

Analisi dei dati di monitoraggio delle sorgenti mediante un approccio in dominio di tempo e frequenza: il caso studio della sorgente Mascognaz (Valle d'Aosta)

Original

Analisi dei dati di monitoraggio delle sorgenti mediante un approccio in dominio di tempo e frequenza: il caso studio della sorgente Mascognaz (Valle d'Aosta) / Amanzio, G., Marchionatti, F., Lavy, M., Ghione, R., DE MAIO, M.. - In: GEAM. GEOINGEGNERIA AMBIENTALE E MINERARIA. - ISSN 1121-9041. - ELETTRONICO. - 147:Anno LIII(2016), pp. 5-12.

Availability:

This version is available at: 11583/2649611 since: 2018-02-05T10:42:56Z

Publisher:

Patron Editore

Published

DOI:

Terms of use:

This article is made available under terms and conditions as specified in the corresponding bibliographic description in the repository

Publisher copyright

(Article begins on next page)

Analisi dei dati di monitoraggio delle sorgenti mediante un approccio in dominio di tempo e frequenza: il caso studio della sorgente Mascognaz (Valle d'Aosta)

Gianpiero Amanzio*
 Federico Marchionatti*
 Muriel Lavy*
 Raffaella Ghione*
 Marina De Maio*

* Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente, del Territorio e delle Infrastrutture (DIATI), Politecnico di Torino

1. Introduzione

Gli acquiferi montani rappresentano una risorsa strategica per le popolazioni che vivono in queste zone. Infatti, la loro corretta gestione è fortemente condizionata da periodi di elevato stress idrico legati al comparto turistico. Quindi, al fine di ottimizzare il loro sfruttamento, è importante eseguire un'accurata caratterizzazione idrogeologica di questi sistemi. Solitamente, a causa della mancanza di risorse economiche, tali strutture idrogeologiche sono indagate con un livello di dettaglio molto basso, con una ridotta o totale assenza di indagini dirette come sondaggi geognostici, che consentirebbero di ricavare informazioni utili per la caratterizzazione idrogeologica del corpo acquifero. Generalmente si utilizzano metodi che, tramite lo studio dell'idrogramma sorgivo, o meglio del solo tratto di svuotamento, permettono di ricavare informazioni sui parametri idrogeologici e sulle modalità di risposta della sorgente in relazione agli input infiltrativi derivanti dagli agenti esterni.

Intento di questo lavoro è l'applicazione di tecniche di *time series analysis* basate sia sul dominio di tempo che di frequenza, al fine di acquisire informazioni idrogeologiche mediante lo studio dell'intero idrogramma sorgivo, non limitando, quindi, l'indagine all'analisi del solo tratto di svuotamento. L'utilizzo di tali tecniche infatti permette di discriminare le componenti di flusso proprie del sistema indagato e capire come esso si rapporti con gli agenti esterni, tale risultato non è raggiungibile con lo studio del solo tratto di svuotamento.

L'applicazione di tecniche di *time series analysis* sul caso studio della sorgente Mascognaz, ubicata nella parte N-E della Regione Autonoma Valle d'Aosta, ha permesso di ricavare informazioni su quale sia l'effetto degli agenti esterni sulla sorgente indagata, oltre che di discriminare i fenomeni di flusso che la caratterizzano, evidenziando la prevalenza di componenti di flusso di base-flow, proprie di un sistema assimilabile ad un mezzo poroso.

Parole chiave: sorgenti montane, *time series analysis*, mezzi porosi, Valle d'Aosta, monitoraggio sorgenti.

Springs monitoring data analysis with a frequency and time domain approach: the case study of Mascognaz spring (Aosta Valley). Aquifers in mountain areas are a strategic resource for people who live there. In fact, their proper management is strongly influenced by periods of high water stress, linked to tourism activity. In order to optimize future water management, it is fundamental to understand hydrogeological characteristics of these systems. Due to the lack of economic resources, these hydrogeological systems are investigated with a very low level of detail. In fact, usually, there are very few borehole permitting hydrogeological characterization of groundwater systems. In great part, therefore, studies on the functioning and hydrodynamics of aquifers have been based on analyzing the hydrograph behavior (depletion and/or recession) or on the complete hydrograph, corresponding to an identifiable rainfall event.

The aim of this paper is to apply *time series analysis* in time and frequency domain, in order to enable the study of the whole hydrographs of mountain springs and their relationship with the input function (precipitation essentially). This approach is opposed to many other methods that limit the analysis at the recession or another part of the hydrograph.

The application of these techniques to the case study of Mascognaz spring, located in the North-Western Alps in the Aosta Valley Region (Italy), helped to obtain useful information about the ef-

Storicamente, diversi autori (Maillet, 1905; Schoeller, 1965; Drogue, 1972; Mangin, 1977; Bonacci, 1987, 1993) hanno cercato di sopperire alla mancanza di indagini dirette mediante lo studio dell'idrodinamica dell'acquifero tramite l'analisi dell'idrogramma sorgivo. Nello specifico, tali metodi hanno analizzato una sola parte dell'idrogramma sorgivo, ossia il solo tratto di svuotamento, cercando di ricavare informazioni sui parametri idrogeologici (Civita et. al., 2007; Vigna, 2014).

Il presente lavoro mira ad utilizzare tecniche di *time series analysis* basate sia sul dominio di tempo, sia sul dominio di frequenza. Queste tecniche consentono di analizzare l'intero idrogramma sorgivo e pertanto di acquisire una maggior quantità di informazioni idrogeologiche rispetto ai metodi utilizzati dagli autori precedentemente nominati. Le tecniche di *time series analysis* sono state sviluppate principalmente da Jenkins e Watts (1968), Hannan (1970), Brillinger (1975) e Box and Jenkins (1976) e sono state applicate da diversi autori tra cui Delleur (1971), Spolia e Chander (1973), Mair e Fares (2011), Zhang et. al. (2013) e Lo Russo et al. (2015). Nello specifico l'applicazione di tecniche di *time series analysis* porta ad applicare funzioni univariate e bivariate, in cui le funzioni univariate caratterizzano individualmente la serie di dati,

fects of external phenomena on the spring's hydrograph. Moreover, the applications of time series analysis permits to establish the flow type, that characterizes the spring. In this case study, the prevalence of components of flow base-flow is highlighted and the underground system shows similar characteristics of a porous medium.

Keywords: mountain spring, time series analysis, porous media, Aosta Valley, spring monitoring.

Analyse des données dérivantes de la télésurveillance des sources à travers une méthode dans le domaine de temps et de fréquence : le cas étude de la source de Mascognaz (Vallée d'Aoste). Les aquifères dans les zones de montagne sont une ressource en eau stratégique pour les gens qui y vivent. Pour optimiser leur gestion dans le futur, il est essentiel de comprendre les systèmes hydrogéologiques d'un point de vue géologique et hydrogéologique. Dans ces aquifères, il y a souvent très peu de puits qui permettent l'observation hydrogéologique. Par conséquent, les études sur le fonctionnement et l'hydrodynamique des aquifères ont été basées sur l'analyse de l'hydrogramme (épaulement et / ou de récession) ou sur l'hydrogramme complet correspondant à un événement pluvieux.

Afin de compenser cette manque de données, un analyse du système caractérisant l'aquifère a été faite dans le temps et dans le domaine fréquentiel. Le but de cette étude est d'appliquer ces méthodes, généralement appliquées dans les systèmes karstiques, aux petites sources de montagne fournies par aquifères poreux et peu profonds.

Les applications de ces analyses permettent l'étude de l'ensemble des hydrogrammes des sources de montagne et leur relation avec la fonction d'entrée (précipitations, essentiellement), par opposition à des nombreuses autres méthodes qui utilisent uniquement la partie correspondante à la récession ou une autre partie de l'hydrogramme. La méthodologie proposée traite la série au niveau du temps et de la fréquence, et permet donc de différencier périodes courtes et longues de précipitations et le débit, ce qui est impossible par déconvolution ou la simple visualisation de l'hydrogramme unitaire, ou avec toute autre méthode qui ne font pas de discrimination la variation spectrale.

L'application de cette méthode à six sources de montagne, situé dans les Alpes du Nord-Ouest de l'Italie, dans la Région Vallée d'Aoste, a servi à tester la validité de ces outils dans les systèmes poreux et peu profonds. Cette analyse offre critères quantifiables et objectifs pour la différenciation et la comparaison des systèmes aquifères.

Mots-clés: sources de montagne, analyse des séries chronologiques, milieux poreux.

mentre le tecniche bivariate caratterizzano la trasformazione da funzioni di input (es. precipitazione) a funzioni di output (es. portata). Pertanto, tali tecniche possono fornire informazioni sul grado di organizzazione del flusso idrico sotterraneo, sulla dimensione del corpo acquifero e sul tempo di risposta del sistema ai diversi input infiltrativi.

2. Caso studio

2.1. Inquadramento geografico

La sorgente Mascognaz è ubicata in Valle d'Aosta, nel Comune di Ayas ad una quota di 1850 m s.l.m. (fig. 1), in una valle di origine post-glaciale tributaria della Val d'Ayas, drenata dal T. Mascognaz. Proprio nella Val d'Ayas scorre il Torrente Evançon, affluente di sinistra del Fiume Dora Baltea che percorre l'intera Valle d'Aosta. Il bacino idrografico che sottende la sorgente in esame ha un'area di circa 10 km² e la sua

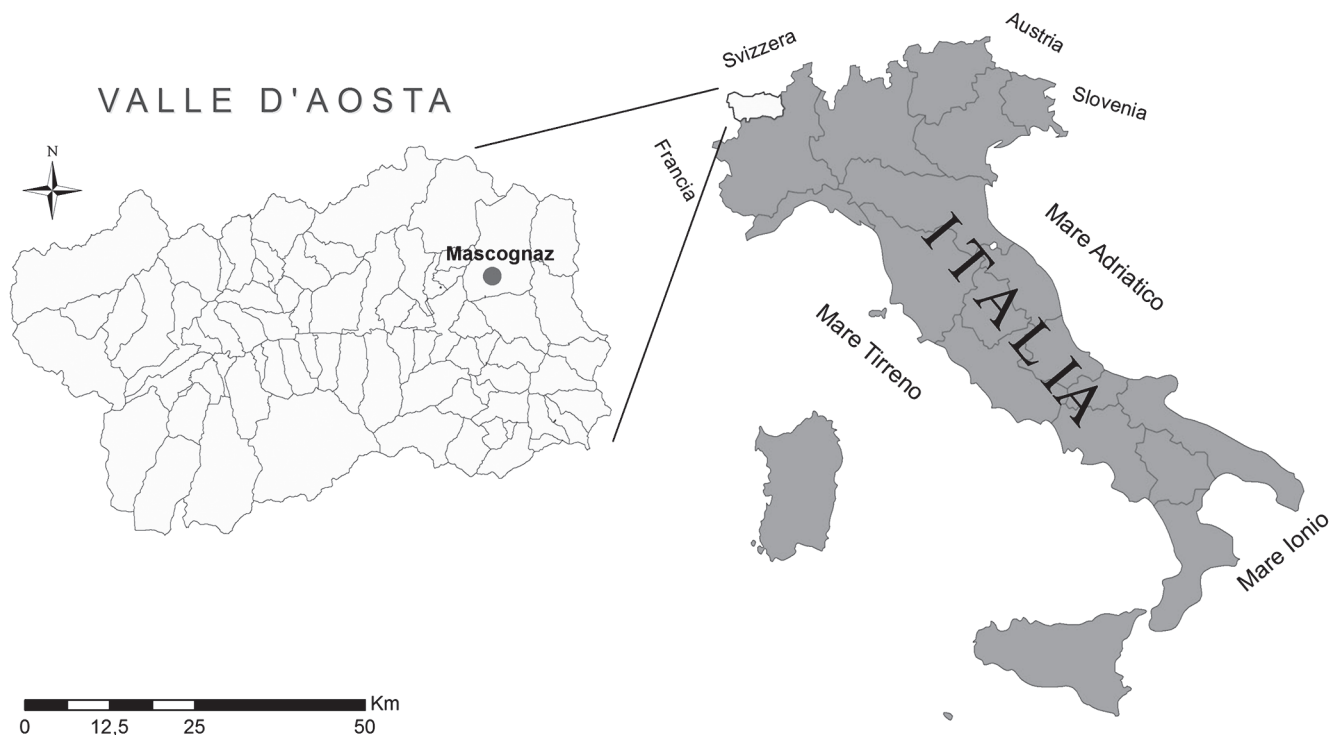


Fig. 1. Inquadramento geografico (Sorgente Mascognaz, Valle d'Aosta, NO Italia).
Geographic framework of the test sites (Mascognaz spring, Aosta Valley Region, NW Italy).

conformazione è quella tipica delle valli di origine glaciale, con fianchi ripidi, fondovalle largo e a moderata pendenza che viene bruscamente sbarrato da una marcata soglia alla sbocco nel solco vallivo principale.

2.2. Inquadramento geologico ed idrogeologico

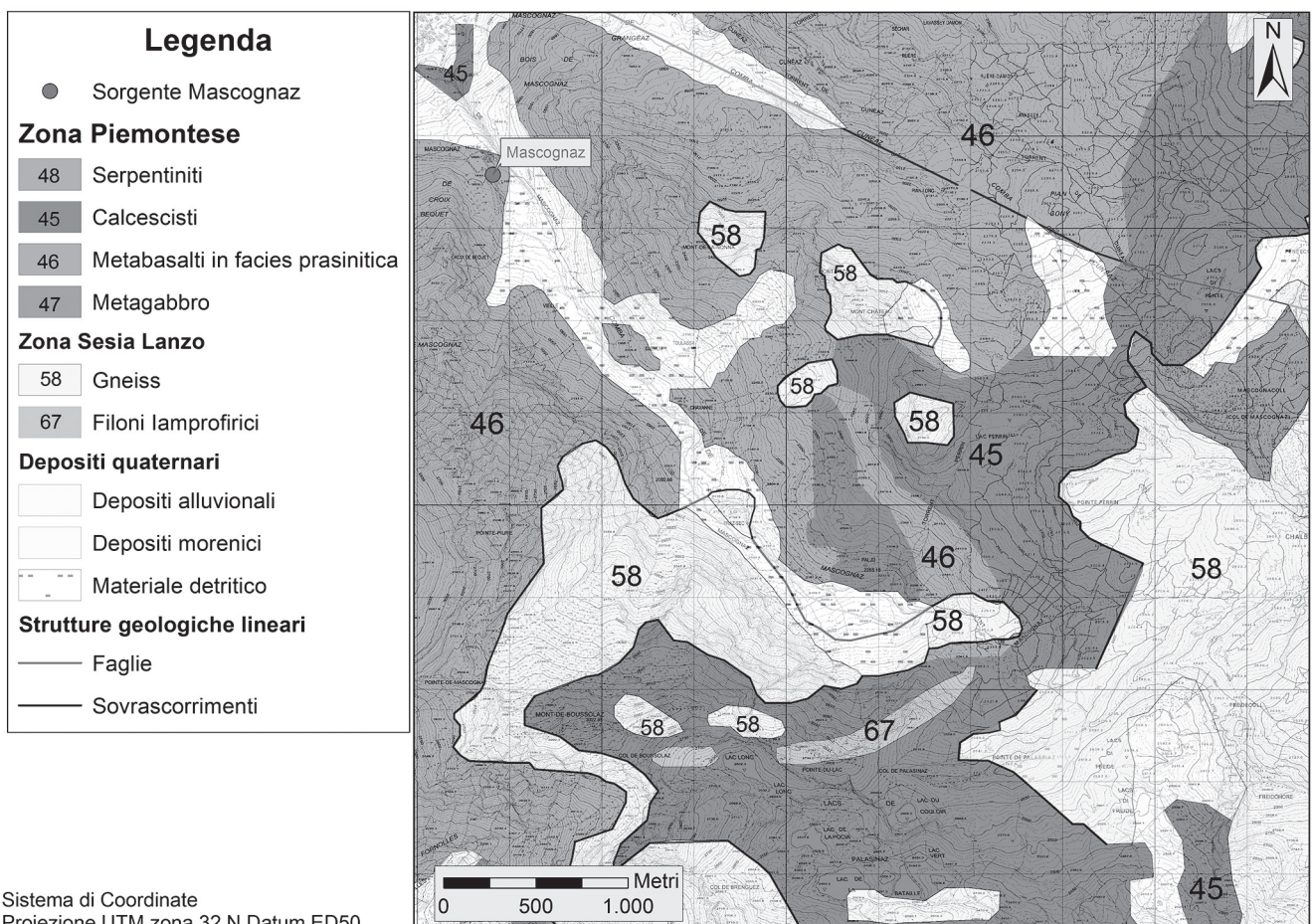
Dal punto di vista geologico, il sito in oggetto è compreso all'interno delle sequenze della Zona Piemontese ed in particolare in corrispondenza di rocce ascrivibili alla Zona del Combin, rappresentate qui da metabasalti e subordinati metasedimenti mesozoici. La geologia della valle di Mascognaz risulta particolarmente interessante poiché essa è interessata dal contatto tettonico tra la Zona del Combin e la Zona Sesia Lanzo, afferente al sistema Austroal-

pino (De Giusti, 2003). Per quanto riguarda le formazioni superficiali, si possono riconoscere essenzialmente depositi glaciali. Il fondovalle del vallone di Mascognaz è caratterizzato dalla presenza di una coltre piuttosto continua costituita da detrito che raccorda i ripidi versanti con il fondovalle pianeggiante (fig. 2).

Dal punto di vista idrogeologico si evidenzia che il letto impermeabile su cui poggia il corpo acquifero afferente alla sorgente Mascognaz, è costituito da metabasalti e sedimenti Mesozoici subordinati appartenenti alla zona Piemontese (Dal Piaz, 1992). Al di sopra di tale livello impermeabile è presente una copertura quaternaria, costituita prevalentemente da diffusi depositi di origine glaciale, caratterizzati da permeabilità per porosità, variabile da media ad alta. Tali depositi quaternari sono sede dell'acquifero libero che

alimenta la sorgente. Tale acquifero sotteso alla sorgente da un bacino di alimentazione con superficie di 10 Km², ha uno spessore massimo di circa 20 m (Comune di Ayas, 2013) ed una lunghezza stimata di circa 4 Km e si assottiglia fino ad emergere nei pressi della sorgente. La sorgente pertanto viene classificata come sorgente per affioramento della piezometrica (Civita, 2005), ammettendo come fattore genetico di controllo la natura geomorfologica del bacino. Si ipotizza a questo proposito che in questo settore le azioni erosive dovute al corso d'acqua, unitamente all'esarazione glaciale abbiano determinato l'intersezione della superficie topografica con il substrato impermeabile, provocando la venuta a giorno della superficie piezometrica.

La captazione delle acque sorgive avviene tramite un'opera di presa costituita da un vano in muratura



Sistema di Coordinate
Proiezione UTM zona 32 N Datum ED50

Fig. 2. Inquadramento geologico della sorgente Mascognaz (De Giusti et al. 2003).
Geological sketch of the Mascognaz spring outcrop area (De Giusti et al. 2003).

relativamente ampio, che ospita due vasche (fig. 3). Nella prima confluisc l'acqua attraverso due dreni principali e funge da vasca di calma. La seconda vasca, in comunicazione con la prima tramite uno stramazzo, rappresenta la vasca di carico, dalla quale ha origine l'opera di derivazione. Per consentire la misura in continuo e raccolta dei parametri fisici relativi alla sorgente, nella vasca di calma è stata posizionata una sonda OTT CTD per l'acquisizione oraria dei valori di Conducibilità elettrica [$\mu\text{S}/\text{cm}$], Temperatura [$^{\circ}\text{C}$] e Livello [cm].

2.3. Metodi

I metodi di *time series analysis* possono essere utilizzati per comparare segnali in ingresso o input (es. precipitazioni) con segnali di uscita o output (es. portate); grazie a tale confronto si possono ricavare utili informazioni a carattere idrogeologico sul corpo acquifero studiato, quali: dimensioni del sistema, grado di interazione con gli eventi meteorici e tipologia di fenomeni di flusso presenti. L'analisi dei segnali può essere svolta singolarmente, il che significa caratterizzare la struttura della serie dei dati di output (es. portate), ed in questo caso la funzione utilizzata si definisce univariata, oppure, si possono comparare due segnali diversi, dove il primo è generalmente quello di input (es. precipitazioni) ed il secondo è quello di output (es. portate), ed in questo caso la funzione utilizzata si definisce bivariata.

Tra le diverse funzioni univariate in dominio di tempo troviamo la Funzione di Auto-Correlazione (ACF), mentre, tra le tecniche bivariata, sempre in dominio di tempo, troviamo la Funzione di Cross-Correlazione (CCF). Nello specifico, l'applicazione della funzione ACF permette di valutare l'influenza delle portate pregresse su quelle attuali, tale interdipendenza delle portate può essere valutata tramite la quan-



Fig. 3. Opera di presa e posizionamento della sonda protetta da un tubo in PVC. Tapping system and probe installed in a PVC pipe.

tificazione del cosiddetto "memory effect" o effetto memoria, il quale rappresenta un indicatore del tempo di residenza dell'acqua nell'acquifero. Applicando la funzione ACF, il coefficiente di auto-correlazione ($r_{x,k}$) viene calcolato per vari valori di k (lags) e plottato su un grafico definito auto-correlogramma; in base ai punti di flesso o cambi di pendenza presenti su quest'ultimo è possibile discriminare il flusso in due componenti definite di *base-flow* e di *fast-flow* (Kresic e Stevanovic, 2010). Il "memory effect", o grado di interdipendenza di una serie, è dato dall'intersezione dei coefficienti di auto-correlazione, plottati sul correlogramma con la soglia $r_{x,k}=0,2$. Mentre, la funzione CCF permette di valutare la relazione, dipendente dal fattore tempo, tra un output o variabile dipendente (es. portata) e un input o variabile indipendente (es. precipitazione). Tale valutazione si basa sul calcolo dei coefficienti di cross-correlazione ($r_{xy,k}$) per diversi *time lag* (k) e plottati su un cross-correlogramma. La funzione CCF è in grado di restituire due importanti informazioni: la "forza" del grado di correlazione tra le due variabili, data

dal valore più alto raggiunto dal coefficiente di cross-correlazione ed il ritardo temporale (*time lag*) che si ha tra un importante evento meteorico ed il suo effetto sull'idrogramma della sorgente individuato dal numero di giorni "k" a cui si ha il massimo valore di $r_{xy,k}$.

Invece, passando al dominio di frequenza abbiamo numerose funzioni bivariata, quali: Funzione di Cross-Amplitudine (CAF), Funzione di Guadagno (GAF), Funzione di Coerenza (COF) e Funzione di Fase (PHF). Nello specifico, la prima funzione permette di comprendere quale sia la componente preponderante, *base-flow* o *fast-flow*, all'interno del flusso idrico sotterraneo, andando a valutare quando la frequenza tende a raggiungere un valore prossimo allo zero, mentre, la seconda funzione permette di capire la durata in giorni della componente di *base-flow*. Infatti, da letteratura (Padilla e Pulido-Bosch, 1995) si associa alla frequenza corrispondente al valore di $\text{GAF}=1$ la durata dei fenomeni di *base-flow*. La funzione COF consente di valutare la coerenza tra le variazioni della serie di output rispetto a quella di input. Quindi, una serie, i cui valori

di tale funzione si mantengono alti ed all'incirca costanti anche ad alte frequenze identifica un sistema dove vi è la preponderanza di fenomeni di *fast-flow* rispetto a quelli di *base-flow*. L'ultima funzione consente di stimare il ritardo tra i fenomeni di flusso, registrati in sorgente, ed i principali input infiltrativi, andando a calcolare la pendenza della funzione. Tale calcolo può essere applicato a tratti di funzione così da valutare la pendenza e quindi il ritardo per le componenti di *base-flow* (basse frequenze) e di *fast-flow* (alte frequenze).

Per avere maggiori informazioni sullo sviluppo teorico e l'implementazione delle funzioni sopra menzionate si rimanda a Jenkins e Watts (1968), Mangin (1984), Box et al. (1994), Padilla e Pulido-Bosch (1995) e Laroque et al. (1998).

2.4. Dataset a disposizione

La Valle d'Aosta è caratterizzata da un clima alpino con inverni freddi ed estati fresche. Annualmente le precipitazioni raggiungono i valori di picco in primavera ed autunno, mentre, i valori minimi sono registrati in estate e inverno. Nello specifico, il valore medio mensile di precipitazione liquida è circa 140 mm, mentre, il valore minimo è di 30 mm (Mercalli et al. 2003).

Il periodo di monitoraggio, pari a quattro anni idrologici, va dal 15/03/2011 al 15/03/2015 per i parametri di precipitazione e di portata con passo di acquisizione orario e successiva media giornaliera (fig. 4). Si specifica che, il dato di precipitazione liquida proviene da un pluviometro riscaldato dotato di bilancia, il che permette una buona stima del quantitativo e distribuzione della precipitazione liquida in contesti montani, com'è per il caso studio qui descritto.

I periodi di ricarica della sorgente Mascognaz sono legati ai fenomeni di fusione nivale che ricoprono un ruolo importante sui relativi me-

canismi di funzionamento. Infatti, vista l'elevata quota a cui è ubicata la sorgente, la neve si accumula nel suo bacino di alimentazione per diversi mesi durante il periodo invernale (Novembre-Marzo). Pertanto, vi sarà un certo lasso temporale che dovrà essere considerato nell'analisi, tra l'evento di precipitazione nevosa ed il suo effetto sull'idrogramma della sorgente, legato ai processi infiltrativi.

Al fine di implementare il calcolo per le funzioni in dominio di tempo è stato scelto di adottare un valore di *truncation point* pari a 100 giorni; tale valore rappresenta l'estensione della finestra temporale su cui vengono visualizzate le funzioni in dominio di tempo. Oltre tale intervallo tali funzioni assumono valori negativi e quindi non utili al fine delle considerazioni a carattere idrogeologico. Mentre, per l'implementazione delle funzioni in dominio di frequenza è stato adottato un valore di *truncation point* (m) pari a:

$$m = 2 \cdot (n)^{1/2} \quad (1)$$

dove n è il numero di dati, ossia, in questo caso, il numero di giorni del dataset. Tale valore è stato adottato sulla base di un'analisi bibliografica (Mair e Fares, 2011).

2.5. Risultati

Dalla fig. 5a emerge come per la sorgente Mascognaz non vi sia la presenza di più componenti di flusso, in quanto la pendenza dell'autocorrelogramma è circa costante, senza la presenza di flessi. Pertanto, in seguito all'applicazione di questa funzione si evince come vi sia la predominanza della componente di *base-flow* rispetto a quella di *fast-flow*. Inoltre, l'effetto memoria del sistema, che corrisponde ad una misura indiretta delle dimensioni dello stesso, è piuttosto elevato in quanto raggiunge valori di k pari a 85 giorni. Tale risultato indica la presenza di un sistema acquifero di dimensioni medio-grandi.

Il cross-correlogramma (fig. 5b) ha una forma piuttosto omogenea, senza la presenza di picchi evidenti e di conseguenza non emerge chiaramente, in termini quantitativi, quale sia il massimo della funzione. Come conseguenza il *time lag*, ovvero lo scostamento temporale tra i fenomeni infiltrativi e gli effetti sull'idrogramma sorgivo, non risulta ben definito e si può comunque notare la presenza di un massimo, seppur poco marcato della funzione, a circa 15 giorni.

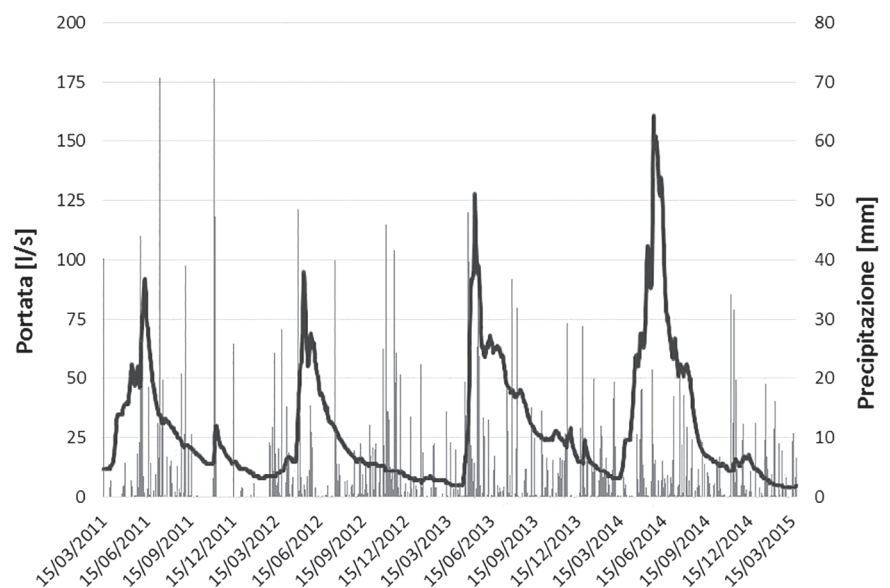


Fig. 4. Idrogramma con valori medi giornalieri (linea continua) della sorgente Mascognaz raffrontati con i valori di precipitazione (barre) medi giornalieri. Daily rainfall (bars) and discharge (solid line) values of Mascognaz spring.

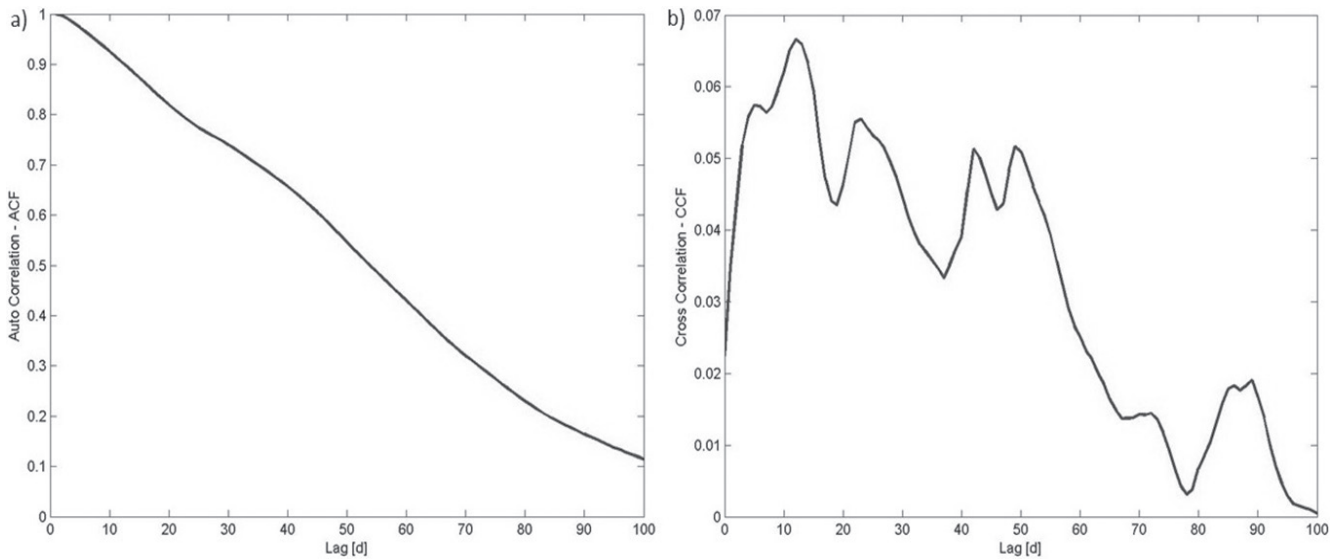


Fig. 5. Analisi in dominio di tempo per la sorgente Mascognaz: a) ACF, b) CCF.
Time series analysis in frequency domain for Mascognaz Spring: a) ACF, b) CCF.

Da queste considerazioni emerge la preponderanza delle componenti di *base-flow* su quelle di *fast-flow*.

Dalle figg. 6a e 6b si nota come il sistema attenui i segnali di input ad alte frequenze e li amplifichi a basse frequenze. Infatti, la CAF raggiunge un valore prossimo allo zero per frequenze superiori a 0,1. Questo indica una debole presenza di componenti di *fast-flow* all'interno del sistema. Sempre ad una frequenza pari a 0,1, la funzione di gain mostra una grande attenuazione del segnale di input, fenomeno che non avviene alle

basse frequenze, a conferma della preponderanza delle componenti di *base-flow* su quelle di *fast-flow*. Osservando la funzione di GAF si nota che essa raggiunge un valore unitario alla frequenza di 0.015 corrispondente ad una durata di *base-flow* nell'acquifero pari a circa 67 giorni.

La funzione di COF (fig. 7a) registra una perdita di coerenza, tra il segnale di input e quello di output, per frequenze molto basse, ossia inferiori a 0,1. Questo riscontro evidenzia ulteriormente la quasi assenza di fenomeni di *fast-flow*, poiché se ciò non

si fosse verificato vi sarebbe un'alta coerenza tra i due segnali anche ad alte frequenze.

La funzione PHF (fig. 7b), fornisce una stima del ritardo o *time lag* che intercorre tra i fenomeni di precipitazione ed il suo effetto sull'idrogramma sorgivo; dalla sua determinazione si evince un ritardo medio, rispetto agli input infiltrativi, inerenti i fenomeni di *base-flow*, superiore a 10 giorni. Tale calcolo non è stato possibile applicarlo per le alte frequenze poiché la funzione risulta avere distorsioni troppo elevate.

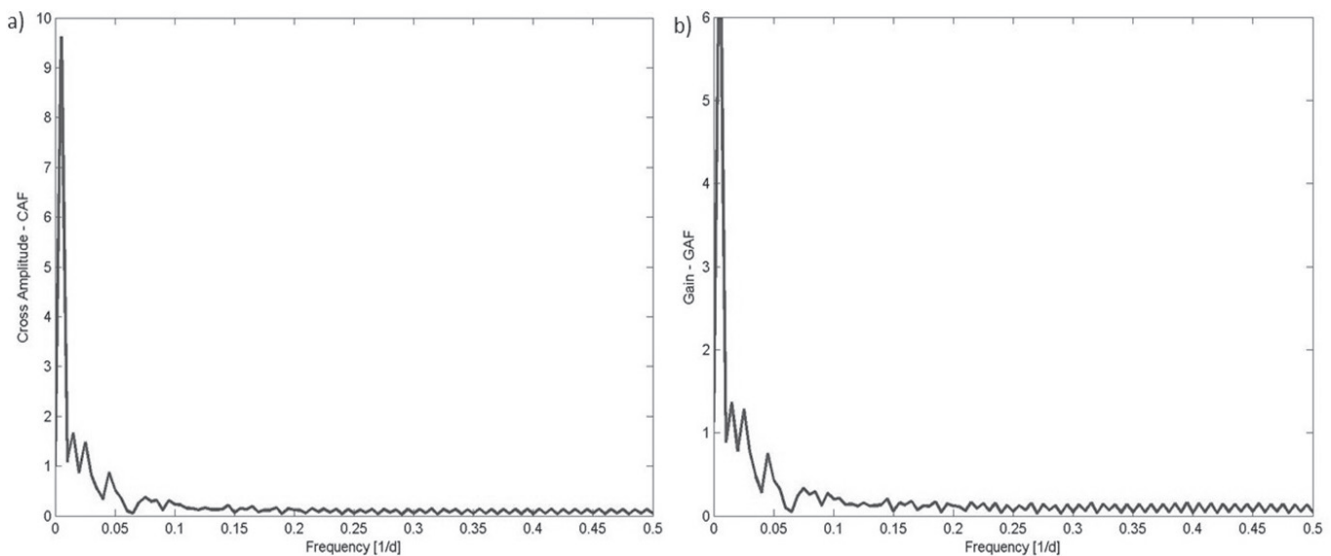


Fig. 6. Analisi in dominio di frequenza per la sorgente Mascognaz: a) CAF, b) GAF.
Time series analysis in frequency domain for Mascognaz Spring: a) CAF, b) GAF.

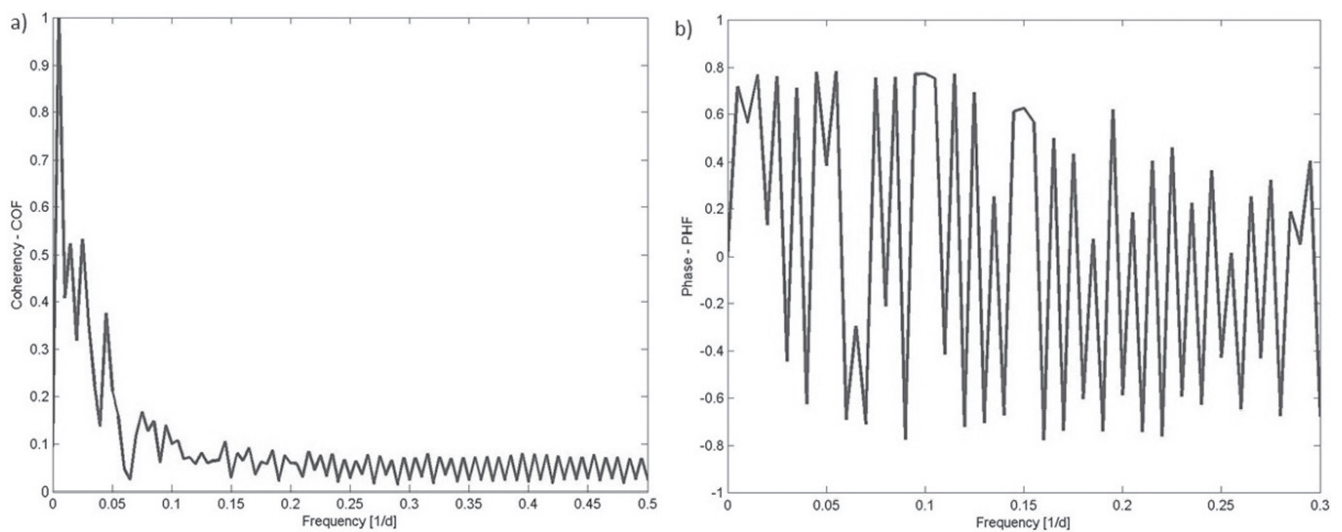


Fig. 7. Analisi in dominio di frequenza per la sorgente Mascognaz: a) COF, b) PHF. Time series analysis in frequency domain for Mascognaz Spring: a) COF, b) PHF.

Conclusioni

L'applicazione delle funzioni in dominio di tempo e frequenza su serie di dati temporali da uno a più anni, consentono di comprendere come un corpo acquifero interagisca con i diversi input infiltrativi. Infatti, l'utilizzo di tecniche univariate e bivariate, sull'intero idrogramma sorgivo, permette di discriminare la presenza di una o più componenti di flusso e di determinare in che misura il sistema acquifero si relazioni con i fenomeni infiltrativi.

Dall'applicazione delle funzioni CCF e PHF emerge come la sorgente sia correlata debolmente con gli input infiltrativi e che vi sia un tempo di risposta superiore ai 10 giorni. Inoltre, si noti come la CCF mantenga una correlazione positiva per tutta la durata dell'analisi. Si può ipotizzare che ciò sia legato all'effetto della fusione nivale, che si presume porti a prolungare l'effetto che gli input infiltrativi esercitano sull'acquifero.

Le restanti funzioni (ACF, CAF, COF e GAF) evidenziano la prevalenza della componente di *base-flow* rispetto a quella di *fast-flow*, segno di un sistema assimilabile ad un mezzo poroso. Pertanto, si ipotizza

l'assenza di condotti preferenziali, assimilabili a fenomeni carsici o pseudo-carsici che potrebbero alimentare il flusso. Inoltre, l'effetto di modulazione dell'input infiltrativo è evidenziato dall'alto valore di *memory effect* ricavato dalla funzione ACF.

L'acquisizione di ulteriori dati di monitoraggio e l'adozione di particolari sensori quali lisimetri, sensori ad ultrasuoni per misurare l'altezza neve e *snow scale*, potrebbero consentire di caratterizzare con maggior dettaglio l'effetto della fusione nivale sull'idrogramma sorgivo e potrebbero permettere una migliore applicazione delle tecniche qui utilizzate. Inoltre, l'esecuzione in situ di test con traccianti potrebbe consentire di verificare le ipotesi formulate nel presente lavoro.

Bibliografia

Bonacci, O., 1987. *Karst Hydrology*. Springer, Berlin.
 Bonacci, O., 1993. *Karst springs hydrographs as indicators of karst aquifers*. Hydrological Sciences Journal. 38. pp. 51-62.
 Box, G.E.P., e Jenkins, G.M., 1976. *Time Series Analysis: Forecasting and Con-*

trol. Holden Day.

Box G.E.P., Jenkins G.M., Reinsel. G.C., 1994. *Time series analysis: forecasting and control*. 3rd edn. Prentice Hall. Englewood Cliffs.

Brillinger, D.R., 1975. *Time Series Data Analysis and Theory*. Holt, Rinehart & Winston, New York.

Civita M., 2005. *Idrogeologia applicata e ambientale* CEA, pagine 794, ISBN: 9788840812977.

Civita, M.; Danese, A.; Nicola, E; Pizzo, S., 2007. *Previsione e monitoraggio degli effetti sull'acquifero nel corso della realizzazione di un'importante opera ferroviaria in sotterraneo nella Città di Torino*. In: *Geingegneria Ambientale e Mineraria*. 44,2, pp. 49-68.

Comune di Ayas, 2013. *Piano regolatore generale comunale urbanistico e paesaggistico (PRG)*. Technical report.

Dal Piaz, G.V., 1992. *Alpi dal Monte Bianco al Lago Maggiore. Guide geologiche regionali*. Società Geologica Italiana. BE-MA ed., 3(2).

De Giusti, F., Bonetto, F., Dal Piaz, G.V., 2003. *Carta Geologica della Valle d'Aosta*. Scale 1:100.000

Delleur, M., 1971. *Développements récents en matière d'analyse des chroniques d'évènements hydrologiques: liaison en chaîne, analyse spectrale*. Houille Blanche. 2. pp. 147-157.

- Drogue, C., 1972. *Analyse statistique des hydrogrammes de décrue des sources karstiques*. Journal Hydrologique, 15. pp. 49-68.
- Hannan, E.J., 1970. *Multiple time series*. Wiley, New York.
- Jenkins, G.M., e Watts, D.G., 1968. *Spectral analysis and its applications*. Holden Day, San Francisco.
- Krešić N, Stevanović Z (2010) Groundwater hydrogeology of springs. Butterworth-Heinemann, Burlington, 573 p.
- Larocque, M., Mangin, A., Razack, M., Banton, O., 1998. *Contribution of correlation and spectral analyses to the regional study of a large karst aquifer (Charente, France)*. Journal of Hydrology. 205. pp. 217-231.
- Lo Russo S., Amanzio G., Ghione R., De Maio, M., 2015. Recession hydrographs and time series analysis of springs monitoring data: application on porous and shallow aquifers in mountain areas (Aosta Valley). Environmental Earth Sciences. 73. pp. 7415-7434. DOI: 10.1007/s12665-014-3916-z.
- Maillet, E., 1905. *Essais d'hydraulique souterraine et fluviale*. Librairie Sci. Hermann Paris.
- Mair A., e Fares A., 2011. *Time series analysis of daily rainfall and streamflow in a volcanic dike-intruded aquifer system, O'ahu, Hawaii, USA*. Hydrogeology Journal. 19. pp. 929-944.
- Mangin, A., 1977. *Le karst et son originalité définie à partir des résultats obtenus par l'hydrodynamique*. Speleon., 23. pp. 59-65.
- Mangin, A., 1984. *Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatoire et spectrale*. Journal of Hydrology. 67. pp. 25-43.
- Mercalli, L., Cat Berro, D., Montuschi, S., 2003. *Atlante climatico della Valle d'Aosta*. Società Meteorologica Subalpina, Torino.
- Padilla, A., Pulido-Bosch, A., 1995. *Study of hydrographs of karstic aquifers by means of correlation and cross-spectral analysis*. Journal of Hydrology. 168. pp. 73-89.
- Schoeller, H., 1965. *Hydrodynamique dans le karst (écoulement de emmagasinement)*. Hydrogéologie des Roches Fissurées. IAHS Coll. Hydrol. des Roches Fissurées, Dubrovnik (Yougoslavie), 1. pp. 3-20.
- Spolia, S.K., e Chander, S., 1973. *Modelling of surface runoff systems by ARMA model*. Journal of Hydrology. 22. pp. 317-332. DOI: 10.1007/s10040-011-0740-3.
- Vigna, B., 2014. *Acquisizione ed interpretazione dei dati di monitoraggio delle sorgenti*. Geoingegneria Ambientale e Mineraria. 143. pp. 43-58.
- Zhang Z., Chen Xi., Chen Xu., e Shi P., 2013. *Quantifying time lag of epikarst-spring hydrograph response to rainfall using correlation and spectral analyses*. Hydrogeology Journal. 21. pp. 1619-1631. DOI: 10.1007/s10040-013-1041-9.

Ringraziamenti

Gli autori ringraziano la Regione Autonoma Valle d'Aosta per il supporto fornito.

I dati presentati in questo lavoro sono in parte stati acquisiti durante l'Azione 3 del Progetto STRADA "Strategie di Adattamento ai Cambiamenti Climatici per la Gestione dei Rischi Naturali nel Territorio Transfrontaliero". (<http://www.progettostrada.net>)