

Il monitoraggio della copertura nevosa da dati satellitari per lo studio delle risorse idriche sotterranee

Andrea Maria Lingua, Francesca Noardo, Bartolomeo Vigna

Politecnico di Torino, DIATI, c.so Duca degli Abruzzi, 24 – 10129 Torino.
email: andrea.lingua@polito.it, francesca.noardo@polito.it, bartolomeo.vigna@polito.it

Riassunto

Il progetto europeo ALCOTRA – ALIRHyS, in collaborazione tra Politecnico di Torino, Politech Nice Sophia, Regione Piemonte, Métropole Nice Côte d'Azur, ha come obiettivo lo studio delle risorse idriche sotterranee nel territorio transfrontaliero (Italia - Francia) compreso tra la provincia di Cuneo e l'area di Nizza. Tra le numerose attività di rilevamento, analisi, gestione e armonizzazione dati previste nell'ambito del progetto, è stata messa a punto una procedura per il monitoraggio della copertura nevosa nell'area di studio al fine di determinarne la variazione di volume della neve negli anni dal 2007 al 2013 in funzione delle numerose variabili che ne influenzano la distribuzione: la copertura nevosa estratta dalle immagini satellitari (Landsat e/o MODIS), i dati di altezza neve rilevati dai pluviogrammi e dalle stazioni meteo, le caratteristiche geometriche (quota, pendenza, esposizione) e fisiche (irradiazione solare) del territorio determinate a partire da un modello altimetrico. Lo studio è stato condotto nel mese di aprile per ogni anno determinando il volume approssimato di neve totale ancora presente. La variazione negli anni di questi volumi è stata confrontata con le portate annuali delle sorgenti monitorate valutandone l'influenza che può avere nella gestione delle risorse idriche sotterranee.

Abstract

The European project ALCOTRA – ALIRHyS, collaboration between Politecnico di Torino, Politech Nice Sophia, Regione Piemonte, Métropole Nice Côte d'Azur, has as objective the study of subterranean hydric resources in the cross-border territory (Italy-France) between Cuneo and Nice areas. Among the various activities of surveying, analysis, data harmonization and management included in the project, a procedure for the monitoring of the snow cover in the studied area has been developed in order to determine how the snow volume in the years between 2007 and 2013 has changed as a function of the various variables which influence its distribution: the snow cover extracted from satellite imagery (Landsat – MODIS), snow height data from pluviogramms and from meteo stations, geometric (height, slope, aspect) and physical (solar irradiation) of the territory determined from the altimetric model. The study has been realized in the month of april of each year, determining the approximate total snow volume still present. The variation in the years of these volumes has been compared with the year flow rate of the monitored springs, evaluating the influence that this could have in the subterranean hydric resources management.

Introduzione

Le sorgenti in territori transfrontalieri, in particolare in corrispondenza di aree montuose si originano da un substrato idro-geologico comune, influenzato da agenti interni ed esterni che è opportuno studiare complessivamente. Questo è l'obiettivo del progetto ALCOTRA – ALIRHYS (2013 - 2015) in cui collaborano diversi enti territoriali ed accademici (Politecnico di Torino, Politech Nice Sophia, Regione Piemonte, Métropole Nice Côte d'Azur). Le nuove necessità di conoscenza e monitoraggio delle risorse idriche sotterranee, dovute ai cambiamenti climatici

sopravvenuti negli ultimi anni, richiedono un approfondimento della conoscenza relativa ai fattori che influenzano i parametri delle sorgenti e la gestione delle risorse idriche (Pasini et al., 2012).

La fusione nivale è uno dei fattori che maggiormente influenza le portate sorgive, e si rende perciò opportuno determinare il volume della neve negli anni per poterlo confrontare con le portate rilevate presso le sorgenti ed elaborare le conseguenti valutazioni (Vigna et al., 2014).

In questo lavoro viene stimato il volume della neve nell'area in esame combinando i fattori caratteristici del territorio che influenzano il deposito della neve (quota, latitudine, esposizione, etc.) (Elder et al., 1991) con l'interpolazione di alcuni valori puntuali, rilevati dalle stazioni meteorologiche presenti sul territorio. Per l'esecuzione dell'analisi è stato scelto il mese di aprile, che meglio rappresenta le differenze dei volumi dell'ammasso nevoso nei diversi anni presi in esame.

Lo studio è stato svolto in due fasi: la determinazione delle aree corrispondenti alla copertura nevosa mediante una apposita procedura basata su immagini satellitari (Landsat e MODIS) e la definizione dell'altezza della neve ottenuta a partire dai dati delle stazioni pluviometriche mediante una procedura di interpolazione basata su considerazione geometriche e fisiche della superficie del territorio.

Determinazione dell'area innevata utilizzando dati satellitari

La superficie relativa alla copertura nevosa è stata ottenuta dall'elaborazione di immagini satellitari che, come ben noto, offrono diversi vantaggi quali la copertura di tutta l'area di studio, la possibilità di svolgere analisi multi-temporali (con immagini giornaliere di MODIS o quindicinali di Landsat) e multi-spettrali per una miglior caratterizzazione radiometrica della superficie nevosa e l'eliminazione di gran parte della copertura nuvolosa, la disponibilità di immagini storiche che permettono di effettuare studi anche negli anni passati, scaricabili gratuitamente da sito internet, la possibilità di realizzare una classificazione automatica della copertura nevosa permettendo di proporre una metodologia facilmente ed economicamente applicabile.

I satelliti disponibili, utilizzati dalle discipline di telerilevamento per l'estrazione di dati metrici e tematici, a scale diverse e con scopi variegati, sono molteplici. Per il progetto ALIRHYS si sono utilizzati, in un primo tempo, i dati del satellite Landsat (http://landsat.gsfc.nasa.gov/?page_id=2) integrati in seguito dai dati MODIS, a causa dell'incompletezza o dell'illeggibilità di alcune delle immagini (<http://modis.gsfc.nasa.gov/>). (Disabato, 2010).

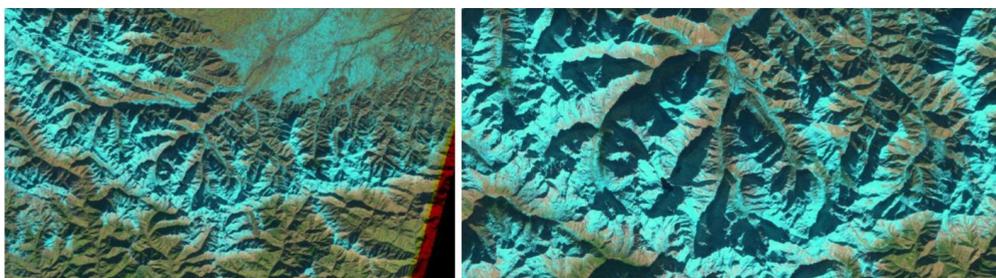


Figura 1 - Immagine Landsat 7 nel visibile del 30.11.1999 con un ingrandimento sulle Alpi.

Un esempio di immagini acquisite dai satelliti del programma Landsat (NASA) sono visibili in Figura 1. I prodotti Landsat, disponibili gratuitamente e scaricabili dal sito <http://earthexplorer.usgs.gov/> sono di Livello 1 (L1T - Level 1 Terrain Corrected), che prevede correzioni geometriche per il raggiungimento di un'accuratezza radiometrica sistematica, una migliore accuratezza geometrica attraverso l'utilizzo di GCP (Ground Control Points), e l'utilizzo di DEM (Digital Elevation Model), in questo caso GLS2000 (<http://glcf.umd.edu/data/glsdem/>), per la precisione cartografica a piccola scala.

Nel periodo e nell'area considerati non sono sempre disponibili dati Landsat temporalmente e geometricamente continui (http://landsat.usgs.gov/documents/StateOfTheArchive_web.pdf pp. 70-96), a causa di svariati problemi che possono rendere inutilizzabili le immagini esistenti (Figura 2).

2000, 2003	L7
2005	L5
2013, 2014	L8
2001-2002, 2004 e 2006 - 2012	Dati non disponibili / non utilizzabili

Figura 2 – Dati Landsat utilizzati per il monitoraggio nei diversi anni.

Le tre fonti principali (L5, L7, L8) hanno caratteristiche diverse (risoluzione, tipo di sensore, etc.) (http://igett.delmar.edu/Resources/Remote%20Sensing%20Technology%20Training/Landsat_bands-sm.pdf; <http://landsat.usgs.gov/documents/LDCM-DFCB-004.pdf>), ma sono utilizzate secondo la medesima procedura, grazie all'implementazione di appositi algoritmi nei software di calibrazione dedicati.

Con i dati Landsat, la mappatura della copertura nevosa è stata ottenuta combinando opportunamente i valori di riflettanza ricavabili dalle diverse bande per selezionare automaticamente i pixel dell'immagine corrispondenti ai temi prescelti.

In primo luogo sono perciò stati ottenuti i valori di riflettanza dalle diverse bande (RB1, RB2, ...) in formato raster geotiff, nel corretto sistema di riferimento (UTM ETRF2000), attraverso la calibrazione automatica di ognuna con il software ENVI, nel quale sono già implementati i parametri di calibrazione Landsat per ogni banda e in funzione del sensore utilizzato, specificando il periodo di acquisizione dell'immagine e l'elevazione del sole corrispondente (metadati forniti insieme all'immagine).

I criteri utilizzati nella mappatura sono descritti in (Dozier, 1989) e partono dalle considerazioni che la neve appare più luminosa nelle bande 1 e 2 e nonostante la saturazione della banda 1 sia eccessiva per molte superfici, questa può essere utilizzata per distinguere la neve nelle aree in ombra; inoltre le nuvole sono più chiare della neve nella banda 5. Perciò le condizioni che devono sussistere affinché la presenza di neve sia verificata e possa essere estratta sono:

- 1) RB1 deve essere maggiore di una soglia individuata tra 0,15 e 0,2 la quale distingue la neve dalle altre superfici nelle zone in ombra;
- 2) RB5 deve essere minore di 0,2-0,25 al fine di distinguere la neve dalle nuvole;
- 3) il valore dell'indice normalizzato di copertura nevosa NDSI (*Normalized Difference Snow Index*), calcolato con la formula [1] dove SWIR sta per "Shortwave Infrared-1" deve essere maggiore di 0,4.

$$\frac{RB_{green} - RB(SWIR - 1)}{RB_{green} + RB(SWIR - 1)} \quad [1]$$

- 4) il valore di RB6 calibrata, rappresentante la temperatura in Kelvin deve essere inferiore a 283°K, temperatura alla quale è possibile la presenza di neve;
- 5) RB4, rappresentante i valori NIR (Near InfraRed) deve essere maggiore di 0,11.

Queste condizioni sono state implementate con il *Model Builder* in un apposito strumento all'interno di *ArcToolBox* di *ESRI ArcGIS* permettendo di selezionare per i vari anni i pixel corrispondenti ad aree innevate. La figura 3 mostra un esempio di maschere ottenute per l'anno 2005 in cui il giallo (1) corrisponde alla neve in figura 3b.

Per integrare i dati mancanti nelle immagini Landsat, sono state utilizzate le immagini MODIS (*MODerate resolution Imaging Spectroradiometer*), acquisite dai satelliti Terra (EOS AM) e Aqua (EOS PM), che orbitano intorno alla terra con frequenza approssimativamente giornaliera, fornendo dati continuativi della superficie terrestre in 36 bande spettrali.

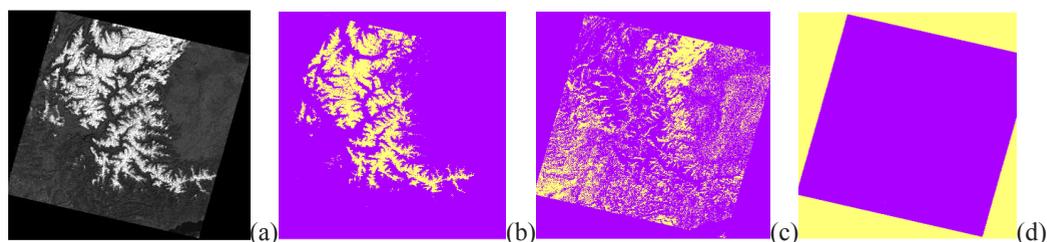


Figura 3 - Immagine pancromatica (a), mappature della neve (b), delle nuvole (c) e senza dato (d).

A partire da questi dati primari (dati di radianza/riflettanza, MOD02 - *MODIS Level 1B Calibrated, Geolocated Radiances*), la NASA (MODAPS - *MODIS Data Processing System*) produce cinque differenti prodotti di copertura nevosa (MOD10 - *MODIS Snow Cover*) e li distribuisce attraverso i siti web dedicati. Il riconoscimento delle aree innevate è basato su una serie di test spettrali compiuti sui valori di radianza/riflettanza contenuti nel prodotto primario (Figura 4).

Banda	Range[μm]	Risoluzione[m]
1	0,620 – 0,670	250
2	0,841 – 0,876	250
3	0,459 -0,479	500
4	0,545 – 0,565	500
5	1,230 – 1,250	500
6	1,628 – 1,652	500
7	2,105 – 2,155	500

➔

Indice di neve normalizzato (NSDI)

$$\frac{b4 - b6}{b4 + b6} > 0.4$$

+

$$b2 > 0.11$$

+

$$b4 > 0.10$$

➔

NEVE

Figura 4 – Le bande spettrali di MODIS e l'indice di neve normalizzato.

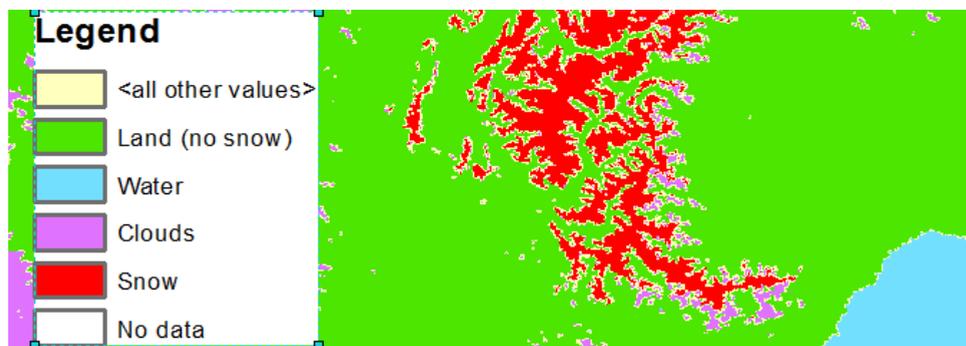


Figura 5 – Un esempio del dato snow cover derivato da MODIS (MOD10A1 - 2000)

Per questa analisi si utilizzano direttamente i prodotti TERRA/AQUA MODIS *Snow Cover* (http://nsidc.org/data/modis/data_summaries/index.html), in particolare denominati MOD10A1 (satellite Terra) e MYD10A1 (satellite Aqua) che forniscono direttamente la mappatura (Figura 5) necessaria al monitoraggio di ALIRHyS in maniera continuativa e su tutta l'area di studio, nonostante la risoluzione dei dati (500m) sia nettamente inferiore rispetto a quella dei dati Landsat (30m).

I dati sono direttamente utilizzabili, ma essendo organizzati in *tiles* con proiezione sinusoidale, devono essere prima riproiettati nel corretto sistema di riferimento, utilizzando l'apposita applicazione MODIS Reprojection Tool, (https://lpdaac.usgs.gov/tools/modis_reprojection_tool) che permette di trasformare agevolmente i dati rendendoli utili per le necessarie analisi.

Una volta ottenuti i dati relativi agli anni analizzati, è stata svolta una comparazione tra le due diverse mappature (Landsat – MODIS) per verificare quali siano le differenze e se sia possibile usare due risoluzioni così diverse (30m – 500m) per un’analisi omogenea (Boccardo et al., 2007). Dal dato MODIS viene isolata la mappatura della neve ottenendo un dato comparabile a quello estratto dai dati Landsat (Figura 6). Sui due tipi di dato viene realizzata la mappatura delle differenze e il computo delle relative percentuali (Figura 7):

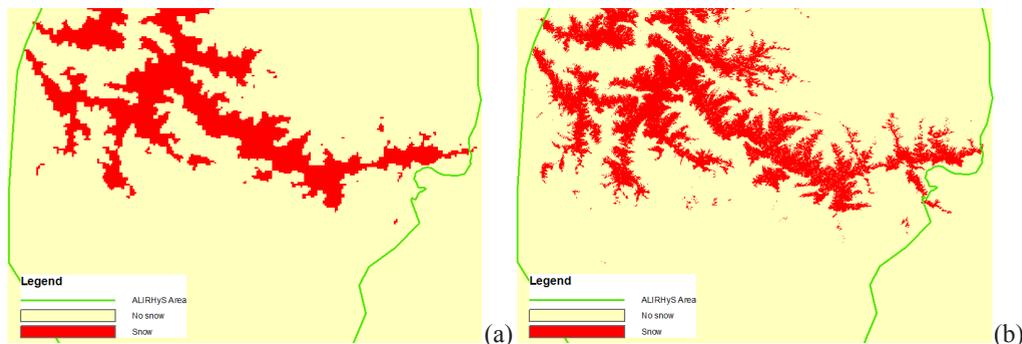


Figura 6 - Mappatura della copertura nevosa da dati MODIS (a) e Landsat (b). Anno 2000.

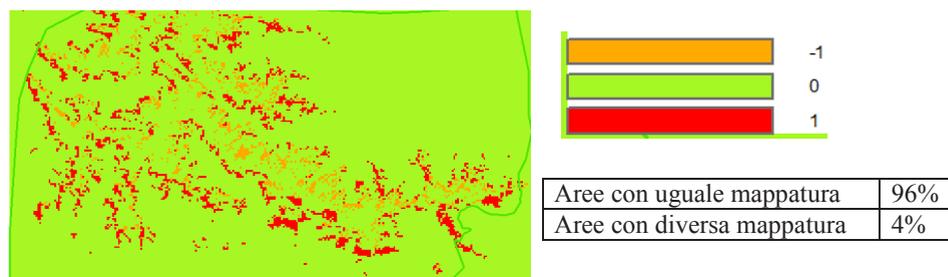


Figura 7 - Mappa delle differenze tra la mappatura della copertura nevosa MODIS e quella realizzata sui dati Landsat (anno 2000). In verde i dati comuni.

Analizzando anche le mappature di altri anni, si nota come i valori percentuali siano simili (es. anno 2005: 92,5% uguale mappatura, 7,5% diversa mappatura). Si può affermare che la differenza tra la mappatura della copertura nevosa è in tutti i casi inferiore al 10%, a questa scala si possono perciò considerare comparabili. Come è ovvio, quando disponibile, si predilige comunque il dato a maggiore risoluzione (Landsat).

Stima delle altezze della neve e calcolo del volume

Il deposito della neve sul terreno e la capacità di permanere nel tempo sono influenzati da numerosi fattori legati alle caratteristiche della superficie considerata, tra cui: quota, latitudine, esposizione, pendenza, presenza di vegetazione, ombre.

I dati di altezza neve a disposizione sono rilevati puntualmente (Figura 8) in corrispondenza delle stazioni meteorologiche dell’ARPA Piemonte e di alcune stazioni sciistiche (www.skiinfo.it) che permettono di infittire i punti disponibili per l’interpolazione e di conoscere i dati del versante francese, altrimenti non noti. Queste ultime informazioni partono dall’anno 2007, e quindi il periodo esaminato è stato limitato all’intervallo degli anni 2007 – 2013.

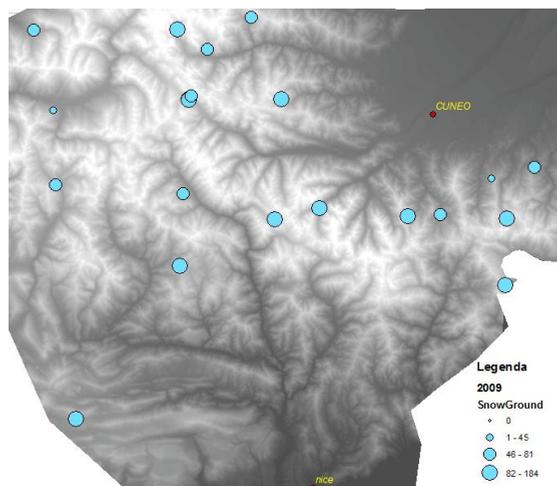


Figura 8 - Rilievi puntuali altezza neve.

Le caratteristiche del terreno sono invece ricavabili in ogni punto (per una scala 1:25.000) a partire dal DTM (Digital Terrain Model) armonizzato ai fini dello stesso progetto ALIRHyS (Noardo et al., 2014), determinandone quota, l'esposizione e la pendenza (Figura 9a-b-c). L'eventuale presenza di vegetazione, non è stata tenuta in considerazione mediante l'indice di vegetazione NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) per uniformità di analisi visto che il dato Landsat non era disponibile per la gran parte del periodo temporale considerato.

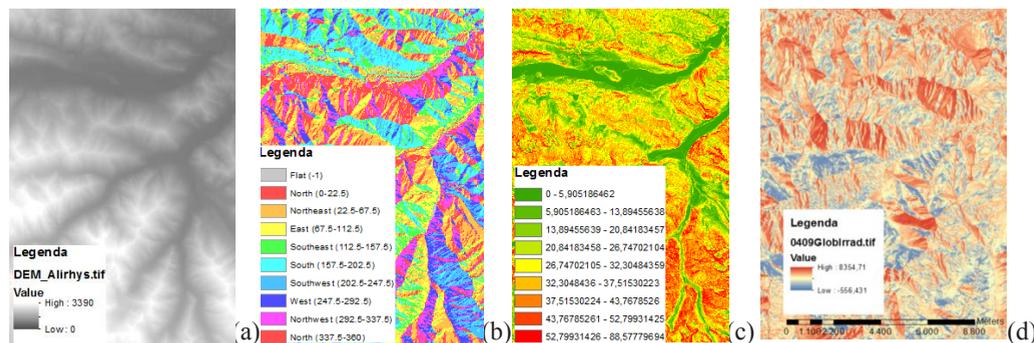


Figura 9 - DTM (a), esposizione (b), pendenza del terreno (c) e irradiazione globale (d) in una porzione dell'area di studio.

Una volta noti questi dati, è stato possibile calcolare l'irradiazione al suolo (Figura 9d) con una funzione disponibile nel software *open source* QGIS, che tiene conto anche della latitudine e dell'ombra dovuta al rilievo. Il calcolo è stato ipotizzato al 15 di aprile e in assenza di ostruzioni. L'altezza della neve h su tutto il territorio considerato nei diversi anni è stata determinata ipotizzando che il suo valore dipendesse in modo lineare dai vari parametri considerati (quota q , pendenza p , irradiazione globale i) mediante una regressione lineare di cui sono stati determinati i coefficienti incogniti. Per ragioni numeriche i dati di altezza neve, pendenza, quota, irradiazione per ogni anno e in ogni punto di rilievo sono stati normalizzati (sottraendo il valore minimo e dividendo per il valore massimo) e sono stati calcolati i coefficienti attraverso una stima ai minimi quadrati in ambiente MATLAB.

I risultati raggiungono uno scarto massimo dai dati di partenza di 105 cm nel 2009 e RMS (*root mean squares*) negli anni di 66 cm, ottenendo pertanto risultati accettabili, data la scala della

cartografia di base (dimensione pixel 25 m), la scarsità dei dati di rilievo utilizzati, oltre alla minor precisione dei dati derivati dalle stazioni sciistiche (gli unici disponibili per il versante francese) rispetto a quelli rilevati dalle stazioni meteo italiane. I valori ottenuti sono stati utilizzati per il calcolo dell'altezza neve in ogni punto dell'area di studio per ogni anno, normalizzando di volta in volta i dati di input e denormalizzando poi il dato finale (Figura 10).

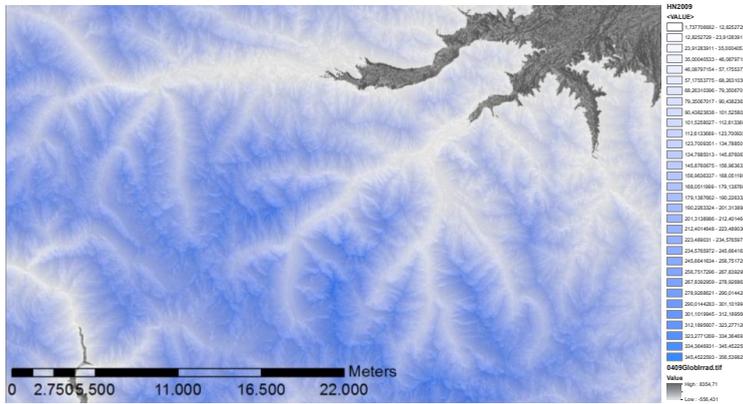


Figura 10 - Esempio di mappa dell'altezza della neve nel 2009.

I raster così ottenuti sono stati ritagliati con la maschera di copertura nevosa derivata dai dati satellitari. Inoltre, dal momento che la neve non si accumula sulle aree con pendenza maggiore di 55-60%, per l'effetto della gravità e delle slavine (Blöschl, Kirnbauer, Gutknecht, 1991), è stata costruita una maschera su queste zone, in corrispondenza delle quali il valore della neve è stato imposto nullo.

Infine, i dati di altezza neve di ogni pixel sono stati moltiplicati per la superficie del pixel stesso ottenendo il volume di neve per ogni cella di analisi che sommato su tutta la zona ha permesso di determinare il volume totale della neve non permanente presente ogni anno nel mese di aprile. I valori del volume calcolati sono poi stati posti in relazione con le portate delle sorgenti delle Fuse e di Bossea, ubicate nell'area in esame (Figura 11). I dati presi in esame sono relativi al valore della portata massima sorgiva legata al processo di fusione nivale, che si verifica nel periodo primaverile, generalmente nel mese di maggio.

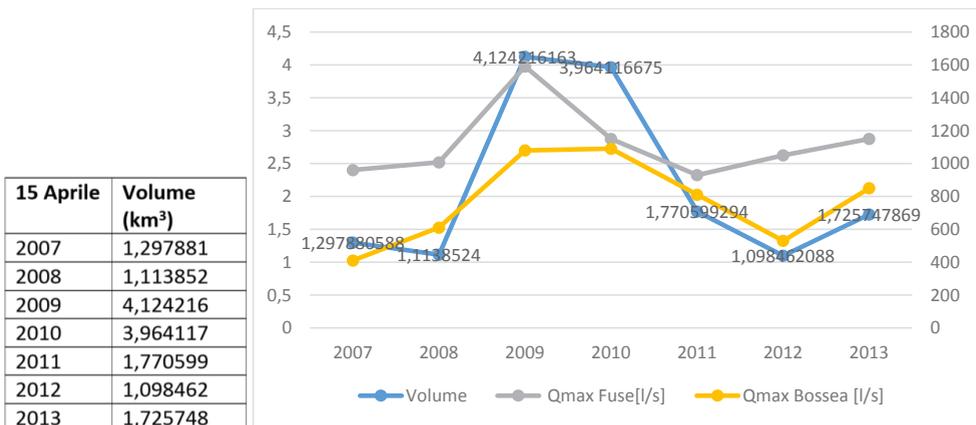


Figura 11 – Valori della portata massima sorgiva e del volume di neve negli anni 2007-2013.

La piena sorgiva legata al processo di fusione nivale ha una durata piuttosto lunga compresa in genere tra i mesi di marzo e giugno ed è in parte influenzata anche dalle precipitazioni piovose che si verificano nello stesso periodo. In ogni caso il valore massimo annuale è generalmente legato alla quantità di neve presente nell'area di alimentazione di ogni sorgente. In figura 11 si osservano le strette relazioni presenti tra il volume di neve stimato accumulato al suolo a metà aprile (linea blu) e la portata massima sorgiva (linee arancioni e grigie) legata alla fusione nivale. In particolare si può notare che in seguito ad inverni piuttosto asciutti, come quelli del 2007, del 2008 e del 2012 le portate sorgive siano piuttosto ridotte mentre negli anni 2009 e 2010 gli abbondanti apporti nevosi accumulati al suolo forniscano, in seguito al processo di fusione, notevoli volumi idrici ai circuiti sotterranei.

Conclusioni

Con questo metodo è stato possibile stimare in prima approssimazione il volume di neve presente nella zona di studio in modo dinamico, analizzando anche i dati storici di anni diversi, nonostante i riferimenti disponibili fossero molto scarsi e la scala a cui si è lavorato non offrisse un alto livello di dettaglio. La comparazione tra i dati del volume della neve accumulato al suolo e quelli relativi alle portate delle due sorgenti prese come esempio, mette in luce la stretta relazione tra la il parametri misurati (portate sorgive) e i valori calcolati (neve accumulata al suolo). Tale relazione evidenzia quindi che il valore di neve calcolato, anche se in modo piuttosto approssimativo, sia un dato piuttosto attendibile e valido.

I dati provenienti da questi elaborazioni possono quindi essere utilizzati anche per prevedere la potenziale quantità d'acqua a disposizione per l'alimentazione delle sorgenti nel corso dell'anno ed ipotizzare situazioni di carenza idrica estiva, come quelle che hanno caratterizzato ad esempio l'anno 2012.

Ringraziamenti

La ricerca presentata in questo articolo fa parte del Progetto **ALIRHYS** (*Alpes Latines - Individuation Resources Hydriques Souterraines*) finanziato nell'ambito degli interventi europei ALCOTRA (*Alpes Latines - COopération TRAnsfrontalière*).

Riferimenti bibliografici

- Pasini S., Torresan S., Rizzi J., Zabeo A., Critto A., Marcomini A. (2012), "Climate change impact assessment in Veneto and Friuli Plain groundwater. Part II: A spatially resolved regional risk assessment", *Science of The Total Environment*, Volume 440, 219–235.
- Vigna B., Menegatti S., Bianco F., and Banzato C. (2014), "Relazioni tra le precipitazioni nevose e le piene di alcune sorgenti in rocce carbonatiche del Piemonte Meridionale", Flowpath 2014 – National Meeting on Hydrogeology.
- Dozier J. (1989), "Spectral Signature of Alpine Snow Cover from the Landsat Thematic Mapper", *Remote Sensing of Environment*, 28: 9-22.
- Disabato F. (2010), *Remote sensing data analysis for environmental and humanitarian purposes. The automation of information extraction from free satellite data*. Tesi di dottorato.
- Boccardo P; Borgogno Mondino E; Claps P; Perez F. (2007), "Image resolution effects for vegetation mapping from Landsat 7 ETM+ and Terra MODIS data". In: *Water resources assessment under water scarcity scenarios*. La Loggia G., Aronica G.T., Ciruolo G. - CDSU Publ, MILANO, pp. 69-94. ISBN 9788890028281.
- Blöschl G., Kirmbauer R., Gutknecht D. (1991), "Distributed Snowmelt Simulation in an Alpine Catchment - 1. Model Evaluation On The Basis Of Snow Cover Patterns", *Water Resources Research*, 27, 12: 3171-3179.
- Elder K., Dozier J., Michaelsen J. (1991), "Snow accumulation and distribution in an alpine watershed", *Water Resources Research*, 27, 7: 1541-1552.