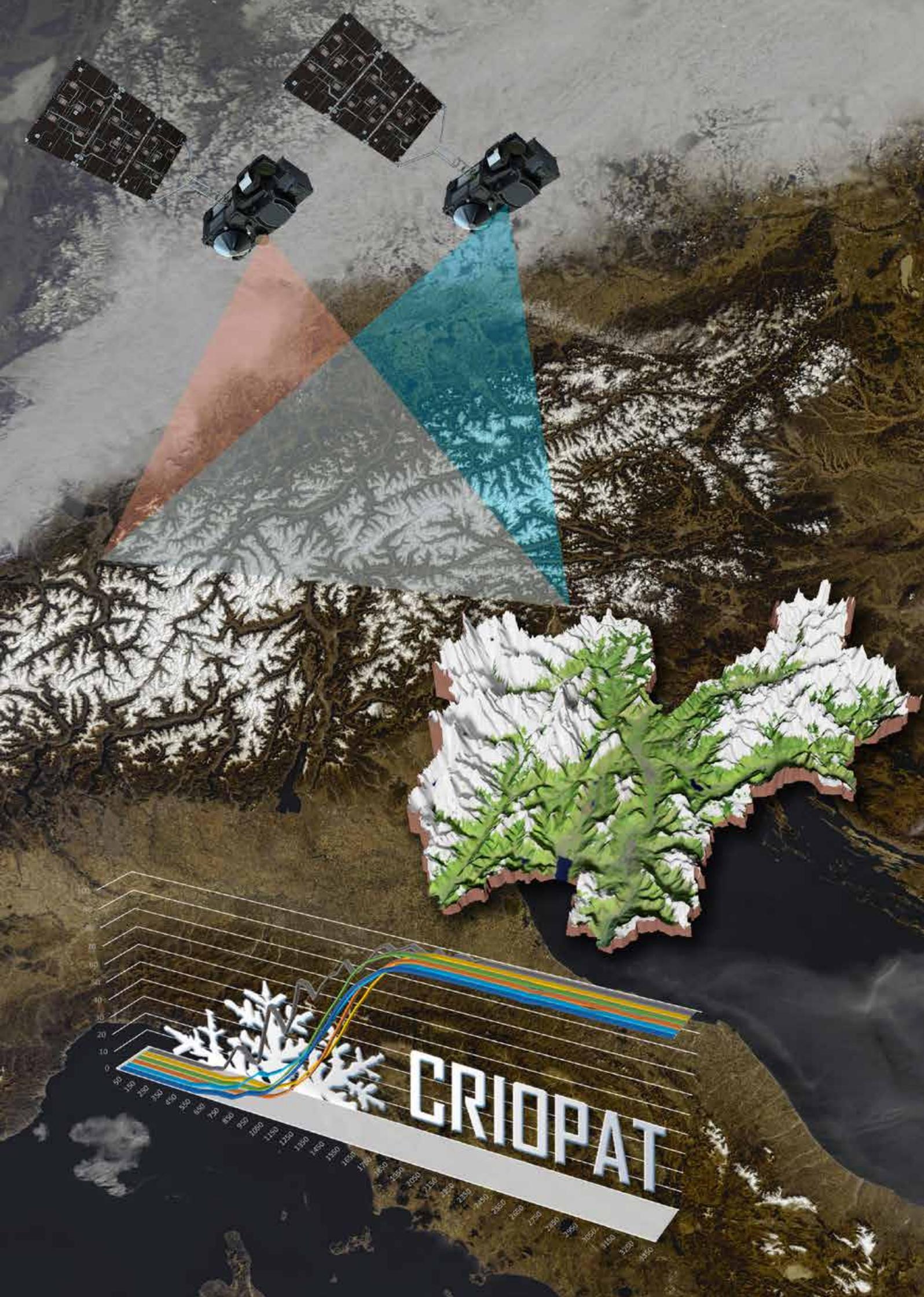
LO SVILUPPO del PROGETTO CRIOPAT

**Massimo Santoni,
Lorenzo Bruzzone**
RSLAB - Università di Trento
**Walter Beozzo, Paolo Cestari,
Mauro Gaddo**
Ufficio Previsioni e Pianificazione -
Provincia Autonoma di Trento

The evolution of the CRIOPAT project

This paper presents the CRIOPAT project, started in 2012 from the cooperation between the Forecasting and Planning Office of the Autonomous Province of Trento and the Remote Sensing Laboratory (RSLab) of the Department of Information Engineering and Computer Science of the University of Trento. CRIOPAT is an integrated analysis system that is able to automatically gather important information about snow coverage on a daily basis in the Trentino region through satellite images. To date, CRIOPAT has generated a 20 years long time series of nivological data for the province of Trento. The evolution of the system presented here aims to extend the expected life of the system by integrating the data acquired by the Sentinel-3 constellation and to improve the analysis tools with new types of statistical data and their visualization in the web UI. As expected, the new statistical data highlights the variations among different snow cover distributions allowing thus a better exploitation of the system. Lastly, the publication of CRIOPAT data is presented on the Open Data portal of Trentino.

Questo articolo presenta l'evoluzione del progetto CRIOPAT, nato nel 2012 dalla collaborazione tra l'Ufficio Previsioni e Pianificazione della Provincia autonoma di Trento e il laboratorio di telerilevamento (RSLab) 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. Ad oggi CRIOPAT ha prodotto un'interessante serie storica di dati relativi alla copertura nevosa di durata ventennale; questa evoluzione ha quindi l'obiettivo di estendere la vita futura del sistema mediante l'integrazione dei dati acquisiti dalla costellazione Sentinel-3 e ampliare gli strumenti di analisi a disposizione grazie a nuovi dati statistici e alla loro rappresentazione grafica nell'interfaccia web del sistema. Le nuove statistiche di copertura nevosa sviluppate evidenziano, come atteso, differenti evoluzioni stagionali della distribuzione del manto nevoso, permettendo quindi una miglior fruibilità dei dati prodotti. Infine, l'articolo presenta la pubblicazione dei dati prodotti da CRIOPAT nel portale Open Data del Trentino.



CRIOPAT



INTRODUZIONE

Sul numero 83 di Neve e Valanghe del dicembre 2014 venne pubblicato un articolo [1] sul progetto CRIOPAT che, mediante l'uso delle immagini satellitari MODIS della NASA (disponibili gratuitamente dal febbraio 2000) permette un monitoraggio giornaliero della copertura nevosa del Trentino. Visto l'interesse riscontrato nella serie storica ventennale prodotta, l'Ufficio Previsioni e Pianificazione della Provincia autonoma di Trento ha voluto investire nuove risorse per continuare il monitoraggio, estendere gli strumenti di analisi statistica e rendere liberamente accessibili i prodotti principali.

Per garantire la continuità del dato raccolto e migliorare la qualità del prodotto si è rivelato necessario aggiornare l'algoritmo di CRIOPAT per analizzare anche le immagini della costellazione di satelliti Sentinel dell'ESA.

LE POTENZIALITÀ DELLA COSTELLAZIONE SENTINEL DELL'ESA

La costellazione di satelliti Sentinel fa parte dell'iniziativa Copernicus di ESA e della Commissione Europea che ha come obiettivo quello di fornire alla Comunità Europea la capacità di acquisire e gestire in modo autonomo dati ed informazioni per l'osservazione della Terra. Allo stato attuale sono state lanciate 5 diverse tipologie di satelliti, per un totale di 8 satelliti in orbita. Di particolare interesse per lo studio della criosfera sono le tre coppie di satelliti delle famiglie Sentinel-1, Sentinel-2 e Sentinel-3. Le

prime due, Sentinel-1 e Sentinel-2, condividono una simile risoluzione spaziale nell'ordine di 10-20 m/px ed un analogo tempo di rivisitazione di circa 5 giorni. I due satelliti Sentinel-1 sono equipaggiati con un sensore SAR in banda C, che permette l'osservazione della superficie in modo indipendente dalle condizioni di illuminazione o di copertura nuvolosa, mentre i due satelliti Sentinel-2 sono dotati di uno scanner multispettrale che opera nelle lunghezze d'onda del visibile e del vicino e medio infrarosso. La costellazione Sentinel-3 ha invece delle caratteristiche differenti e complementari, dispone infatti di una suite di strumenti che hanno come obiettivo la mappatura degli oceani e delle terre emerse con un'alta frequenza temporale. Queste caratteristiche rendono Sentinel-3 simile in alcuni aspetti al satellite TERRA della NASA sui cui dati si basa la versione iniziale di CRIOPAT e perciò si è rivelato essere il candidato ideale per affiancarlo, garantendo così una nuova sorgente di dati. È importante notare che il satellite TERRA, in orbita dal 2000, attualmente è ancora operativo e dovrebbe rimanere tale per alcuni anni ancora ma ad oggi ha superato di ben 3 volte il periodo operativo per cui era stato progettato ed il carburante disponibile per le manovre di correzione dell'orbita è ridotto ormai al minimo.

Come anticipato, Sentinel-3 dispone di vari strumenti a bordo, tra questi quello di maggior interesse per il progetto CRIOPAT è *Ocean and Land Color Imager (OLCI)* ovvero uno scanner multispettrale con 21 bande spettrali distribuite tra

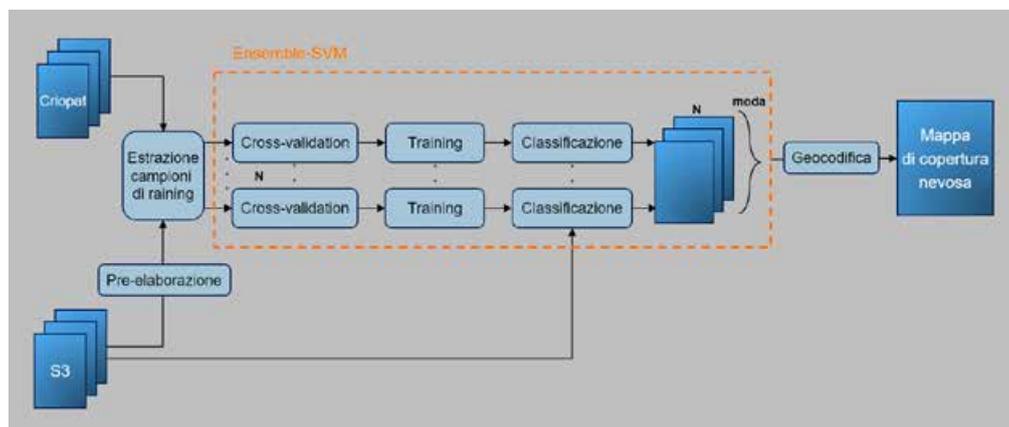
400 e 1020 nm, una risoluzione spaziale di 300 m/px in tutte le bande e, grazie alla combinazione di due satelliti in orbita con una swatch di acquisizione (strisciata a terra) di 1270km, un tempo di rivisitazione di un solo giorno.

IL NUOVO ALGORITMO IMPLEMENTATO

I dati acquisiti dalla famiglia di satelliti Sentinel sono disponibili gratuitamente tramite il portale *Copernicus Open Access Hub* [Nota 1]. Per quanto riguarda Sentinel-3 OLCI vengono forniti i dati livello 1 di radianza "top-of-atmosphere", ovvero senza correzione atmosferica, in formato NetCDF. Questi dati sono organizzati secondo la geometria originale di acquisizione, perciò è stato necessario introdurre un primo passaggio di pre-elaborazione dei dati.

Benché MODIS e OLCI condividano alcune caratteristiche non è possibile applicare in modo diretto il sistema di classificazione sviluppato precedentemente in CRIOPAT ai dati Sentinel-3. Dovendo quindi definire un nuovo classificatore, uno degli aspetti considerati è stato cercare di garantire la massima compatibilità tra le mappe di copertura nevosa derivate da dati MODIS e OLCI, cercando allo stesso tempo di non propagare eventuali errori di classificazione del primo sistema. La soluzione scelta si basa su un classificatore supervisionato di tipo *Support Vector Machine* [2] dove i campioni di training sono stati estratti in modo automatico usando le mappe di copertura nevosa generate dai dati MODIS. La capacità di questo approccio di estrarre un grande numero di campioni ha permesso la definizione di un insieme di 8 classificatori, ognuno dei quali basato su un insieme indipendente di dati il cui risultato viene aggregato nella mappa finale tramite un sistema di voto a maggioranza. Questa tecnica, nota in letteratura come *Ensemble Learning* [3][4] permette di realizzare un sistema di classificazione (Figura 1) più robusto rispetto all'uso di un singolo classificatore. Per ridurre la ridondanza

Fig. 1 - Schema a blocchi del sistema di classificazione di CRIOPAT 2.0



dei campioni di training, nella fase di selezione è stato sviluppato un algoritmo dedicato che mira a identificare in modo iterativo i campioni che appaiono più incerti al classificatore, permettendo così di cogliere elementi minoritari che una selezione casuale difficilmente avrebbe valutato.

Al fine di integrare le mappe derivate dai dati OLCI dei due satelliti Sentinel-3 con quelle già prodotte in CRIOPAT mediante l'analisi dei dati MODIS, è stato sviluppato un algoritmo di fusione che permette di condensare in una sola mappa le informazioni fornite dalle due catene di elaborazione. Per ogni pixel della mappa finale questo algoritmo unisce l'informazione delle aree non nuvolose delle mappe prodotte per un dato giorno e, nel caso esse non siano concordi, sceglie il valore della mappa derivata dal dato con un angolo di vista migliore. È stato infatti osservato, in modo particolarmente evidente sui dati MODIS, che la risoluzione spaziale e in modo più generale la qualità del dato viene degradata quando l'area osservata si trova vicino al bordo del campo visivo del sensore. Questo fenomeno è dovuto all'ampio campo visivo di questa tipologia di sensori, fattore fondamentale per garantire la copertura globale giornaliera da un'orbita eliosincrona. Ciò comporta angoli di visione che nel caso di MODIS arrivano a 55 gradi dalla verticale sul bordo del campo visivo.

L'EVOLUZIONE DEGLI STRUMENTI DI ANALISI STATISTICA DEI DATI

L'interfaccia web originaria del progetto CRIOPAT [1] è stata arricchita da nuove funzionalità con l'intento di potenziare l'analisi dell'evoluzione della copertura nevosa e del limite altitudinale di presenza neve nel periodo di interesse. Per il giorno sotto esame, evidenziato con una barra verticale rossa nei grafici di Figura 2, è ora disponibile una serie di curve di distribuzione altitudinale della copertura nevosa differenziabile anche

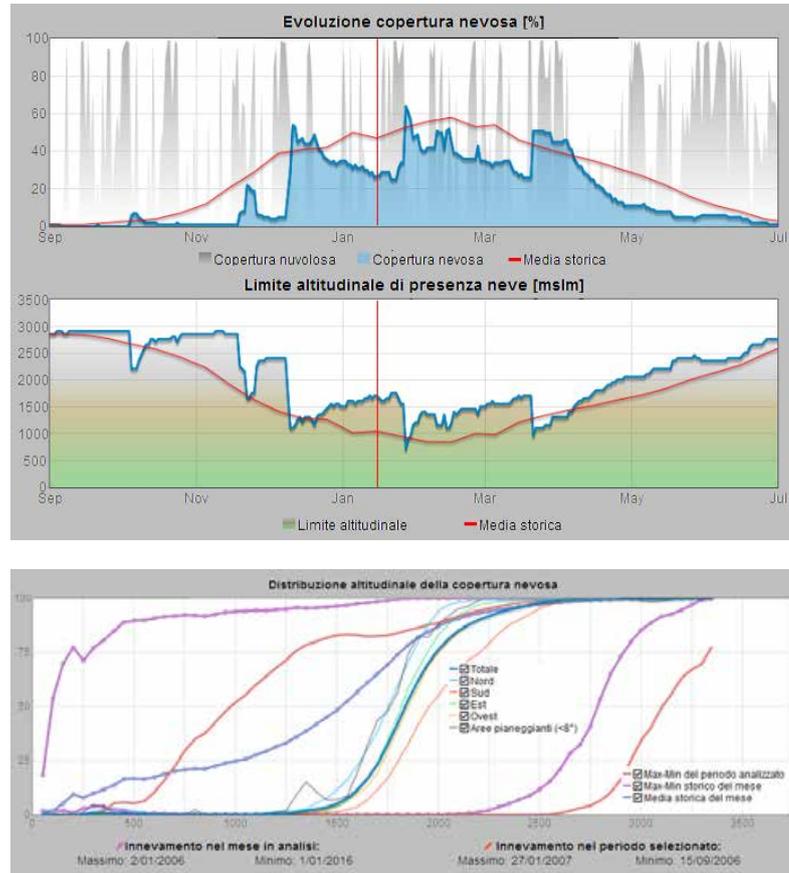


Fig. 2 - Periodo settembre 2006 - giugno 2007: grafico dell'evoluzione della percentuale di copertura nevosa del Trentino (in azzurro) e della quota limite della presenza di neve al suolo (in verde). Con tratto rosso continuo sono riportate in decadi fisse le medie storiche calcolate sugli anni antecedenti a quello in esame. La barra rossa verticale indica la data del giorno in esame, il 15 gennaio 2007.

Fig. 3 - Distribuzione altitudinale della neve al suolo per lunedì 15 gennaio 2007. Al centro le curve per la giornata in esame con i colori: ciano (Nord), rosso (Sud), verde (Est), giallo (Ovest), differenziano le diverse percentuali di innevamento per quota al variare dell'esposizione dei versanti. La linea azzurra (Totale) descrive l'andamento medio complessivo comprensivo anche della curva di distribuzione delle aree pianeggianti con andamento più irregolare per gli effetti di situazioni specifiche locali.

in base all'esposizione dei versanti (Figura 3). Tali curve vengono costruite considerando la percentuale di pixel identificati come neve (celle di colore bianco di dimensione 250m x 250m) sul totale di quelli posti in una determinata fascia altimetrica. Inoltre è possibile confrontare la distribuzione giornaliera con le curve storiche di minima e massima copertura giornaliera nello stesso mese (linea viola con pallini), oppure con la media storica del mese (linea azzurra con pallini). Con linea rossa continua vengono invece riportati i massimi e minimi di copertura nevosa nel periodo analizzato.

Per un efficace confronto tra loro le curve vengono normalizzate secondo la seguente funzione:

$$H(alt, esp) = \frac{\sum_{pixel} \text{pixelnevosi}(alt, esp)}{\sum_{pixel} (alt, esp)}$$

La variabile "alt" rappresenta le fasce altitudinali ad intervalli di 50m, mentre "esp" rappresenta l'angolo di esposizione anch'esso quantizzato nelle seguenti classi: nord, sud, est, ovest e zone pianeggianti. Vengono considerate zone

pianeggianti le aree che presentano una pendenza inferiore ad 8 gradi; questo valore è definito non tanto rispetto alle caratteristiche di stabilità del manto nevoso (come nell'analisi di rischio valanghivo) bensì con l'obiettivo di raggruppare le aree in cui l'angolo di esposizione diventa trascurabile a causa della bassa pendenza avendo così condizioni di irraggiamento solare molto simili. Inoltre, tali aree coincidono in buona parte con i fondovalle che presentano un uso del suolo spesso differente dalle aree a maggior pendenza. Sono state analizzate anche le aree con pendenza superiore a 60 gradi, ossia quelle considerate soggette a regolari distacchi valanghivi spontanei, data però la risoluzione spaziale dei dati in analisi non sono state riscontrate aree di questo tipo nella provincia di Trento. Dall'analisi di queste statistiche si è notato che nei casi in cui il numero di campioni (pixel o celle 250m x 250m) appartenente alla fascia altitudinale in esame risulti eccessivamente ridotto la distribuzione altitudinale presenta un andamento rumoroso e quindi poco leggibile. Un'analisi specifica ha per-

NEVE

messo di identificare il minimo valore di campioni che garantisce di ottenere delle statistiche affidabili adottandolo poi come default di un parametro regolabile nell'interfaccia web di consultazione. Questo strumento permette di individuare e filtrare risultati rumorosi e poco affidabili che emergono soprattutto quando si eseguono analisi su porzioni del territorio provinciale.

Altro utile strumento sviluppato nel progetto CRIOPAT sono le mappe di persistenza mensile della neve al suolo che indicano per quanti giorni in un mese il territorio della provincia di Trento è coperto da neve. Mensilmente tutti i pixel rappresentativi di una superficie quadrata di 250 m di lato vengono assegnati ad una delle sei classi di persistenza (Figura 4) e colorati in tonalità di verde per produrre la mappa di persistenza mensile (Figura 5).

Da queste mappe si sono ricavate interessanti statistiche mensili con strumenti di analisi già presenti nella prima versione di CRIOPAT [1]: sono i grafici di evoluzione storica della copertura

nevosa (Figura 6 a)) e del relativo limite altitudinale della presenza di neve al suolo (Figura 6 b)).

Nel primo di questi grafici l'istogramma a colonne sovrapposte è composto da tante barre quanti sono gli anni di monitoraggio; il totale di ogni barra rappresenta il 100% delle celle che ricoprono il territorio provinciale ed è suddiviso in tanti elementi quanti sono le classi di persistenza. Nel secondo grafico vengono invece rappresentate per ogni classe di persistenza le linee spezzate, colorate secondo lo standard adottato (Figura 4), che descrivono l'andamento storico della quota limite mensile di presenza della neve. La barra rossa verticale in entrambe le rappresentazioni indica l'anno della mappa mensile di persistenza analizzata (Figura 5). I grafici in fondo a Figura 6 si riferiscono per l'appunto al novembre 2005. Nel primo a sinistra (Figura 6 c)) viene presentata la media mensile (linea azzurra Totale) di tutte le curve giornaliere di distribuzione altitudinale della copertura nevosa suddivisibile anche per esposizione (p.es. linea rossa per versanti esposti a sud e ciano - azzurro per quelli a nord (vedi anche Figura 3)). In questo grafico viene riportata anche la media storica del mese e le curve giornaliere di minimo e massimo giornaliero per poter fare ulteriori confronti in sede di analisi. Nel secondo grafico a

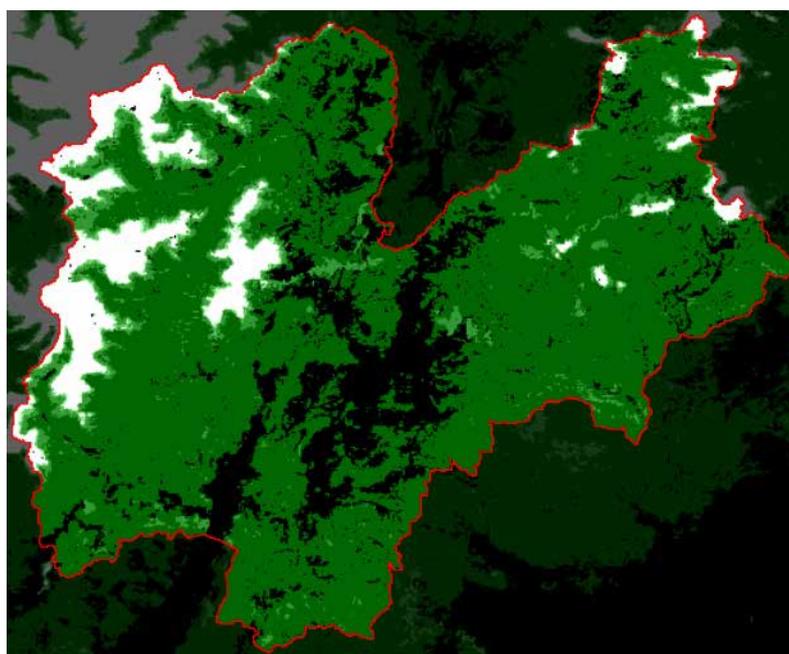
destra (Figura 6 d)) vengono riportate le distribuzioni altitudinali per ogni classe di persistenza eventualmente filtrate in base all'angolo di esposizione del versante in cui la singola cella ricade. La linea rossa orizzontale evidenzia la soglia del 30% di copertura nevosa che deve essere eguagliata o superata per considerare una fascia altimetrica area innevata. I punti dove tale linea interseca le curve di distribuzione altitudinale per classe di persistenza rappresentano la quota limite di presenza neve raffigurate nel grafico di Figura 6 b) ed evidenziate dalla barra rossa.

I limiti di rappresentatività delle classi di persistenza "centrali" per numero esiguo di campioni (celle territoriali) nei mesi nei quali la copertura nevosa è pressoché stabile sono stati superati calcolando il limite altitudinale e le relative curve sulla totalità dei campioni che ricadono anche nelle classi superiori. In sostanza per determinare la quota limite di innevamento per la 4° classe di persistenza (50 - 75 %) vengono considerate tutte le aree (celle o pixel) che sono state innevate per più di 15 giorni in un mese.

Fig. 4 - Definizione delle sei classi di persistenza.

Classi di persistenza % di giorni sul totale mensile	
□	90-100% (da 27 a 30 giorni/mese medio)
■	75-90% (da 23 a 27 giorni/mese medio)
■	50-75% (da 15 a 23 giorni/mese medio)
■	25-50% (da 8 a 15 giorni/mese medio)
■	10-25% (da 3 a 8 giorni/mese medio)
■	0-10% (da 0 a 3 giorni/mese medio)

Fig. 5 - mappa di persistenza per il mese di novembre 2005 sul territorio della Provincia autonoma di Trento dall'interfaccia web di CRIOPAT [1].



L'USO DELLO STRUMENTO CRIOPAT 2.0 SU PERIODI NIVOLOGICI SIGNIFICATIVI

CRIOPAT permette di avere un quadro d'insieme dell'evoluzione della copertura nevosa e del limite altitudinale della presenza della neve al suolo in Trentino dal febbraio 2000, data della messa in orbita del satellite della NASA con sensore MODIS. Dalla Figura 7 che riporta i grafici di evoluzione della copertura nevosa per tutto il periodo di monitoraggio disponibile si possono individuare (parti cerchiata con tratto viola) le stagioni con maggior copertura nevosa: 2005/06, 2008/09 e 2012/13. Tali stagioni sono evidenti anche nel grafico del limite altitudinale per le ampie regioni bianche (neve a bassa quota) sotto la curva rossa della media. Interessante notare che il 2013/14, ca-

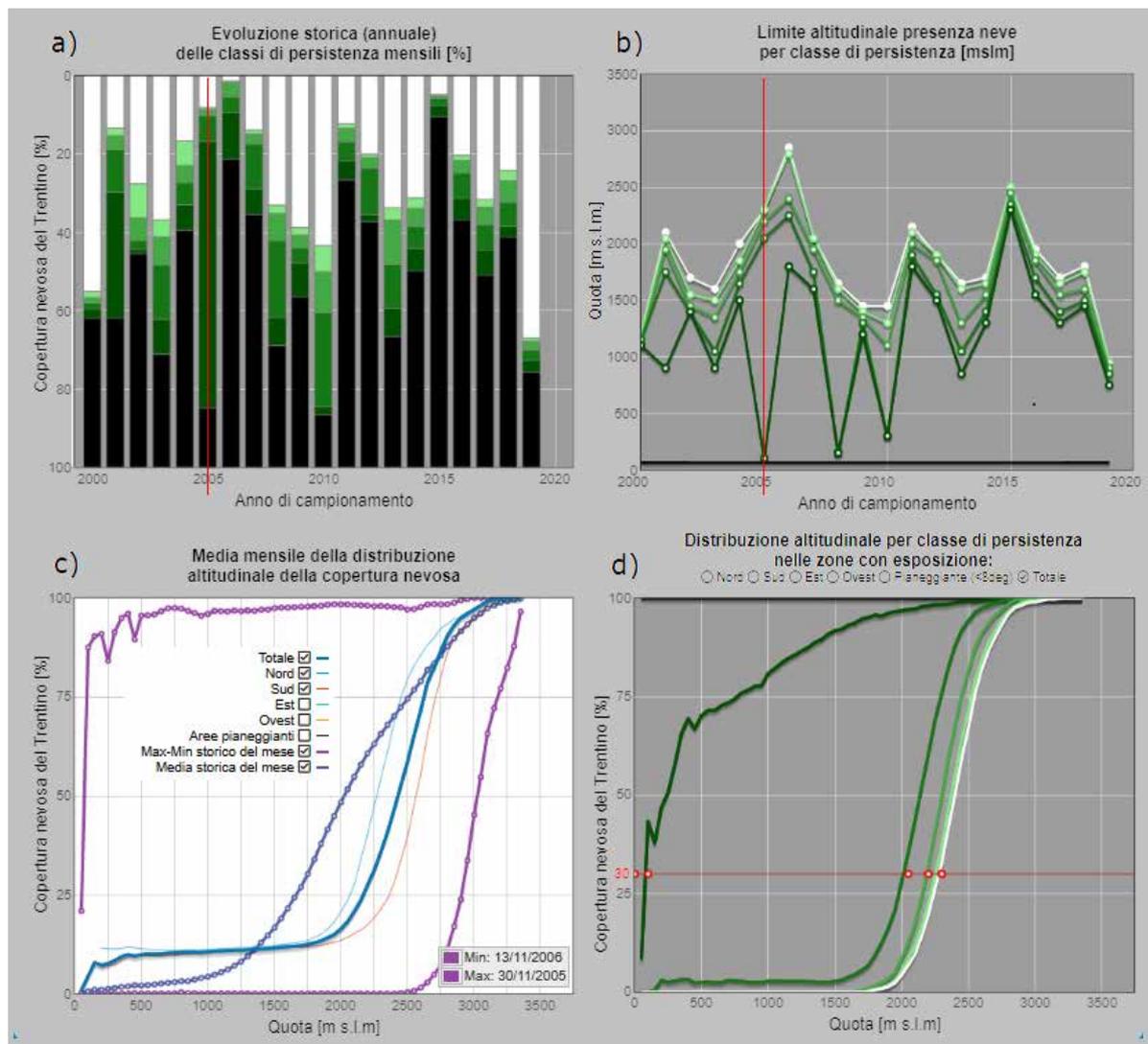


Fig. 6 - Analisi statistiche sulla persistenza della neve al suolo nel mese di NOVEMBRE su tutto il Trentino dall'interfaccia web di CRIOPAT 2.0.

ratterizzato dai massimi valori cumulati di neve fresca, non è tra le stagioni con i maggiori valori di territorio innevato, questo perché le abbondanti nevicate hanno interessato solo marginalmente il fondovalle trentino. Viceversa il 2005/06 ha avuto presenza di neve sotto i 500 m per gran parte dell'inverno. Tali considerazioni devono tener comunque conto dei limiti strutturali di CRIOPAT che in presenza di estesa e prolungata copertura nuvolosa non può aggiornare le proprie statistiche. Di conseguenza stagioni fredde con nevicate a bassa quota e successive ampie schiarite saranno tendenzialmente viste da CRIOPAT come stagioni a maggior copertura nevosa rispetto a quelle con ricorrenti perturbazioni di scirocco a carattere nevoso anche a bassa quota ma seguite da rialzi termici e persistente nuvolosità.

Tra le stagioni più scarse di copertura nevosa notiamo il 2001/02, 2006/07, 2015/16 ma soprattutto il 2016/17 (cerchiata in arancio in Figura 7). Infatti la stagione autunno-inverno a cavallo del 2001 viene ricordata per la scarsità di precipitazioni [5], gli ultimi mesi del 2006 e del 2015 per il caldo anomalo [6] [7] [8] e il 2016/17 per la siccità meteorologica invernale [9] [10]. Del gennaio 2007 si ricordano gli episodi di Foehn e alte temperature [11] con forte vento proveniente da nord e rialzo dello zero termico fino a 3800 m avvenuto in particolare venerdì 12 gennaio. Dal confronto tra il grafico di Figura 2 per il 2006/07 e gli analoghi grafici per le stagioni 2015/16 e 2016/17 disponibili nei rapporti di Meteotrentino [12] [10] emerge che mentre la stagione 2006/07 ha avuto un innevamento quasi sempre sotto media, quella del 2015/16 è stata

caratterizzata da scarsissima copertura nevosa e quasi sempre oltre i 2500 m fino a gennaio. La stagione successiva è stata però la peggiore tra quelle monitorate con copertura nevosa quasi sempre oltre i 2000 m, ad eccezione di febbraio e marzo, e con ripercussioni importanti in termini di carenza idrica. L'evoluzione di CRIOPAT 2.0 rende anche possibile esaminare la copertura nevosa dei pendii caratterizzati da diverso orientamento. La Figura 3 riporta la distribuzione altitudinale della neve al suolo per i versanti esposti a nord (curva ciano) e sud (curva rossa) di lunedì 15 gennaio 2007 evidenziandone una forte differenza (25%) di copertura nevosa tra i 1800 e 2200 m circa; differenza che si è cominciata a manifestare a partire dal 10 - 11 gennaio per progressiva riduzione di copertura sui versanti esposti a sud per effetto combinato del rialzo termico

NEVE

e del Foehn che ha "asciugato" il manto nevoso. C'è da dire che le capacità degli strumenti di CRIOPAT nel decifrare gli effetti di tali fenomeni è inficiata dalla presenza di copertura nuvolosa che si dispone sui vari versanti in modo diverso a seconda delle particolari condizioni termo-igrometriche delle masse d'aria che si incontrano, oscurando l'uno o l'altro versante al satellite.

Volendo testare le potenzialità degli strumenti di analisi storica della persistenza della neve al suolo di CRIOPAT 2.0 abbiamo esaminato la serie mensile di novembre soffermandoci sul novembre 2019, considerato eccezionale per i quantitativi di precipitazione che hanno superato i precedenti primati storici [13]. Dal grafico dell'evoluzione storica delle classi di persistenza esposto in Figura 6 a) notiamo che effettivamente nel novembre 2019 quasi il 70% del territorio

Trentino è stato coperto da neve per almeno 27 giorni (90% del mese – VI classe di persistenza di colore bianco). Prima di allora nel nuovo millennio era stato il novembre 2000 ad essere quello con la maggior persistenza di neve sul territorio (55%, poco più della metà del Trentino).

Nel novembre 2005 e 2010 abbiamo avuto invece quasi il 90% del territorio con neve al suolo per almeno tre giorni (10% del mese – I classe di persistenza di colore nero). Sono gli anni delle nevicate nel fondovalle trentino [14] e nella città di Trento: 25 cm nel 2005 e 16 cm nel 2010 [15]. In questo caso la classe di persistenza di colore bianco (90%) copre solo l'8% del territorio provinciale nel 2005 e poco più del 40% nel 2010 a testimonianza di perturbazioni molto fredde ma insufficienti a preservare per più giorni il manto nevoso al suolo. Que-

sti due mesi accompagnati dal novembre 2008 sono quelli che emergono dal grafico di Figura 6 b) dove la traccia del limite altitudinale della presenza della neve della seconda classe di persistenza (10-25%) raggiunge le quote di fondovalle staccandosi in modo netto dal tracciato delle altre classi di persistenza. Questi minimi, che a prima impressione possono sembrare errori di calcolo, in realtà testimoniano le nevicate di bassa quota che, scarse di spessore, non riescono a garantire la copertura nevosa per più di 8 giorni. Nel novembre 2008 le nevicate sono state abbondanti ma quelle che hanno interessato il fondovalle e in particolare Trento, con il record storico di 48 cm di neve cumulata in tre giorni [15], si sono verificate a fine mese cosicché l'effetto sulla persistenza del manto nevoso è visibile sul grafico dell'evoluzione storica delle classi di persistenza del mese di dicembre.

Al contrario i mesi di novembre con minor copertura sono stati quelli del 2006 e del 2015. Il primo è stato il mese centrale di un periodo autunnale particolarmente caldo [6] che ha compromesso la permanenza del manto nevoso anche oltre i 2800 m, mentre il secondo, insieme al dicembre 2015, è risultato essere un bimestre eccezionalmente secco [8] con solo delle debolissime precipitazioni nevose il 21 novembre oltre i 1800 m s.l.m., che però non sono riuscite a mantenere imbiancato il territorio al di

Fig. 7 - Grafici della copertura nevosa e del limite altitudinale dal settembre 2000 al settembre 2020 dall'interfaccia web di CRIOPAT [1].

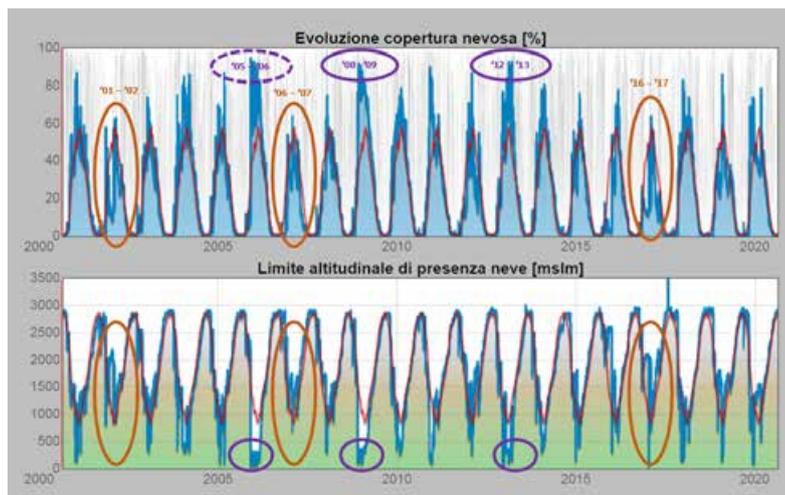
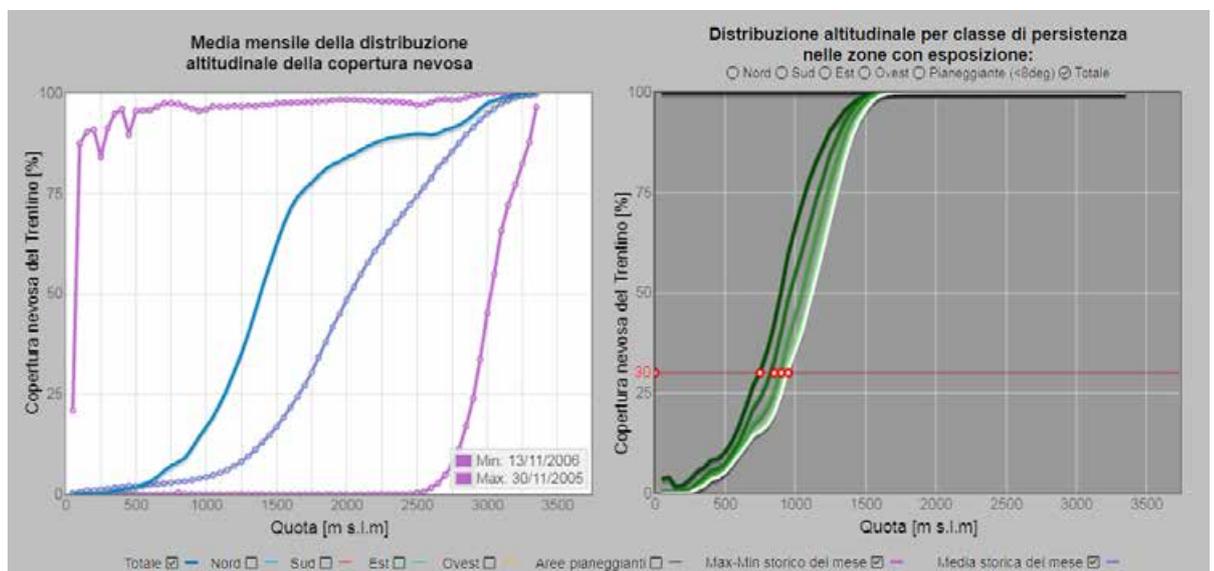


Fig. 8 - Grafici della distribuzione altitudinale della copertura nevosa media (sinistra) e per classi di persistenza (destra) nel novembre 2019 su tutto il Trentino dall'interfaccia web di CRIOPAT 2.0.



sotto dei 2300 – 2400 m (Figura 6 b). Ritornando al novembre 2019, nel grafico di sinistra della Figura 8 vengono messe a confronto la media mensile della distribuzione altitudinale della copertura nevosa (linea blu "Totale") con la media storica del mese (linea azzurra a pallini) fornendo un ulteriore riscontro della particolare abbondanza di copertura nevosa. Infatti a tutte le quote la media mensile del 2019 supera quella storica, eccetto per la fascia altimetrica sotto i 600 m circa interessata solo da piogge. Inoltre nello stesso grafico viene raffigurata la curva della giornata del 13 novembre 2006 che rappresenta il minimo storico di copertura nevosa (linea rosa bassa) del periodo eccezionale di caldo anomalo già citato [6] [7] con assenza totale di copertura fino a poco oltre i 2500m e per più della metà delle aree poste sotto i 3000 m. La giornata con maggior copertura nevosa (linea rosa alta) si è invece verificata il 30 novembre del 2005 per la serie prolungata di nevicate sul fondovalle Trentino nell'ultima settimana del mese [14]. Infine il grafico di destra della Figura 8 fornisce un'idea della variabilità del limite della quota neve al susseguirsi degli eventi nevosi del novembre 2019; essendo infatti le varie curve molto vicine con cambio della curvatura a circa 1000 m s.l.m., si comprende che tutti gli eventi meteorici hanno mediamente permesso un buon innevamento al di sopra di questa quota. Viceversa il grafico di Figura 6 d) per il novembre 2005 evidenziava la scarsa durata dell'innnevamento sotto i 2000-2200 m di quota.

IL MONDO DEGLI OPEN DATA

Il progetto CRIOPAT è stato realizzato, se vogliamo, anche perché i dati di partenza, rilevati prima dal sensore MODIS per CRIOPAT 1.0 e poi da Sentinel-3 per CRIOPAT 2.0, sono messi a disposizione in forma aperta al libero riuso [Nota 2]. Relativamente a questo aspetto MODIS, essendo il frutto di un progetto della NASA, ricalca lo stile dei progetti di al-

tre agenzie USA che mettono a disposizione i propri dati sulla base del FOIA (Freedom Of Information Act), una legge USA del 1966 che permette, salvo rari casi, l'accesso a tutte le informazioni delle amministrazioni pubbliche. Anche l'ESA sta seguendo questa filosofia. In Italia, dopo una serie di leggi che a partire dagli anni 1990 sono state promulgate con l'obiettivo di aprire l'accesso agli atti ed ai dati delle amministrazioni pubbliche, siamo gradualmente arrivati a quello che è considerato il vero FOIA italiano solamente con il decreto legislativo n.97 del 25 maggio 2016, anche se in realtà alcune leggi e direttive europee prima di tale data hanno sollecitato le amministrazioni a rendere disponibili i propri dati.

Se negli USA la spinta all'apertura dei dati è stata determinata in prevalenza dalla volontà di rendere trasparente l'operato dell'amministrazione pubblica, in Europa la spinta decisiva è scaturita invece a seguito di numerosi studi economici degli anni 2000-2010 che evidenziarono come la messa a disposizione dei dati delle pubbliche amministrazioni per il libero riuso potesse innescare un circolo economico virtuoso di parecchi miliardi di euro che, a sua volta, avrebbe permesso la creazione di nuove aziende e posti di lavoro e che in definitiva avrebbe generato nuove introiti nelle casse dello stato sotto forma di tasse sulle imprese e sul lavoro. Mettere in vendita i dati delle PA avrebbe comportato invece più oneri che guadagni in termini di strutture amministrative da attivare. Gran parte delle pubbliche amministrazioni che hanno compreso come essere trasparenti e/o favorire lo sviluppo del mercato dei dati, si sono organizzate per facilitare l'accesso ai dati via web. Tutto questo si può riassumere con il concetto di Open Data.

Per una definizione tecnica degli Open Data che si smarchi dalla legislazione dei singoli Stati, possiamo utilizzare quella offerta della Open Knowledge Foundation (<https://okfn.org/>) per la quale: "i dati aperti sono dati che possono

essere liberamente utilizzati, riutilizzati e ridistribuiti da chiunque, soggetti eventualmente alla necessità di citarne la fonte e di condividerli con lo stesso tipo di licenza con cui sono stati originariamente rilasciati". La definizione completa spiega nei dettagli che "i dati devono essere disponibili nel loro complesso, per un prezzo non superiore ad un ragionevole costo di riproduzione, preferibilmente mediante scaricamento da Internet. I dati devono essere disponibili in un formato utile e modificabile" ed "i dati devono essere forniti a condizioni tali da permetterne il riutilizzo e la ridistribuzione. Ciò comprende la possibilità di combinarli con altre basi di dati". I principi generali che regolano quindi il mondo della conoscenza aperta, e quindi anche degli Open Data, sono sintetizzabili in tre punti:

- i) disponibilità di accesso ai dati gratuitamente o, al massimo, al costo marginale di riproduzione;
- ii) disponibilità dei dati in forma utile e modificabile;
- iii) possibilità di riutilizzo senza restrizioni di licenza d'uso nemmeno per scopi commerciali.

Dietro questi principi si nascondono problematiche tecniche che devono essere valutate da chi mette a disposizione i dati. In particolare il formato con il quale viene messo a disposizione un dataset è molto importante per consentirne il riuso. Sono stati definiti anche dei metodi per classificare il grado di apertura di un certo dataset e/o orientare il modo con cui si intende contribuire al mercato degli OpenData. Si evidenzia ad esempio il metodo delle 5 stelle di Tim Berners-Lee, l'ideatore del web (<https://5stardata.info/en/>) oppure le 10 linee guida di Transparency International (<http://transparency.ge/en/ten-open-data-guidelines>). Tuttavia il settore dei dati geografici e territoriali, uno dei più interessanti per il riuso dei dati, è talmente ampio e complesso che l'importante diventa mettere a disposizione il dato in qualsiasi formato per poi demandare all'utilizzatore di scegliere il

Fig. 9 - Screenshot del dataset pubblicato sul portale OpenData del Trentino, visitabile al link: <https://dati.trentino.it/dataset/copertura-nevosa-derivata-da-immagini-multi-spettrali-telerilevate>



più comodo tra i numerosi software di conversione presenti sul web.

I dati prodotti dal progetto CRIOPAT potranno certamente trovare utilità anche fuori dal contesto in cui opera l'Ufficio Previsioni e Pianificazione. Oggigiorno infatti molti studi scientifici hanno la necessità di mettere in relazione i propri dataset con altri dataset per cercare di trovare relazioni più profonde nei dati e poter interpretare meglio fenomeni complessi. Le elaborazioni svolte per il progetto CRIOPAT permettono quindi di estrarre da archivi complessi, come sono i dati grezzi prodotti dai satelliti, dei dati più semplici da interpretare. In un certo senso il sistema informatico CRIOPAT può essere considerato come un infomedario per chi vuole avere a che fare con dati di innevamento dedotti da satellite. Si è ritenuto quindi opportuno mettere a disposizione i prodotti del progetto CRIOPAT sul portale Open Data del Trentino (<http://dati.trentino.it>) realizzato dalla Provincia Autonoma di Trento utilizzando lo standard Ckan (<https://ckan.org/>) che permette di condividere con i portali di ricerca Open Data di altre amministrazioni i propri cataloghi; in linea con la filosofia Open Access adottata dall'Università di Trento nella Dichiarazione di Messina del 2004 e i principi di gestione FAIR (Findable, Accessible, Interoperable e Reusable) dei dati della scienza (<https://r.unitn.it/>

ateneo/open-access/la-gestione-fair-dei-dati-della-ricerca).

LA PUBBLICAZIONE DI CRIOPAT SUL PORTALE OPEN DATA TRENTO

La decisione su come mettere a disposizione i dati di CRIOPAT è scaturita in parte dalla modalità con cui sono stati trattati i dati originali cercando di utilizzare un formato di pubblico dominio ma anche facilmente fruibile da numerosi tool di elaborazione. È stato privilegiato quindi l'utilizzo del formato GeoTiff (<https://it.wikipedia.org/wiki/GeoTIFF>) per le mappe ed il formato CSV per i dati tabellari.

Sul portale Open Data del Trentino, viene quindi pubblicato il dataset "Copertura nevosa derivata da immagini multi spettrali telerilevate" (Figura 9) composto dalle seguenti risorse:

- Mappe di copertura nevosa/nuvolosa in formato GeoTIFF: sono il risultato del classificatore applicato ai dati satellitari rilevati nel giorno in analisi. Ogni pixel della mappa può assumere 6 valori differenti, rispettivamente: 0 aree mascherate (ad esempio corpi d'acqua); 1,2 neve; 3,4 terreno non innevato; 5 copertura nuvolosa.
- Mappe di copertura nevosa stimata in formato GeoTIFF: rappresentano la situazione di copertura nevosa ipo-

tizzata dal sistema sfruttando le informazioni del dato giornaliero dove le aree non osservabili a causa della copertura nevosa vengono stimate grazie alle mappe generate nei giorni precedenti. Ogni pixel della mappa può assumere 5 valori differenti, rispettivamente: 0 aree mascherate (ad esempio corpi d'acqua); 1,2 neve; 3,4 terreno non innevato.

- serie temporale dei parametri statistici estratti, in formato .csv e suddivisa per anno idrologico (1 ottobre - 30 settembre). Nel dettaglio vengono riportati i seguenti parametri calcolati sull'intera area della Provincia Autonoma di Trento:

Copertura Nevosa Stimata [percentuale]
Copertura Nuvolosa [percentuale]
Limite altitudinale di presenza neve [m s.l.m.]

CONCLUSIONI

Il progetto CRIOPAT, grazie al suo classificatore appositamente ottimizzato, permette di avere giornalmente mappe neve molto accurate che permettono analisi su scala regionale che non sarebbero possibili con prodotti simili a valenza globale. Fino a quando i satelliti dell'ESA e della NASA continueranno

Note a margine

[Nota 1] Portale Copernicus Open Access Hub <https://scihub.copernicus.eu/>

[Nota 2] Condizioni d'uso dei dati MODIS (https://modaps.modaps.eosdis.nasa.gov/services/faq/LAADS_Data-Use_Citation_Policies.pdf) e Sentinel (https://scihub.copernicus.eu/twiki/pub/SciHubWebPortal/TermsConditions/TC_Sentinel_Data_31072014.pdf)

a trasmettere le immagini della Terra sarà garantita la continuità della serie storica e potremo rilevare tempestivamente eventuali cambiamenti delle grandezze osservate evidenziandoli a chi di competenza. Questo è sicuramente il grande valore del sistema realizzato. CRIOPAT 2.0 ha permesso di allungare le aspettative di vita del sistema e potenziare gli strumenti di analisi, utili per rilevare eventuali anomalie climatiche ma anche eventuali errori del sistema.

Gli errori sono attribuibili soprattutto alla copertura nuvolosa e alla qualità dell'immagine satellitare che con Sentinel 3 è sicuramente migliorata. Gli sviluppi futuri saranno quindi legati a sfruttare le potenzialità del sensore radar montato su Sentinel 1 e le immagini ad alta risoluzione di Sentinel 2. Sebbene le rilevazioni sul nostro territorio di questi satelliti siano disponibili solo ogni tre/cinque giorni, il sensore radar permette di rilevare attraverso lo strato

nuvoloso le condizioni di umidità della neve o del terreno con risoluzioni di 20 metri per pixel mentre le immagini con risoluzione fino a 10 metri per pixel di Sentinel 2 permettono il riconoscimento più accurato della copertura nevosa del suolo e di conseguenza la correzione di false attribuzioni dell'algoritmo implementato in CRIOPAT. Lo sfruttamento di altre fonti di informazioni e l'allargamento dell'area di indagine sono quindi le frontiere di sviluppo del progetto.

Bibliografia

- [1] Bruzzone L., Marin C., Santoni M., Bovolo F., Trenti A., Beozzo W. (2014). Mappe neve del Trentino con CRIOPAT. AINEVA - Neve e Valanghe, 83, 4-11. https://www.aineva.it/wp-content/uploads/Pubblicazioni/Rivista83/nv83_1.pdf
- [2] Melgani F., Bruzzone L. (2004) "Classification of hyperspectral remote sensing images with support vector machines", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. Vol. 42, N.8 DOI: <https://doi.org/10.1109/TGRS.2004.831865>
- [3] Yan-Shi Dong and Ke-Song Han (2005) "Boosting SVM classifiers by ensemble", 14th international conference on World Wide Web (WWW '05). Association for Computing Machinery, New York, NY, USA, 1072-1073. DOI: <https://doi.org/10.1145/1062745.1062874>
- [4] M. Pal (2008) "Ensemble of support vector machines for land cover classification", International Journal of Remote Sensing, 29:10, 3043-3049, DOI: <https://doi.org/10.1080/01431160802007624>
- [5] Barbiero R. (2002) "La siccità dell'autunno e inverno 2001-2002" - Meteotrentino Sezione del sito: Pubblicazioni - Meteorologia - Storico eventi meteo significativi https://content.meteotrentino.it/clima/pdf/Pdf_Eventi/evento-gen02.pdf
- [6] Saibanti S., Barbiero R. (2006) "Il caldo dell'autunno 2006" - Meteotrentino Sezione del sito: Pubblicazioni - Meteorologia - Storico eventi meteo significativi https://content.meteotrentino.it/clima/pdf/Pdf_Eventi/eventoC-nov06.pdf
- [7] Saibanti S., Barbiero R. (2006) "Il caldo record del periodo settembre - dicembre 2006" - Meteotrentino sezione del sito: Pubblicazioni - Meteorologia - Storico eventi meteo significativi https://content.meteotrentino.it/clima/pdf/Pdf_Eventi/evento-dic06.pdf
- [8] Meteotrentino AA. VV. (gennaio 2016) "Caldo e secco nell'ultimo bimestre del 2015" - Meteotrentino sezione del sito: Pubblicazioni - Meteorologia - Storico eventi meteo significativi https://content.meteotrentino.it/clima/pdf/reports/Analisi_meteo_nov_dic_2015.pdf
- [9] Meteotrentino AA. VV. (febbraio 2017) "Analisi della siccità meteorologica invernale 2016-2017" - Meteotrentino sezione del sito: Pubblicazioni - Meteorologia - Storico eventi meteo significativi <https://content.meteotrentino.it/analisiMM/Siccita.pdf>
- [10] Beozzo W. (2017) "Nevicate ottobre 2016 - maggio 2017 (Rapporto 2016-2017)" - Meteotrentino sezione del sito: Neve e ghiacci - Pubblicazioni nivologia - Quaderni di nivologia https://content.meteotrentino.it/neve-ghiacci/neve/quaderni/Rapporto_2016-2017.pdf
- [11] M. Pendesini, Barbiero R. (2007) "Il foehn e le elevate temperature del 12 e del 19 gennaio 2007 - (Gli episodi di foehn del gennaio 2007)" - Meteotrentino sezione del sito: Pubblicazioni - Meteorologia - Storico eventi meteo significativi https://content.meteotrentino.it/clima/pdf/Pdf_Eventi/evento-gen07.pdf
- [12] Trenti A., Beozzo W. (2016) "Andamento delle nevicite nell'autunno-inverno 2015-'16 - (Rapporto 2015-2016)" - Meteotrentino sezione del sito: Neve e ghiacci - Pubblicazioni nivologia - Quaderni di nivologia https://content.meteotrentino.it/neve-ghiacci/neve/quaderni/Stagione_nevosa_2015-2016.pdf
- [13] Piazza A., Beozzo W. (2019) "Novembre 2019: nevicite abbondanti - (Nevicate abbondanti di novembre 2019)" - Meteotrentino sezione del sito: Pubblicazioni - Meteorologia - Storico eventi meteo significativi https://content.meteotrentino.it/analisiMM/neve_novembre_2019_Rev3.pdf
- [14] Barbiero R. (2005) "Nevicate a bassa quota nel mese di novembre 2005" - Meteotrentino Sezione del sito: Pubblicazioni - Meteorologia - Storico eventi meteo significativi https://content.meteotrentino.it/clima/pdf/Pdf_Eventi/evento-nov05.pdf
- [15] Trenti A. (2017) "Nevicate a Trento" - Meteotrentino Sezione del sito: Pubblicazioni - Nevicite a Trento <https://www.meteotrentino.it/#!/content?menultemDesktop=155> <https://www.meteotrentino.it/#!/content?menultemDesktop=156>