

Karst springs of Apennines typified by upwelling flux

Sorgenti carsiche dell'Appennino interessate da flusso ascendente

Francesco Fiorillo, Libera Esposito, Mauro Pagnozzi, Sabatino Ciarcia, Giovanni Testa

Riassunto: Il fenomeno idraulico del flusso ascendente che caratterizza diverse sorgenti carsiche dell'Appennino è stato investigato tramite dati piezometrici a differenti profondità e mediante dati chimico-fisici delle acque sorgive. Sono state prese in considerazione tre diverse aree sorgive in Campania (Serino, Grassano e Caposele), caratterizzate da condizioni di emergenza delle acque riconducibili a tre diversi schemi idrogeologici di circolazione delle acque sotterranee, accomunati dal flusso ascendente delle acque sorgive.

Alcuni dati sono stati acquisiti direttamente presso gli acquedotti gestori delle sorgenti, come la portata delle sorgenti e le misure piezometriche nei pozzi. Altri dati sono stati acquisiti ad hoc nel corso degli anni e riguardano in particolar modo le caratteristiche fisico-chimiche delle acque e le portate delle sorgenti del Grassano; sono state effettuate anche misure dell'attività di radon (^{222}Rn) nelle acque sorgive.

Il quadro dei dati raccolti e la loro analisi indica che le sorgenti carsiche considerate sono alimentate da un flusso idrico sotterraneo che localmente è prevalentemente a componente verticale. Questa caratteristica, comune a molte altre sorgenti dell'Appennino, può risultare di particolare importanza nella progettazione delle opere di captazione, nella manutenzione delle stesse, nonché per la definizione delle aree di salvaguardia delle sorgenti.

Keywords: *upwelling flow, karst spring, piezometers, ^{222}Rn , Campania.*

Parole chiave: flusso ascendente, sorgenti carsiche, piezometri, ^{222}Rn , Campania.

Mauro PAGNOZZI 

University of Sannio, Dipartimento di Scienze e Tecnologie
Via Port' Arsa 11 - 82100 Benevento, Italy
pagnozzi.mauro@libero.it

Francesco FIORILLO

Libera ESPOSITO

Sabatino CIARCIA

Giovanni TESTA

University of Sannio, Dipartimento di Scienze e Tecnologie
Via Port' Arsa 11 - 82100 Benevento, Italy

Ricevuto/Received: 19 November 2018-Acettato/Accepted: 09 December 2018
Pubblicato online/Published online: 19 December 2018

This is an open access article under the CC BY-NC-ND license:
<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>

© Associazione Acque Sotterranee 2018

Abstract: *The hydraulic phenomenon of upwelling, affecting several karst springs of Apennines, has been investigated through piezometric data at different depth and chemical-physical data of springs water. Three different springs in Campania region were analyzed (Serino, Grassano and Caposele springs), characterized by three different groundwater schemes, but with the same upwelling phenomena at the springs. Some data (spring discharge and piezometric levels) have been acquired from the municipal waterwork. Other data (physical-chemical parameters and Radon values (^{222}Rn)) have been collected ad hoc in spring waters, included the spring discharges of Grassano springs. All the data pointed out that karst springs considered are fed by groundwater flux that locally is vertical. This features, common to others springs of Apennines, can be relevant in the realization of the tapping work, in their maintenance and for the definition of the protection area of the springs.*

Premessa

Le principali caratteristiche delle sorgenti, come la portata ed i caratteri chimico-fisici delle acque, possono essere in genere agevolmente misurati e determinati, fornendo un fondamentale contributo alla conoscenza sulla circolazione idrica sotterranea.

L'ubicazione delle sorgenti dipende dalle locali condizioni topografiche e idrogeologiche e molte di esse prendono origine lungo contatti geologici come, ad esempio, faglie o depressioni (Civita 2005; Todd e Mays 2005; Stevanovic e Kresic 2009).

Nel modello regionale delle acque sotterranee (Hubbert 1940; Toth 1963; Domenico e Schwartz 1990) le zone di emergenza sono ubicate nei settori depressi ove incrementano le portate dei fiumi attraverso sorgenti lineari o puntuali. In queste aree la componente verticale del flusso può essere più grande di quella orizzontale dando luogo ad un flusso idrico sotterraneo che, almeno localmente, si sviluppa con un tipico percorso ascendente.

Il flusso ascendente che si verifica nella zona di recapito dà luogo ad una manifestazione sorgentizia, specialmente nelle aree dei massicci carsici, dove potenti sorgenti basali sono alimentate da ampi sistemi acquiferi che supportano elevate portate durante l'intero anno idrologico. In altri casi, i fiumi incrementano la loro portata quando attraversano zone caratterizzate da flussi ascendenti delle acque sotterranee (Martínez-Santos et al. 2014),

Gli acquiferi carsici, caratterizzati da una elevata trasmissività e da una elevata capacità di immagazzinare grandi volumi d'acqua, possono consentire una profonda circolazione idrica che genera flussi ascendenti nelle zone di recapito ove sono ubicate le sorgenti basali.

Questi aspetti di carattere idraulico risultano di particolare importanza nella progettazione delle opere di captazione, nella manutenzione delle stesse, nonché per la definizione delle aree di salvaguardia delle sorgenti stesse.

Sebbene la portata delle sorgenti può essere più o meno agevolmente misurata, il connesso flusso ascendente non è altrettanto facilmente deducibile, poiché dovuto ad un locale gradiente idraulico verticale che non sempre viene rilevato.

In molti acquiferi carsici dell'Italia meridionale, la superficie della falda libera (*water table*) risulta a bassa pendenza, con gradiente in genere minore del 1% (Fiorillo et al. 2015a); queste condizioni favoriscono una circolazione profonda, con linee di flusso non solo a componente orizzontale ma anche dapprima discendenti e poi convergenti verso le sorgenti ove si concentrano con moto tipicamente ascendente. Lo sviluppo nel tempo di una rete di condotti conduce alla gerarchizzazione del flusso (Király 2002), che finisce con il controllare il percorso delle acque sotterranee. Il flusso ascendente alimentante le sorgenti è con ogni probabilità la causa della formazione di condotti sub-verticali che tipicamente possono terminare in sbocchi sorgentizi (Fiorillo et al. 2018) come nel caso delle c.d. sorgenti vaclusiane. In questi casi, gli spostamenti tettonici lungo le faglie, che separano i terreni carsici dai terreni meno permeabili, favoriscono la formazione dei condotti sub-verticali (Palmer e Audra 2004).

Sempre in Appennino meridionale, ma in condizioni di falda in pressione, sorgenti ubicate in ambienti non carsici, possono in realtà essere caratterizzate dalla risalita artesianiana di acque da acquiferi carsici profondi (Cotecchia et al. 1993).

Fiorillo et al. (2018) hanno studiato e messo in risalto il fenomeno del flusso ascendente che alimenta le sorgenti di Serino, in Campania, sulla base di dati piezometrici, oltre che di misure di parametri chimico-fisici delle acque. Gli aspetti descritti in questo studio sono qui ripresi ed ampliati, con riferimento anche ad altre importanti sorgenti carsiche della Campania.

In particolare si farà riferimento agli schemi di figura 1, ai quali sono riconducibili molte sorgenti dell'Appennino meridionale e che saranno discussi in seguito nelle sezioni specifiche.

In particolare, per il caso a) di Figura 1 sarà fatto riferimento al gruppo sorgivo di Serino in provincia di Avellino per il quale saranno ripresi i risultati di Fiorillo et al (2018); per il caso b) si farà riferimento al gruppo sorgivo del Rio Grassano in provincia di Benevento e per il caso c) alla sorgente di Caposele in provincia di Avellino.

La deduzione e la stima del flusso ascendente si basa sull'analisi dei carichi idraulici desunti da piezometri variamente ubicati intorno alle sorgenti, da dati di misure di parametri chimico-fisici delle acque e, per due casi (Serino e Grassano), da dati di misura del radon (^{222}Rn) nelle acque.

Metodologie

Gradiente idraulico verticale

Nelle aree sorgive si assume che la profondità dei piezometri può avere un forte controllo sul carico idraulico misurato in

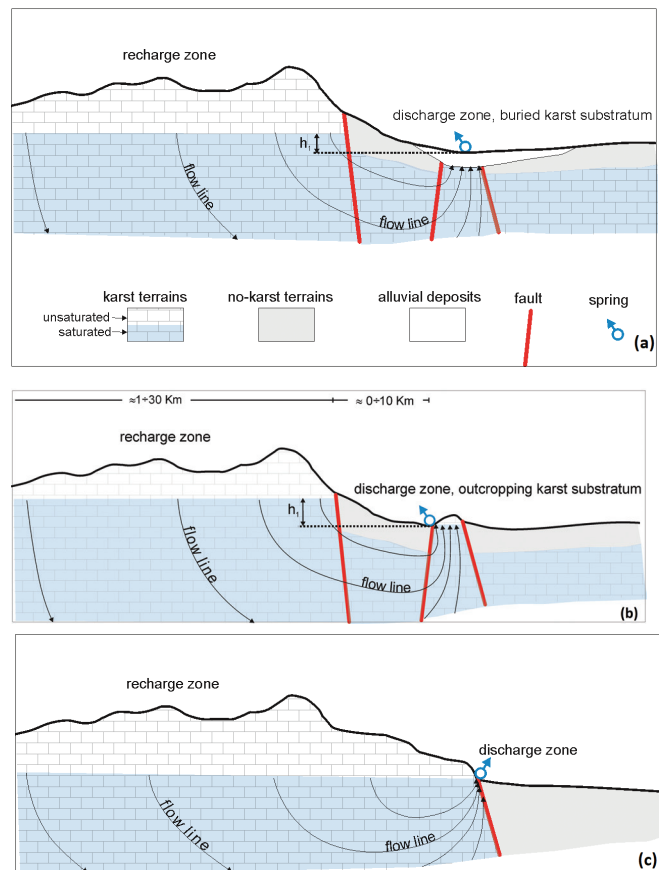


Fig. 1 - Flusso ascendente per diverse condizioni idrogeologiche della zona di recapito di acquiferi carsici. (a) la differenza di carico idraulico, h_1 , è necessaria per consentire la risalita delle acque sotterranee attraverso il mezzo poroso che copre il substrato carsico; (b) la presenza di terreni poco permeabili tra la zona di ricarica e la zona di efflusso favorisce il sifonamento delle acque sotterranee; (c) le linee di flusso tendono ad essere verticali nella zona di recapito come conseguenza di una profonda circolazione idrica e un gradiente basso della superficie della falda.

Fig. 1 - Ascendant flux connected to different hydrogeological setting of the discharge zone of karst aquifers. (a) the hydraulic head difference, h_1 , is needed to allow the rising of groundwater through the porous medium from buried karst substratum; (b) no karst-terrains between the recharge and discharge area helps groundwater syphoning; (c) flow lines tend to be vertical as consequences of deep groundwater flow and flat water table (modified from Fiorillo et al. 2018).

condizioni non idrostatiche, particolarmente in condizioni di flusso discendente o ascendente (Blyth e De Freitas 1984). La figura 2 mostra la stima del gradiente idraulico verticale dalle misure del carico idraulico nei pozzi; qui la differenza di carico idraulico misurato in due pozzi limitrofi è causata dal flusso verticale (ascendente). Questa stima è basata sull'assunto che la componente orizzontale del flusso è nulla ed il carico idraulico è dissipato durante il percorso ascendente del flusso.

Fiorillo et al. (2018) hanno proposto una stima analitica dell'ampiezza dell'area interessata dal flusso ascendente sulla base del valore del gradiente idraulico ascendente, per il caso di Figura 1a ed applicato al caso di Serino.

Misure relative alle caratteristiche chimico-fisiche delle acque e della portata sorgiva

Misure relative alla temperatura mensile, conducibilità elettrica e all'attività del radon (^{222}Rn) sono state effettuate

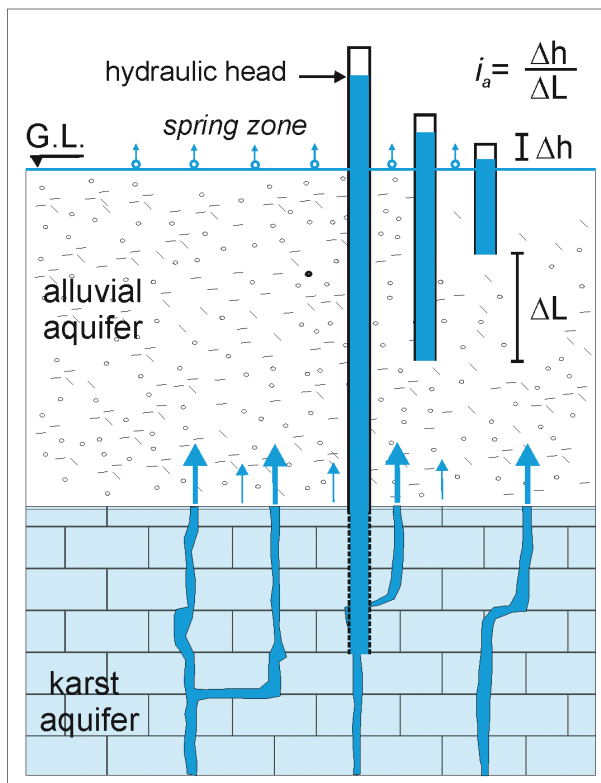


Fig. 2 - Flusso ascendente connesso con condizioni artesiane di un acquifero carsico coperto da depositi alluvionali. Il carico idraulico osservato in piezometri ubicati a diverse profondità consente di stimare il gradiente idraulico ascendente, i_a .

Fig. 2 - Ascendant flux connected to artesian conditions of karst aquifer covered by alluvial deposits. Hydraulic head observed in close boreholes with different depths allow to estimate the ascendant hydraulic gradient, i_a .

nelle acque sorgive. I dati relativi alla temperatura e alla conducibilità elettrica sono stati acquisiti mediante sonda multiparametrica (Horiba mod. U50), immergendo il sensore in corrispondenza delle emergenze sorgive; i valori sono stati compensati alla temperatura di 20 °C. Per la sorgente Sanità di Caposele sono stati utilizzati i dati rilevati in continuo dalla strumentazione installata dall'Acquedotto Pugliese S.p.A.

Le misure riguardanti l'attività del ^{222}Rn sono state effettuate campionando le acque sorgive. I campioni, immediatamente sigillati da parafilms, sono stati trasportati al laboratorio di Idrogeologia dell'Università degli Studi del Sannio per le misure dell'attività del radon con un minimo tempo di ritardo dal momento dell'acquisizione del campione di (30'). L'attività del radon è stata effettuata utilizzando lo strumento AlphaGUARD (Genitron Instruments GmbH, Germania): una camera a ionizzazione idonea per la spettrometria alfa. Una aliquota d'acqua pari a 100 ml è stata campionata in appositi recipienti di vetro. L'attività del ^{222}Rn è stata analizzata utilizzando il software Data EXPERT (da GENITRON Instruments). Il principale interesse dell'attività del ^{222}Rn nelle acque sorgive è legato alla sua possibile relazione con la velocità delle acque di falda e di conseguenza alla sua variazione durante condizioni di alto flusso e basso flusso delle sorgenti (Fiorillo et al. 2018).

Limitatamente alle sorgenti del Rio Grassano, le locali condizioni morfologiche consentono un'accurata misura della portata mediante battello idrometrico attrezzato con profilatore acustico doppler, con simultanea acquisizione della velocità della corrente e della sezione dell'alveo.

Casi studio

Come descritto in premessa, di seguito sono presentati alcuni casi di studio (Fig. 3) che è possibile connettere agli schemi di circolazione di figura 1. Gli esempi sono stati scelti sulla base di dati disponibili grazie alle misure di portata e piezometriche effettuate da enti acquedottistici o sulla base di misure effettuate ad hoc nel corso degli anni.

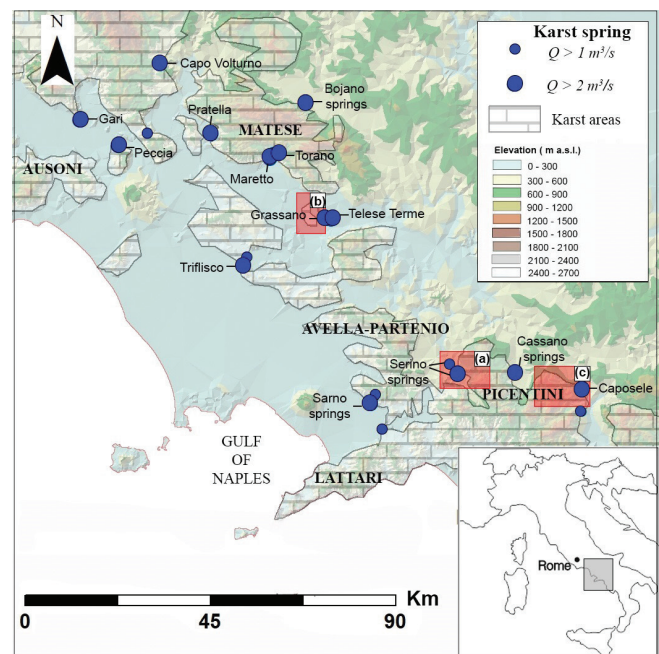


Fig. 3 - Inquadramento idrogeologico del settore occidentale della Campania con indicazione (rettangoli rossi) delle aree di studio: a) Serino; b) Grassano; c) Caposele.

Fig. 3 - Hydrogeological overview of western sector of Campania. Red rectangles show the study areas: a) Serino b) Grassano ; c) Caposele.

Le sorgenti di Serino

Queste sorgenti sono ubicate nella valle del fiume Sabato, tra gli abitati di S.Lucia e S. Michele di Serino, lungo il bordo occidentale del settore più a nord dei monti Picentini. Costano di due principali zone sorgive, denominate gruppo Acquaro-Pelosi (377–380 m s.l.m.) e gruppo Urciuoli (330 m s.l.m.) (Fig. 4). Le sorgenti sono alimentate dal massiccio del Terminio (Civita 1969; Fiorillo et al. 2007) con una portata media annua complessiva di 2.25 m³/s. Il gruppo Acquaro-Pelosi fu captato in epoca romana con il c.d. acquedotto Augusteo (I sec. D.C.) ed alimentava l'area di Napoli e Pozzuoli; il gruppo di Urciuoli con l'acquedotto c.d. Sannitico (I sec. D.C.) alimentava Benevento. Oggi queste sorgenti alimentano l'area metropolitana di Napoli con un recente acquedotto che ha sostituito quello realizzato a fine ottocento.

Nelle zone sorgive di Urciuoli e Acquaro Pelosi, le polle

sorgive sono captate mediante una serie di gallerie drenanti all'interno dei terreni alluvionali della valle del fiume Sabato. Alcune di queste emergono ancora naturalmente nel periodo di piena, altre alimentano il fiume Sabato che a monte di Acquaro-Pelosi è in genere secco.

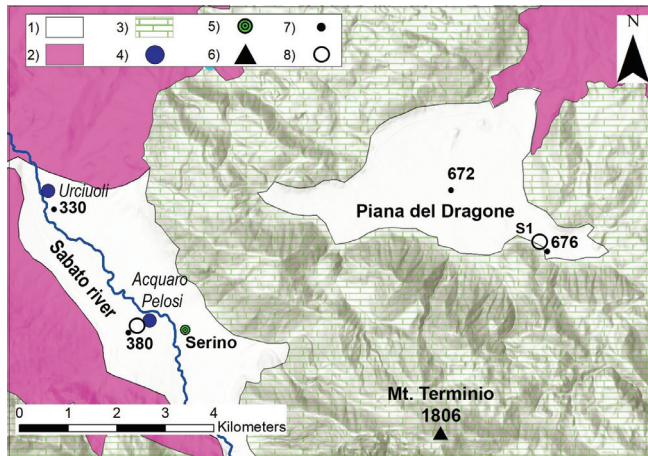


Fig. 4 - Inquadramento dell'area sorgiva di Serino: 1) Alluvioni e altri depositi recenti (Quaternario), 2) flysch (Paleogene-Miocene), 3) serie calcareo-dolomitica (Giurassico - Miocene), 4) sorgenti, 5) centro abitato, 6) vetta, 7) punti quotati, 8) pozzo/area pozzi.

Fig. 4 - Overview of Serino springs area :1) Alluvial and other recent deposits (Quaternary), 2) flysch sequences (Paleogene-Miocene), 3) calcareous - dolomite (Jurassic-Miocene), 4) springs, 5) village, 6) mountain peak, 7) elevation (m. a.s.l.), 8) borehole/wells area.

L'alimentazione di queste sorgenti veniva addebitata agli apporti idrici sotterranei "laterali" provenienti dai terreni carbonatici del M.te Terminio che bordano la valle ad est e, più limitatamente dai terreni alluvionali della piana del fiume Sabato stessa (Aquino et al. 2005; Celico e Russo 1981; Celico et al. 1982). In particolare, il fenomeno dell'artesianesimo delle sorgenti Acquaro-Pelosi è descritto in Civita (1969) ed interpretato come dovuto a conoidi di deiezione che si generano da entrambi i fianchi della valle del fiume Sabato, in corrispondenza delle sorgenti. Non è chiarita o non menzionata la risalita per flusso ascendente dal substrato carsico.

Il locale artesianesimo delle acque sotterranee è stato interpretato come dovuto ad un flusso ascendente all'interno dei terreni alluvionali (Fiorillo et al. 2018), proveniente dal substrato carsico profondo, alimentante la zona sorgiva Acquaro-Pelosi. Il meccanismo è riconducibile allo schema di Figura 1a, ove il gradiente idraulico ascendente è stato desunto secondo lo schema di figura 2 grazie alla presenza di piezometri ubicati a diverse profondità nei materiali alluvionali ricoprenti il substrato carbonatico.

Localmente il carico idraulico aumenta con l'aumentare della profondità dei piezometri nell'area di Acquaro-Pelosi; i dati dei carichi idraulici misurati per diversi anni sono riportati in figura 5a sia per il periodo di piena sia di magra; in entrambi i casi, la retta di regressione fornisce il gradiente idraulico medio del flusso ascendente in condizioni di alto e basso flusso (Fiorillo et al. 2018). Anche l'ampiezza dell'oscillazione del carico idraulico dipende dalla profondità dei piezometri (Fig. 5b).

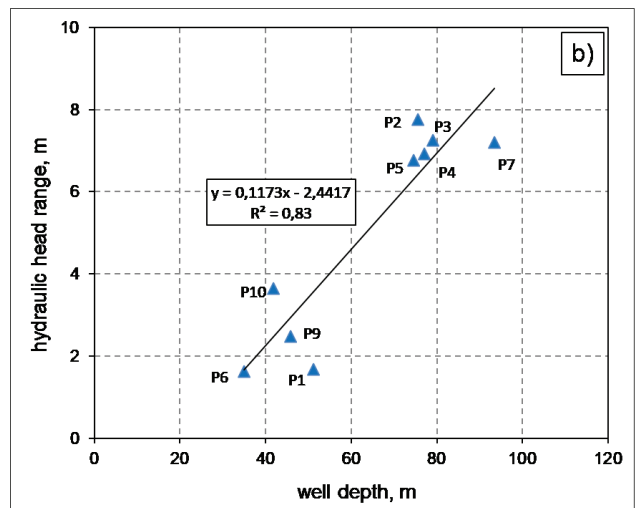
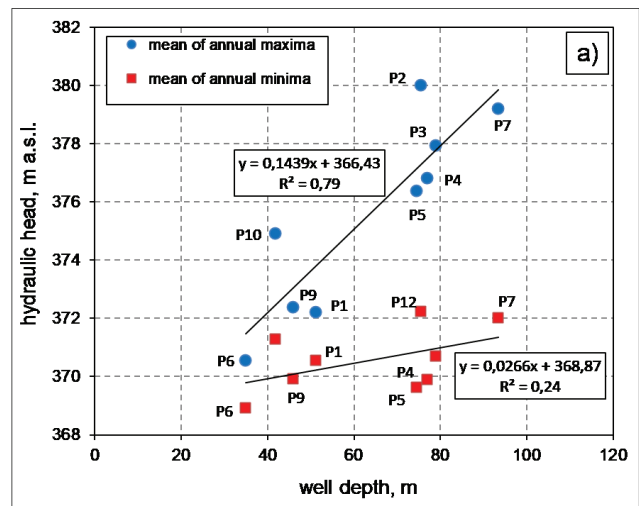


Fig. 5a,b - (a) Correlazione tra la profondità dei pozzi ed il carico idraulico durante periodi di alto flusso (media dei massimi annui) e basso flusso (media dei minimi annui); (b) Correlazione tra profondità dei pozzi ed intervallo del carico idraulico (valori medi).

Fig. 5a,b - (a) Correlation between well depth and hydraulic head during high (mean of annual maxima) and low flow periods (mean of annual minima); (b) Correlation between well depth and hydraulic head range (mean values).

Per quanto riguarda le caratteristiche fisico-chimiche delle acque (analisi del Maggio 2014), il totale di sali disciolti è pari a 221 mg/Kg e 201 mg/Kg per Acquaro-Pelosi e Urciuoli rispettivamente, indicando la scarsa mineralizzazione delle acque. Lo ione principale è il calcio (^{++}Ca , 65 mg/L) unitamente al carbonato di idrogeno ($^{-}HCO_3$, 240 mg/L), in accordo con la provenienza delle acque da ambienti carbonatici.

Sono state effettuate misure di temperatura e conducibilità a cadenza mensile nel periodo temporale che va da Marzo 2015 a Luglio 2016, per le sorgenti di Acquaro, Pelosi e Urciuoli (Fig. 6a).

La conducibilità elettrica sembra essere costante per la sorgente Pelosi, dove è stato osservato un valore di 350 $\mu S/cm$ per l'intero periodo (range 333÷370 $\mu S/cm$). Nelle sorgenti di Acquaro e Urciuoli è stato registrato un range tra i 350 e i 450 $\mu S/cm$ nello stesso periodo. La temperatura mostra un valore circa costante intorno ai 10,5°C (Acquaro e Pelosi)

e 11°C (Urciuoli) nel periodo di ricarica, mentre durante il periodo di recessione (Agosto–Novembre) è stato osservato un incremento di circa 1-2 gradi.

Nello stesso periodo (Febbraio 2015–Luglio 2016) è stata effettuata una misura della concentrazione di ^{222}Rn per le sorgenti di Acquaro, Pelosi e Urciuoli. La figura 6b mostra i risultati ottenuti correlando i valori dell'attività del ^{222}Rn con i dati di portata, in cui si evince un trend chiaro e simile. Una significativa relazione lineare e positiva risulta dal confronto

tra le portate sorgive e l'attività del ^{222}Rn , indicando il forte controllo del ciclo idrologico sulla concentrazione del radon. A differenza della temperatura e della conducibilità, l'attività del ^{222}Rn per le sorgenti di Acquaro e Pelosi indica chiaramente una variazione nelle concentrazioni in riferimento al periodo monitorato (Febbraio 2015 - Luglio 2016); in particolare, come mostrato in figura 6b, l'attività del ^{222}Rn aumenta con l'aumento delle portate sorgive e diminuisce con la riduzione delle portate; la massima e la minima attività del ^{222}Rn si

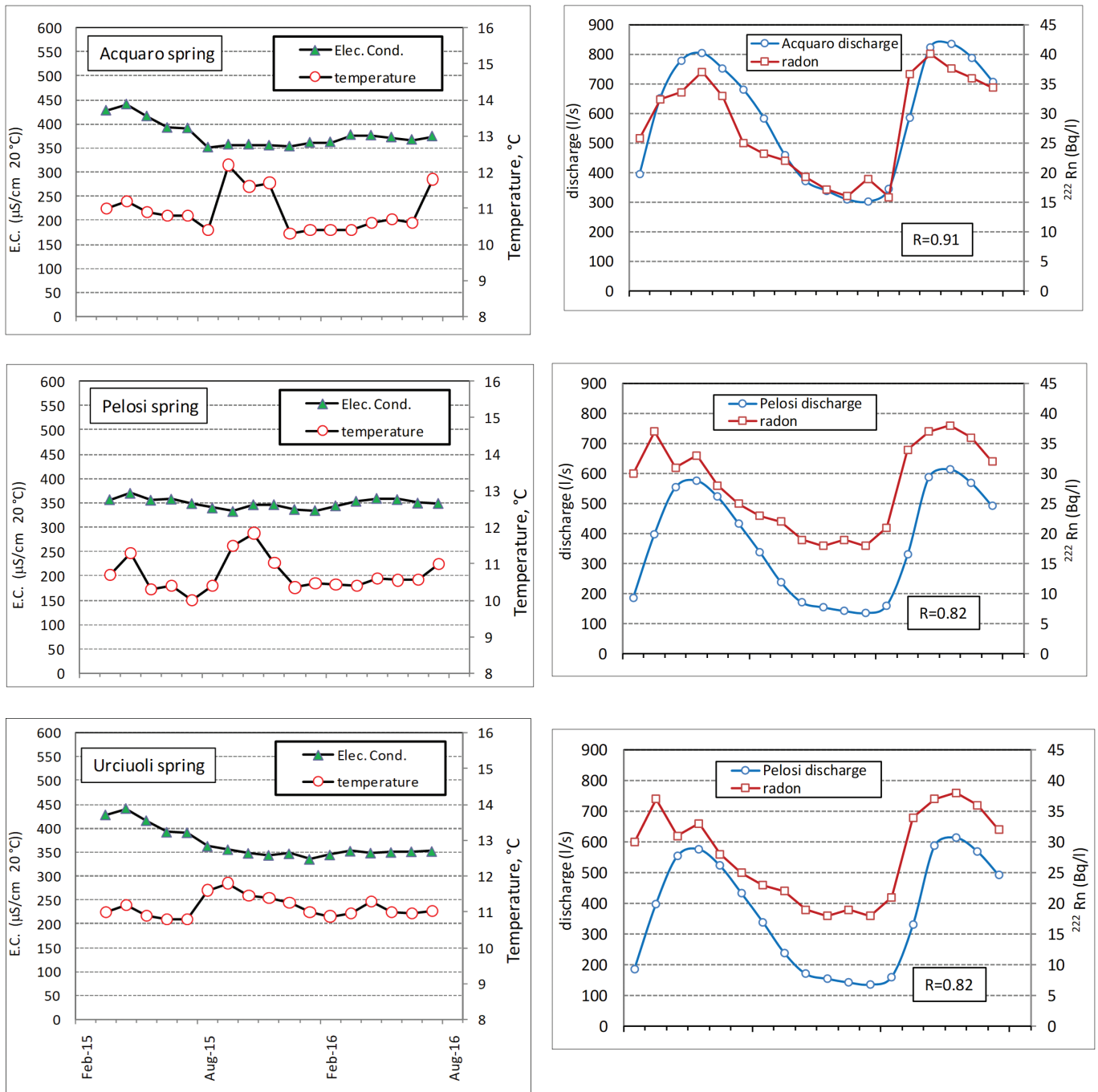


Fig. 6 - Temperatura e conducibilità elettrica per le sorgenti di Acquaro, Pelosi e Urciuoli, misure mensili del periodo Febbraio 2015–Luglio 2016; a destra, misure mensili dell'attività del radon (^{222}Rn) e delle portate sorgive; periodo tra Febbraio 2015–Luglio 2016.

Fig. 6 - Temperature and electrical conductivity for Acquaro, Pelosi and Urciuoli springs, monthly measurements of period February 2015–July 2016; on the right, monthly measurements of radon (^{222}Rn) activity and spring discharge. Monitoring period February 2015–July 2016.

verificano durante condizioni di alto flusso e basso flusso rispettivamente. La condizione di alto flusso è suffragata da un elevato gradiente idraulico ascendente per il quale si verificano una elevata velocità del flusso e una intensa attività del radon. Quindi l'elevata velocità del flusso ascendente permette una più rapida risalita dell'acqua la quale favorisce una elevata attività del ^{222}Rn . Durante periodi di basso flusso, quando si verifica un flusso ascendente più basso, l'attività del ^{222}Rn decresce poiché l'acqua necessita di un periodo più lungo per raggiungere le sorgenti.

Le sorgenti del Rio Grassano

Queste sorgenti sono ubicate lungo il fronte meridionale del rilievo collinare di Montepugliano, in prossimità dell'abitato di Telese, e consistono in una serie di polle emergenti direttamente dalla roccia, altre sono ubicate lungo il letto del fiume Rio Grassano che localmente prende origine (Figura 7). La portata viene misurata mensilmente dal 2014 mediante battello idrometrico attrezzato con profilatore acustico doppler che consente la simultanea acquisizione della velocità e della sezione dell'alveo. La portata misurata varia da un minimo di $2.5 \text{ m}^3/\text{s}$ (novembre 2017) ad un massimo di oltre $6 \text{ m}^3/\text{s}$ (maggio 2014).

L'area di ricarica del gruppo sorgentizio, tenuto conto della portata complessiva, viene ritenuta essere una porzione del massiccio del Matese (Fiorillo e Pagnozzi 2015); la quota delle sorgenti, circa 57 m s.l.m. risulta il più basso recapito tra tutte le sorgenti basali del massiccio.

L'acqua viene utilizzata in parte per irrigazione e solo in minima parte viene captata per scopi idropotabili; la gran parte defluisce nel fiume Calore poco più a valle.

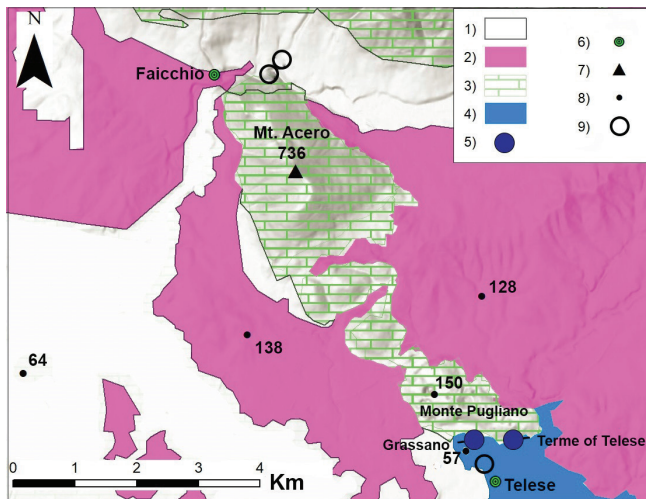


Fig. 7 - Inquadramento dell'area sorgiva del Rio Grassano: 1) Depositi lacustri e alluvionali del fiume Calore (Quaternario), 2) complesso argilloso e flysch (Paleogene - Miocene), 3) serie calcareo-dolomitica (Giurassico - Miocene), 4) Travertine (Pleistocene), 5) sorgenti, 6) centri abitati, 7) vetta, 8) punti quotati, 9) pozzo/area pozzi.

Fig. 7 - Overview of Grassano spring area: 1) Alluvial and lacustrine deposits of Calore river (Quaternary), 2) argillaceous complex and flysch sequences (Paleogene-Miocene), 3) calcareous dolomite series (Jurassic-Miocene), 4) Travertine (Pleistocene), 5) springs, 6) village, 7) mountain peak, 8) elevation (m. a.s.l.), 9) borehole/wells area.

La temperatura e la conducibilità elettrica dell'acqua, così come osservato per il gruppo Acquaro-Pelosi di Serino, si mantiene costante durante l'anno idrologico (Fig. 8), indicando anche in questo caso una grande regolazione dell'acquifero, con coinvolgimento di grandi volumi. La temperatura ha valori intorno a 11.6 C° (range $11.4 \div 11.8 \text{ C}^\circ$), confrontabile con quella di Serino, ma ha una conducibilità elettrica più elevata, intorno ai $1150 \text{ }\mu\text{S}/\text{cm}$ (range $1130 \div 1180 \text{ }\mu\text{S}/\text{cm}$), ad indicare un contenuto salino maggiore.

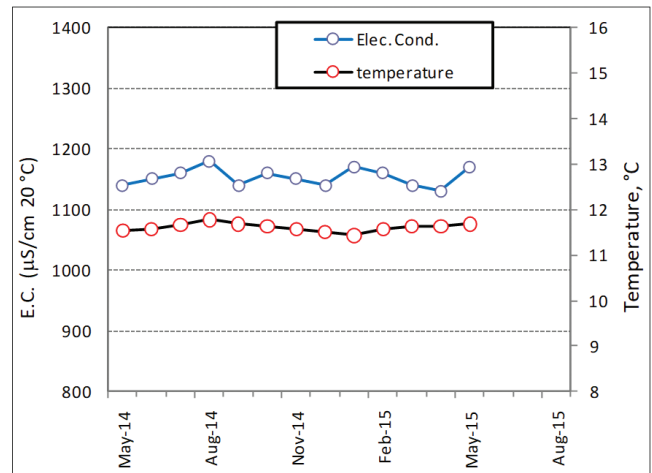


Fig. 8 - Temperatura e conducibilità misurate nel Rio Grassano, in corrispondenza dell'emergenza sorgiva; misure mensili del periodo Maggio 2014-Maggio 2015.

Fig. 8 - Temperature and electrical conductivity measured in the Grassano river, just below spring outlets; monthly measurements from May 2014 to May 2015.

Allo stesso modo di quanto osservato per il gruppo Acquaro-Pelosi di Serino, anche il radon misurato in due distinte polle del gruppo sorgentizio del Rio Grassano appare avere un andamento dipendente con la portata (Fig. 9).

Queste caratteristiche chimico-fisiche delle acque, unitamente a dati di pozzi di seguito descritti, sembrano suggerire una circolazione profonda che in questo caso può essere associata allo schema di figura 1b. In questo schema, il rilievo di Montepugliano da cui emergono le sorgenti risulta connesso idraulicamente in profondità con il massiccio del Matese. Localmente esistono dati di misura dei carichi idraulici in perforazioni sia nel settore di monte del gruppo sorgentizio (dati Alto Calore S.p.A.) sia in quello di valle (piana telesina, dati Comune di Telese). Sulla base dei pochi rilievi piezometrici eseguiti nei pozzi di monte, il gradiente della falda risulta molto basso, ($<1\%$).

In alcune perforazioni effettuate a valle del gruppo sorgentizio, è emersa una circolazione idrica in pressione, in alcuni punti con carico idraulico di diversi metri al disopra del p.c., con quote di alcuni metri maggiori dei 57 m s.l.m. delle sorgenti del Rio Grassano (dati geognostici dei piani urbanistici del Comune di Telese). Per quest'area sono in corso rilievi specifici per la misura precisa dei carichi idraulici, al fine di una precisa ricostruzione dei flussi ascendenti. Ad ogni modo, la circolazione idrica sotterranea dell'area può essere riferita allo schema di figura 10 valido per sorgenti emergenti

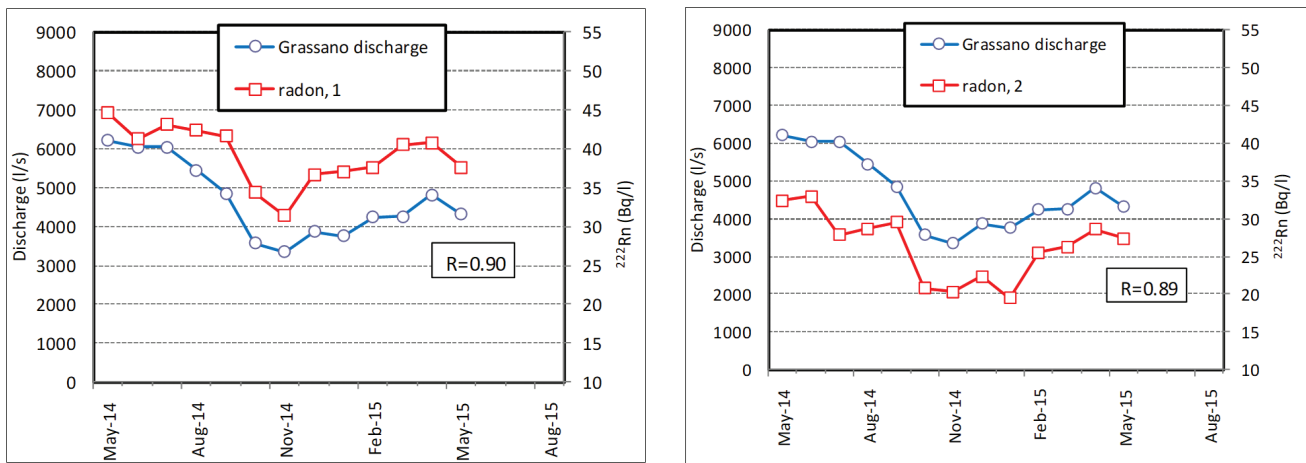


Fig. 9 - Misure di Radon (^{222}Rn) in due differenti recapiti sorgivi (1 e 2) del Rio Grassano e portata totale; misure mensili del periodo Maggio 2014-Maggio 2015.

Fig. 9 - Radon (^{222}Rn) activity measured in the two distinct spring outlet (1 and 2) of the Grassano springs, and overall Grassano spring discharge; monthly measurements from May 2014 to May 2015.

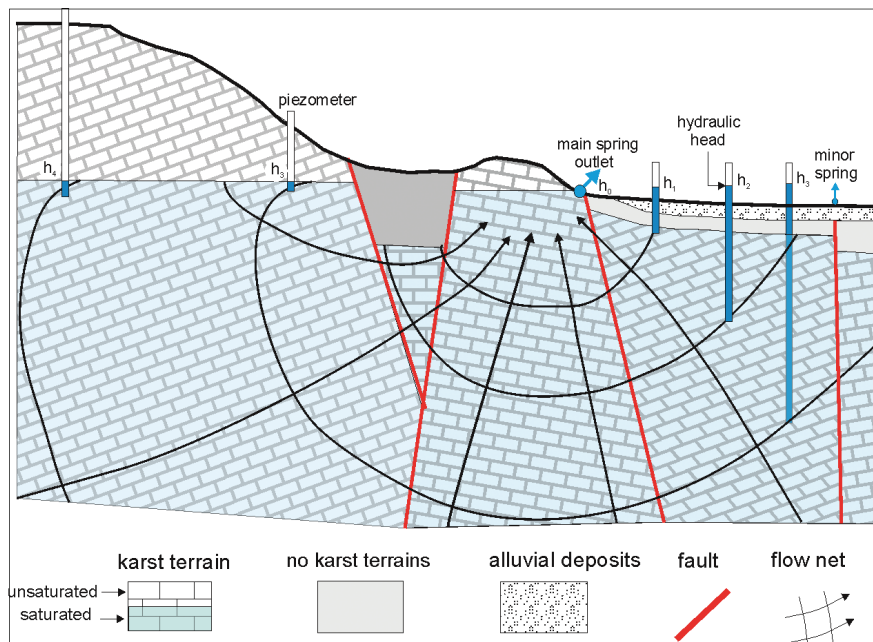


Fig. 10 - Schema generico di circolazione idrica sotterranea (dettaglio di Figura 1b), con rete di flusso ricostruita sulla base dei carichi idraulici misurati in pozzi a monte e a valle della sorgente principale.

Fig. 10 - General sketch of the groundwater path (detail of Figure 1b), with flow net deducted from hydraulic heads detected into piezometers located uphill and downhill main spring outlet.

da blocchi/rilievi carbonatici disgiunti tettonicamente dalle porzioni principali dei massicci carbonatici che costituiscono la principale area di ricarica della falda; si osserva (i) un basso gradiente della falda nel settore di monte che difficilmente giustifica una elevata portata al gruppo sorgentizio mediante un flusso a prevalente componente orizzontale, (ii) nel settore di valle un carico idraulico maggiore della quota delle sorgenti che meglio spiega un flusso ascendente.

Subito ad est del gruppo sorgivo di Grassano, nell'abitato di Telesse, sono presenti alcune polle sorgive dai caratteri geochemici molto diversi per l'elevato contenuto di zolfo (Corniello e De Riso 1986). Queste acque, provenienti da un circuito diverso e di origine probabilmente ancora più profonda, ben si inquadrano in un'ottica di flussi ascendenti.

E' interessante far notare, inoltre, che l'intero rilievo di Montepugliano è interessato da una serie di doline da crollo

(collapse sinkholes) la cui concentrazione non trova riscontro in altre aree del Matese e la cui origine è da connettere proprio con flussi ascendenti di acque che in passato erano con ogni probabilità più aggressive di quelle attuali per maggior presenza di CO_2 o di H_2S .

La sorgente Sanità di Caposele

Questa sorgente è ubicata alla sommità del bacino del fiume Sele, alla quota di 417 m s.l.m., lungo il bordo nord-orientale dei monti Picentini (Fig. 11). Il bacino di alimentazione è costituito prevalentemente dal massiccio carbonatico del M.te Cervialto, ed include l'ampia area endoreica del Piano Laceno (Fiorillo et al. 2015b). La portata media annua è di circa $4,0 \text{ m}^3/\text{s}$. La sorgente fu captata agli inizi dello scorso secolo ed alimenta l'acquedotto Pugliese, unitamente con parte del gruppo sorgentizio di Cassano Irpino (AV).

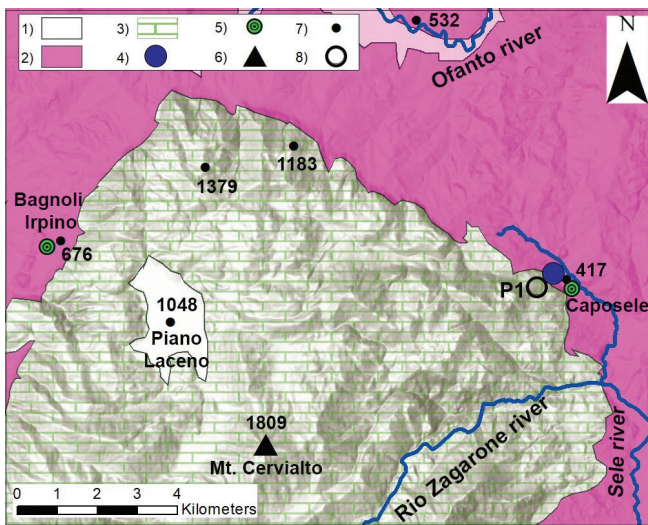


Fig. 11 - Inquadramento dell'area di alimentazione della sorgente di Caposele: 1) Depositi alluvionali (quaternario), 2) Flysch (Paleogene-Miocene), 3) Serie calcareo-dolomitica (Giurassico - Miocene), 4) sorgente di Caposele, 5) centri abitati, 6) vetta, 7) punti quotati, 8) pozzo/area pozzi.

Fig. 11 - Overview of recharge area of Caposele springs: 1) Alluvial deposits (Quaternary), 2) Flysch sequences (Paleogene - Miocene), 3) calcareous-dolomite series (Jurassic-Miocene), 4) Caposele spring, 5) village, 6) mountain peak, 7) elevation (m. a.s.l.), 8) borehole/wells area.

Dal punto di vista idrogeologico, la sorgente ha origine lungo il contatto tettonico per faglia tra i terreni carbonatici mesozoici di piattaforma e materiali terrigeni neogenici di bacino (Celico e Civita 1976). La sorgente può essere riferita allo schema della figura 1c, ove la circolazione nei terreni carbonatici è costretta ad emergere per effetto del tamponamento operato dai materiali impermeabili dei depositi terrigeni; in questo caso la circolazione idrica è tettonicamente controllata da una zona a più bassa permeabilità che condiziona inevitabilmente il carico idraulico della sorgente (Petrella et al. 2014; Petitta et al. 2018).

Per questa sorgente la probabile origine profonda delle acque può essere attestata dalle caratteristiche fisico-chimiche delle acque, che presentano una straordinaria costanza durante l'anno idrologico.

In Figura 12 è possibile notare come la temperatura dell'acqua sia costantemente intorno al valore di 8.8-9.0 °C, valore inferiore a quello delle acque di Serino e Grassano per effetto di una quota media del bacino più alta.

La conducibilità presenta valori compresi tra 210-300 $\mu\text{S}/\text{cm}$, ad indicare una costanza ed uno scarso contenuto salino, ancor meno delle acque di Serino. Il pH, analogamente, risulta piuttosto costante, con valori tra 7 e 8.

La costanza delle caratteristiche fisico-chimiche delle acque è meglio interpretabile con una circolazione profonda delle acque, analogamente a quanto riscontrato per il gruppo di Serino e di Grassano.

Conclusioni

Lo studio vuole mettere in evidenza la particolarità delle condizioni idrauliche di alimentazione di alcune principali sorgenti carsiche dell'Italia meridionale legata a flussi ascendenti delle acque sotterranee, comune con ogni probabilità ad altre sorgenti dalle caratteristiche idrogeologiche analoghe.

In condizioni di artesianesimo, il moto ascendente dei flussi idrici alimentanti gruppi sorgivi è stato descritto per molti casi in Appennino meridionale, come per la sorgente Torbido in Basilicata (D'Ecclesiis e Polemio 1994) e per molte sorgenti termali come quelle di Contursi (Celico et al. 1979).

Per le grandi sorgenti basali degli acquiferi carsici dell'Appennino meridionale, con circolazione non confinata della falda, l'alimentazione di tali sorgenti mediante un flusso ascendente non è stata sempre ben definita nella letteratura italiana, poiché il flusso è stato associato, perlopiù, a moti a prevalente componente orizzontale. Si riporta ad esempio quanto descritto circa la modalità di alimentazione di alcuni sorgenti, quelle di Mercato e Palazzo di Sarno (SA), da parte di Nicotera e Civita (1969): "al disotto del livello delle emergenze si crea, inoltre una subzona nella quale l'acqua sotterranea che riempie i meati della roccia può dirsi praticamente immobile, spostandosi verso le emergenze soltanto eccezionalmente, sotto la sollecitazione di un'onda di pressione proveniente dall'alto (precipitazioni abbondanti e concentrate). Tale acqua immobile permea anche la massa carsica

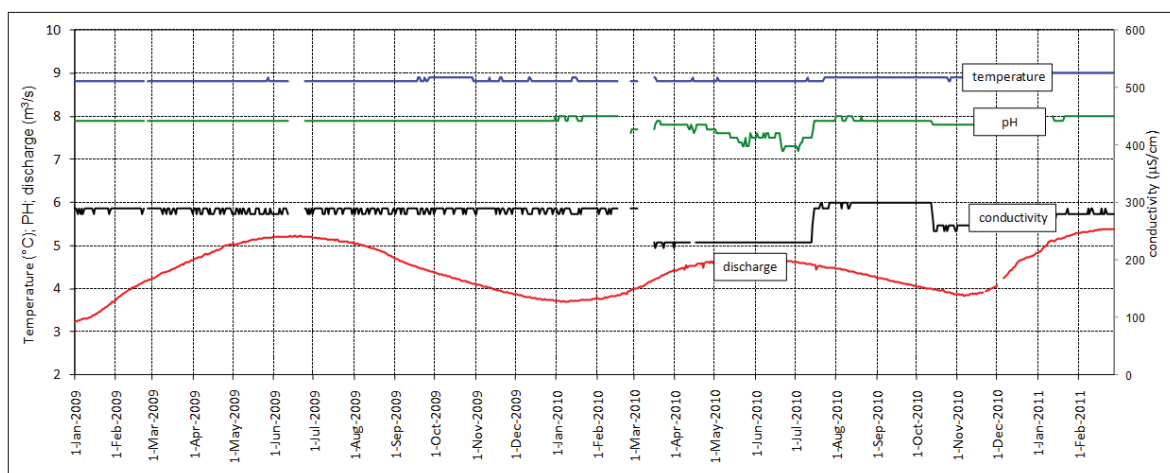


Fig. 12 - Dati giornalieri di portata, temperatura, pH, salinità e conducibilità elettrica della sorgente Caposele, periodo 1 Gennaio 2009 – 27 Febbraio 2011.

Fig. 12 - Daily values of discharge, temperature, pH, salinity and electrical conductivity of Caposele spring; monitoring period 1 January 2009 – 27 February 2011.

ormai tamponata e ricoperta dai terreni a scarsa permeabilità, costituendo le così dette riserve geologiche dell'acquifero." Queste grandi sorgenti basali, con portata di alcune migliaia di litri al secondo, sulla base della ricostruzione idrogeologica e della locale piezometria riportate in Nicotera e Civita (1969), possono essere riferite allo schema di figura 10

Senza alcun spirito critico rispetto a quanto riportato dai succitati Autori, maestri indiscussi e pionieri dell'Idrogeologia in Italia, è evidente la profonda e diversa visione delle modalità di alimentazione di molte delle grandi sorgenti basali dell'Appennino rispetto alle iniziali interpretazioni

Di seguito sono riassunti alcuni principali indizi utili per la individuazione di un flusso ascendente alimentante le sorgenti basali nei sistemi carsici dell'Appennino:

- negli acquiferi confinati alimentanti le sorgenti in superficie (esempio di Serino), il carico idraulico aumenta con la profondità ed è indice di un flusso ascendente;
- negli acquiferi liberi, il basso gradiente della superficie della falda (esempio di Caposele) può non giustificare le elevate portate alla sorgente basale e potrebbe essere indice, in realtà, di flussi ascendenti che alimentano la sorgente stessa;
- nel settore a valle della sorgente, la presenza di un carico idraulico maggiore della quota della sorgente stessa (esempio delle sorgenti del Rio Grassano) difficilmente può spiegarsi con un flusso a prevalente componente orizzontale.

Oltre i suddetti indizi di carattere idraulico, alcuni importanti aspetti di carattere chimico-fisico delle acque possono essere preziosi indicatori della presenza di flussi ascendenti, quali la quasi costanza della temperatura e della salinità delle acque sorgive durante l'anno idrologico, a causa dei grandi volumi dell'acquifero interessati dal moto delle acque sotterranee. Viceversa, come anche discusso in Fiorillo et al. (2018), la variazione di concentrazione di radon durante l'anno, sembrerebbe ben spiegarsi con una maggiore o minore velocità del moto ascendente delle acque.

Ringraziamenti: Gli autori ringraziano gli Acquedotti Acqua Bene Comune (Napoli), Alto Calore Servizi (Avellino) e Acquedotto Pugliese (Bari) per aver fornito alcuni dati idrologici e chimici. Un ringraziamento particolare va anche al Prof. Domenico Cicchella dell'Università del Sannio per il supporto fornito durante le misure dell'attività del Radon.

BIBLIOGRAFIA

- Aquino S, Esposito L, Bruno R, Panza R (2005) Analisi geoambientale sulle acque del torrente Fenestrelle-Rigatore (Avellino-Campania) "Geo-environmental analysis on Fenestrelle-Rigatore river (Avellino-Campania)" - Atti di GEOITALIA - Spoleto, Quinto Forum Italiano di Scienze della Terra.
- Blyth F.G.H, De Freitas MH (1984) A Geology for Engineers, 7th ed.; Arnould Ed.: London, UK; 325p.
- Celico P, Civita V (1976) Sulla tettonica del massiccio del Cervialto (Campania) e le implicazioni idrogeologiche ad esso connesse "About tectonics of Cervialto massif (Campania) and its hydrogeological implications." Boll. Soc. Nut. in Napoli. Napoli, Italy, 85, 555-580.
- Celico P, Russo D, (1981) Studi idrogeologici sulla Piana del Dragone (Avellino) "Hydrogeological study on Dragone Plain." Boll. Soc. Natur. in Napoli, 90: 37-50, Napoli.
- Celico P, De Gennaro M, Ghiara M, Stanzione D (1979) Le sorgenti termominerali della valle del Sele (Salerno): Indagini Strutturali, Idrogeologiche e Geochimiche "Thermo-mineral springs of Sele valley (Salerno): Structural, Hydrogeological and Geochemical surveys."- Rendiconti Società Ital. di Mineralogia E Petrologia, 35 (1), 389-409.
- Celico P, Magnano F, Monaco L (1982) Prove di Colorazione del Massiccio Carbonatico del Monte Terminio-Monte Tuoro "Tracer test of Terminio-Tuoro karst massifs" Notiziario Club Alpino Italiano: Napoli, Italy; 46, pp. 73-79.
- Civita M (1969) Idrogeologia del Massiccio del Terminio-Tuoro (Campania) "Hydrogeology of Terminio-Tuoro massif"; Memorie e Note Istituto di Geologia Applicata: Napoli, Italy; Volume 11, pp. 5-102.
- Civita M (2005) Idrogeologia applicata e ambientale "Applied and Environmental Hydrogeology", Ed. Ambrosiana, 736 pp.
- Corniello A, De Riso R (1986) Idrogeologia ed idrochimica delle sorgenti dell'Agro Telesino (Benevento) "Hydrogeology and hydrochemistry of Agro-Telesino springs". Geologia Applicata ed Idrogeologia, 21: 53-84.
- Cotecchia V, D'Ecclesiis G, Polemio M (1993) High pressure artesian wells to tap Torbido Spring, Italy - Environmental Management, Geo-Water & Engineering Aspects. Chowdhury & Sivakumar (eds), Balkema, 413-418.
- D'Ecclesiis G, Polemio M (1994) Condizioni di emergenza di alcune tra le principali scaturigini della Basilicata "Outlet conditions of some main springs of Basilicata." Geologica Romana, 30, 105-112.
- Domenico PA, Schwartz FW (1990) Physical and Chemical Hydrogeology; John Wiley & Sons: Singapore, 824p.
- Fiorillo F, Esposito L, Guadagno FM (2007) Analyses and forecast of the water resource in an ultra-centenarian spring discharge series from Serino (Southern Italy). J. Hydrol., 36, 125-138.
- Fiorillo F, Petitta M, Preziosi E, Rusi S, Esposito L, Tallini M, (2015a) Long-term trend and fluctuations of karst spring discharge in a Mediterranean area (central-southern Italy). Environ. Earth Sci., 74, 153-172.
- Fiorillo F, Pagnozzi M, Ventafridda G, (2015b) A model to simulate recharge processes of karst massifs. Hydrol. Process, 29, 2301-2314.
- Fiorillo F, Pagnozzi M, (2015) Recharge process of Matese karst massif (southern Italy). Environmental Earth Sciences 74, 7557-7570.
- Fiorillo F, Esposito L, Testa G, Ciarcia S, Pagnozzi M, (2018) The Upwelling Water Flux Feeding Springs: Hydrogeological and Hydraulic Features, Water 10, 501.
- Hubbert MK (1940) The theory of groundwater motion. J. Geol. 48, 785-944.
- Kiraly, L. (2002) - Karstification and Groundwater Flow. In Evolution of Karst: From Prekarst to Cessation; Gabrovsek, F., Ed.; Zalozba ZRC: Ljubljana, Slovenia, pp. 155-190.
- Martínez-Santos P, Díaz-Alcaide S, Castaño-Castaño S, Hernández-Espriú A, (2014) Modelling discharge through artesian springs based on a high resolution piezometric network. Hydrol. Process., 28, 2251-2261.

- Nicotera P, Civita M, (1969) Ricerche idrogeologiche per la realizzazione delle opere di presa delle sorgenti Mercato e Palazzo (Sarno) “*Hydrogeological researches for the realization of tapping work of Mercato and Palazzo springs (Sarno)*”. Mem. E Note dell’Istituto di Geologia applicata, Napoli, vol. XI.
- Palmer AN, Audra P, (2004) Patterns of caves. In *Encyclopedia of Cave and Karst Science*; Gunn, J., Ed.; Fitzroy Dearborn: London, UK; pp. 573–574.
- Petitta M, Mastrorillo L, Preziosi E, Banzato F, Barberio MD, Billi A, Cambi C, De Luca G, Di Carlo G, Di Curzio D, Di Salvo C, Nanni T, Palpacelli S, Rusi S, Saroli M, Tallini M, Tazioli A, Valigi D, Vivalda P, Doglioni C, (2018) Water-table and discharge changes associated with the 2016–2017 seismic sequence in central Italy: hydrogeological data and a conceptual model for fractured carbonate aquifers - *Hydrogeology Journal* -<https://doi.org/10.1007/s10040-017-1717-7>
- Petrella E, Aquino D, Fiorillo F, Celico F, (2014) The effect of low-permeability fault zones on groundwater flow in a compartmentalized system. Experimental evidence from a carbonate aquifer (Southern Italy) *Hydrological Processes*,29, 1577-1587.
- Stevanovic Z, Kresic N, (2009) *Groundwater Hydrology of Springs*; Butterworth Heinemann-Elsevier: Oxford, UK, 592p.
- Todd DK, Mays LW,(2005) *Groundwater Hydrology*; Wiley: Chichester, UK; 636p.
- Toth J, (1963) A theoretical analyses groundwater flow in small drainage basins. *J. Geophys. Res.*, 68, 4795–4812.