

LA RECESSIONE DEGLI IDROGRAMMI SORGIVI ED ANALISI DELLA SORGENTE CAPOSELE (ITALIA MERIDIONALE) DURANTE I PERIODI SECCHI

SPRING HYDROGRAPHS RECESSION AND ANALYSIS OF THE CAPOSELE SPRING (SOUTHERN ITALY) DURING DRY PERIODS

FRANCESCO FIORILLO

University of Sannio, Dipartimento di Scienze e Tecnologie - Via dei Mulini 59/A - 82100 Benevento (Italy)
E-mail: francesco.fiorillo@unisannio.it

RIASSUNTO

Sono stati analizzati gli idrogrammi della sorgente Caposele (Campania) durante i periodi di recessione degli ultimi anni di misurazione della portata. Nel diagramma semilogaritmico, log (portata)-tempo, è stata individuata la retta di interpolazione dei dati e quindi il coefficiente di recessione per ciascuno degli anni considerati. E' stata riscontrata una correlazione positiva tra il coefficiente di recessione e la portata all'inizio del periodo di svuotamento. Per le sorgenti basali, questo comportamento idraulico è stato spiegato con il modello di FIORILLO (2011), che evidenzia come il rapporto tra due differenti valori del coefficiente di recessione può essere approssimato al rapporto inverso tra le porosità effettive calcolate lungo la superficie della falda ($\alpha^I / \alpha^{III} \approx n_{eff}^{III} / n_{eff}^I$). Il livello della falda in un pozzo ubicato all'interno del bacino della sorgente ha fornito informazioni sulla distribuzione dell'acqua nella zona epifreatica. I risultati aiutano a comprendere il comportamento idraulico degli acquiferi carsici durante il loro svuotamento e avere utili informazioni sulla più razionale gestione delle sorgenti alimentate da acquiferi carsici/carbonatici.

TERMINI CHIAVE: portata sorgiva, acquifero carsico/carbonatico, coefficiente di recessione, Italia

INTRODUZIONE

Gli acquiferi carsici hanno una grande importanza per l'approvvigionamento idrico, in quanto le relative sorgenti sono talvolta caratterizzate da cospicue portate e captate per scopi commerciali e pubblici (WHITE, 1988; BAKALOWICZ, 2005; FORD & WILLIAM, 2007; GOLDSCHIEDER & DREW, 2007).

Durante l'assenza di ricarica, la portata sorgiva decresce fino al successivo evento di ricarica; in particolare, durante i periodi secchi gli idrogrammi sorgivi mostrano un trend in continuo decremento noto come *recession limb*. La parte meno pendente, alla fine dell'idrogramma, è nota come *baseflow*. Questo tratto dell'idrogramma è considerato dipendere da alcune fondamentali caratteristiche idrauliche e geometriche degli acquiferi (SCHOELLER, 1965; FORKASIEWICZ & PALOC, 1967; MIJATOVIC, 1968; TORBAROV, 1975; MILANOVIC, 1976; ATKINSON, 1977; BONACCI, 1993; EISENLOHR *et alii*, 1997; KRESIC & BONACCI, 2010).

ABSTRACT

Hydrographs of the Caposele karst spring (Campania, Southern Italy) during the recession period have been analysed for last several years. A straight line was fitted to a semilogarithmic plot (log-discharge versus time), and the recession coefficient (the slope of the line generated from the equation) was calculated for each year considered. It has been found that the recession coefficient has positive a high correlation with discharge at the beginning of the recession period. For basal spring, this hydraulic behaviors has been explained by the model of FIORILLO (2011), who point out how the ratio between two different values of the recession coefficient obtained by the semilogarithmic plot can be approximated to the inverse ratio of the effective porosity computed along the surface of the water table ($\alpha^I / \alpha^{III} \approx n_{eff}^{III} / n_{eff}^I$). Water level of a monitored well inside the karst catchment was also assessed and provided information on the water distribution into aquifers. Results describe the hydraulic behavior of karst aquifers during their emptying and provide information for better management of karst springs.

KEY WORDS: spring discharge, recession coefficient, karst/carbonatic aquifer, Italy

INTRODUCTION

Karst aquifers have a fundamental importance for water supply, and large springs are often exploited for commercial and public water supplies (WHITE, 1988; BAKALOWICZ, 2005; FORD & WILLIAM, 2007; GOLDSCHIEDER & DREW, 2007).

During the period of no recharge, spring discharge decreases until the following recharge event. In particular, during dry periods spring hydrographs show a continuous decreasing trend that is known as a *recession limb*; the nearly flat part at the end of the recession limb is known as *baseflow*. The recession limb is believed to express some fundamental hydraulic and geometric characteristics of aquifers (SCHOELLER, 1965; FORKASIEWICZ & PALOC, 1967; MIJATOVIC, 1968; TORBAROV, 1975; MILANOVIC, 1976; ATKINSON, 1977; BONACCI, 1993; EISENLOHR *et alii*, 1997; KRESIC & BONACCI, 2010).

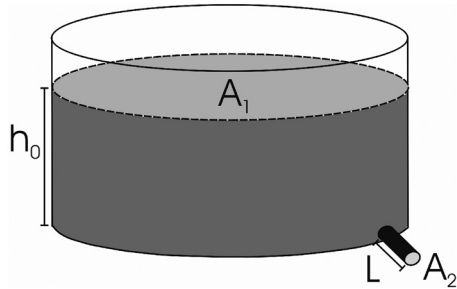


Fig. 1 - Serbatoio cilindrico, con area di base A_1 (FIORILLO, 2011). Lo scarico avviene attraverso un tubo-foro di sezione A_2 ubicato al fondo, partendo da un'altezza iniziale dell'acqua h_0 .
 - Cylindrical tank-reservoir, with base area A_1 (FIORILLO, 2011). Discharge occurs through a bottom hole of section A_2 , starting from an initial water height h_0 .

FIORILLO (2011) ha sviluppato un semplice modello idrogeologico che spiega il comportamento degli acquiferi carsici durante lo svuotamento e ha discusso altri modelli che analizzano gli idrogrammi sorgivi durante la fase di recessione, come quello di FORKASIEWICZ & PALOC (1967), MANGIN (1975), KOVACS *et alii*, (2005), e KOVÁCS & PERROCHET (2008).

Sulle basi di questo modello, la portata giornaliera della sorgente Caposele viene utilizzata al fine di valutare il comportamento idraulico dell'acquifero durante i periodi secchi. All'interno del bacino della sorgente, il monitoraggio di un pozzo ha permesso di verificare il modello proposto.

MODELLO DI DRENAGGIO DI UN SERBATOIO SEMPLICE O COMPOSITO

FIORILLO (2011) ha simulato il drenaggio di un serbatoio cilindrico riempito d'acqua utilizzando leggi fisiche diverse e tentato di connettere il comportamento idraulico di un serbatoio composito (Fig.2a) con quello di un acquifero carsico reale. In questo modello il drenaggio si verifica tramite un tubo-foro di lunghezza L , ubicato al fondo del serbatoio; le equazioni che descrivono la portata sono state relazionate alla geometria del serbatoio ed alle caratteristiche del tubo-foro.

Il ruolo della viscosità dell'acqua decresce se l'area del tubo-foro, A_2 , diviene grande. Se l'area A_2 è sufficientemente ampia, la viscosità dell'acqua può essere ignorata ed il drenaggio si verifica in termini di *velocità di efflusso di Torricelli*.

Se l'area del tubo-foro, A_2 , è piccola, la viscosità dell'acqua non può essere ignorata ed il drenaggio può essere analizzato con la legge di *Poiseuille*. Se si riempie il tubo-foro con sabbia, il drenaggio può essere analizzato con la legge di *Darcy*.

I sistemi di drenaggio così descritti, sono stati denominati rispettivamente serbatoio *Torricelli*, *Poiseuille* o *Darcy*. Partendo da una iniziale altezza d'acqua nel serbatoio, h_0 , ed applicando il principio di conservazione dell'energia, nel caso di un *serbatoio Torricelli* l'espressione analitica della portata è una funzione lineare del tempo (FIORILLO, 2011):

$$Q(t) = A_2 \sqrt{2g \cdot h_0} \cdot -\alpha_T \cdot t \quad (1)$$

dove

where

$$\alpha_T = \frac{A_2^2}{A_1} g \quad (2)$$

FIORILLO (2011) provides a simple hydrogeological model explaining the behavior of the karst aquifer during emptying and also discusses other models that predict the shape of the spring hydrograph in the semilogarithmic plot, such as those of FORKASIEWICZ & PALOC (1967), MANGIN (1975), KOVACS *et alii*, (2005), and KOVÁCS AND PERROCHET (2008).

On the basis of Fiorillo's model (2011), daily discharge measurements of Caposele spring (Campania, southern Italy) have been analyzed. Data from a monitoring-well inside the karst catchment have been also considered, allowing to check the model used.

DRAINAGE MODEL OF A SIMPLE AND COMPOSITE TANK-RESERVOIR

FIORILLO (2011) simulated the drainage of a simple water-filled tank (Fig.1) by different physical laws, and tried to connected the hydraulic behaviour of a composite water-filled tank (Fig.2a) to actual karst aquifers. In this model, the drainage occurs by a hole, with area A_2 and length L , located at the bottom of the tank, and analytical expressions are computed in relation to the geometry of the tank and to the type of hole, using different physical laws.

The role of the water viscosity decreases if the area of the hole, A_2 , increases. If the area A_2 is sufficiently wide, the water viscosity can be ignored and drainage occurs in terms of *Torricelli efflux velocity*.

If the area of the hole, A_2 , is small, the water viscosity effect cannot be ignored, and drainage can be analysed by the *Poiseuille* law. Filling the tank-connected tube with sand, the drainage can also be modelled using *Darcy's* law.

The above different tank-drainage systems have been called *Torricelli*, *Poiseuille* and *Darcy* reservoir, respectively.

Starting from an initial water height, h_0 , into the tank-reservoir, and applying the principle of energy conservation, in the case of *Torricelli reservoir* the following formula describe the drainage (FIORILLO, 2011):

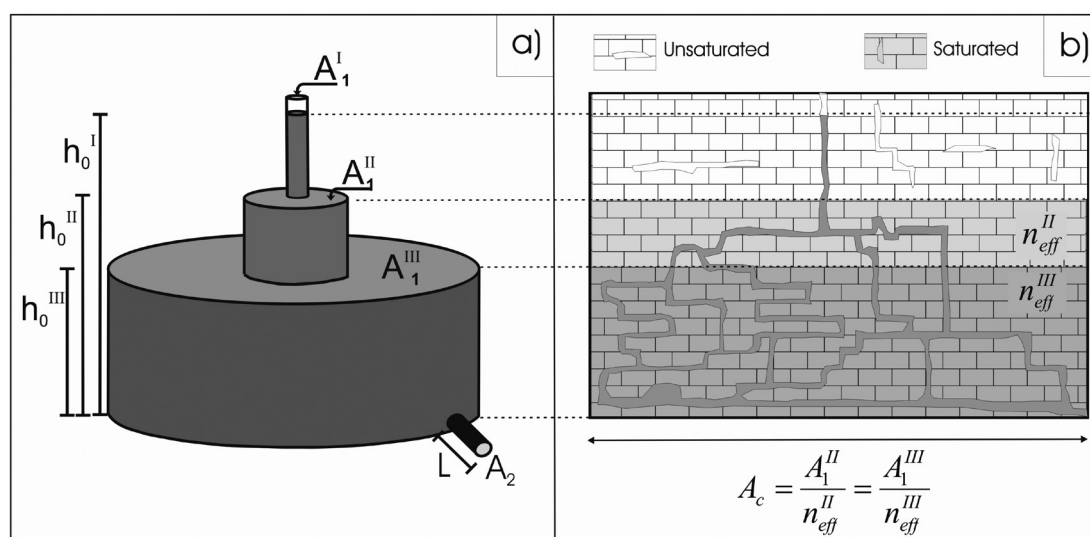


Fig. 2 - a) Serbatoio cilindrico composto, con differenti basi A_1 (Fiorillo, 2011). Lo scarico si verifica attraverso un tubo-foro di sezione A_2 ubicato al fondo, partendo da un' iniziale altezza dell'acqua h_0^I . b) Schema del corrispondente acquifero carsico con area della tavola d'acqua A_c . La parte insatura dell'acquifero presenta un pozzo parzialmente riempito d'acqua; la zona saturata è caratterizzata da una rete di condotti saturi all'interno di due distinte zone sovrapposte a diversa porosità effettiva, con $n_{eff}^{III} > n_{eff}^{II}$.

- a) Composite cylindrical tank-reservoir; with different bases A_1 (Fiorillo, 2011). Water discharge occurs through a bottom hole of section A_2 , starting from an initial water height h_0^I . b) Scheme of the corresponding karst aquifer with water-table area A_c . Unsaturated aquifer presents a filled shaft, and saturated aquifer is characterised by two distinct superimposed effective porosity zones, $n_{eff}^{III} > n_{eff}^{II}$, with a saturated karst conduits net (dark-grey).

Il parametro α_T ha dimensioni $[L^3 \cdot T^{-2}]$ ed esprime la rapidità di svuotamento del serbatoio. Esso è proporzionale alla seconda potenza della sezione del tubo-foro, A_2 , ed è inversamente proporzionale alla base A_1 del serbatoio; g è l'accelerazione di gravità.

La caratteristica del *serbatoio Torricelli* è il decremento lineare della portata con il tempo, la cui rappresentazione nel grafico aritmetico ($Q-t$) fornisce sempre la stessa pendenza indipendentemente dall'altezza iniziale, h_0 . L'equazione 2 definisce il drenaggio in assenza di perdita di energia e determina tratti rettilinei dell'idrogramma di recessione. Questo tipo di drenaggio si verifica quando larghi condotti carsici drenano temporaneamente cavità carsiche riempite d'acqua o vaste aree come poljes inondate. In questi casi, α_T fornisce dettagli sulla geometria dei poljes/cavità e sulla sezione dei condotti. BONACCI (1987) ha proposto una simile equazione per valutare il drenaggio operato da condotti e BAILLY-COMTE *et alii*, (2010) descrivono una simile espressione del drenaggio per simulare alcuni acquiferi carsici.

Lo svuotamento completo del *serbatoio Torricelli* si verifica al tempo $t = t_E$ ed è ottenuto uguagliando a zero l'equazione 1:

$$t_E = \frac{A_1}{A_2} \sqrt{\frac{2h_0}{g}} \tag{3}$$

Nel *serbatoio Darcy* il tubo-foro ha sezione costante A_2 e lunghezza L ed è riempito da sabbia con conducibilità idraulica K ; siccome sono considerate la viscosità del fluido e le forze di attrito, parte

The parameter α_T has a dimension of $[L^3 \cdot T^{-2}]$ and expresses the rate of drainage of the Torricelli reservoir. It is proportional to the second power of the hole cross-section A_2 , and it is inversely proportional to the base, A_1 , of the tank-reservoir (g , gravity acceleration).

The characteristic of the *Torricelli reservoir* is the linear decrease of discharge with time; the main consequence of this behaviour is the constant slope of the discharge-time plot at any time and independent of the initial height h_0 . It defines the drainage without energy loss. It is possible to state that free drainage causes a linear segment in the recession limb of the hydrographs. Large karst conduits, draining zones of temporary water storage, such as poljes and karst caves, can be modelled by a Torricelli reservoir. In these cases, α_T provides details on the geometry of the poljes/caves and of sections of conduits. BONACCI (1987) provided a similar analytical expression to evaluate karst spring discharge by the groundwater level and hydraulic cross section of the conduit, and BAILLY-COMTE *et alii*, (2010) found a similar expression to simulate drainage of some karst aquifers.

Complete emptying of the *Torricelli reservoir* occurs at the time $t = t_E$ (t_E represents emptying) and can be obtained by equalizing to zero the Equation 1:

In the *Darcy reservoir* the tank-connected tube having constant section A_2 , and length L , is filled by sand with hydraulic conductivity K ; as viscosity of the fluid and friction forces have to

dell'energia viene dissipata durante il drenaggio. Partendo dall'applicazione del principio di conservazione del volume ed applicando la legge di Darcy, l'equazione seguente descrive la portata di scarico dal serbatoio (FIORILLO, 2011):

$$Q(t) = Q_0 \cdot e^{-\alpha_D t} \quad (4)$$

dove

where

$$Q_0 = \frac{KA_z h_0}{L} \quad (5)$$

$$\alpha_D = \frac{K}{L} \frac{A_2}{A_1} \quad (6)$$

Il parametro α_D ha dimensioni $[T^{-1}]$ ed esprime le caratteristiche di drenaggio del *serbatoio Darcy*.

Se il foro del serbatoio ha una piccola area A_2 , la viscosità dell'acqua può essere considerata applicando la legge di *Poiseuille*; in questo caso, partendo dall'applicazione del principio di conservazione del volume, la seguente equazione descrive la portata di scarico dal serbatoio (FIORILLO, 2011):

$$Q(t) = Q_0 \cdot e^{-\alpha_P t} \quad (7)$$

dove:

where:

$$\alpha_P = n \cdot \frac{\pi \cdot d^4 \cdot \rho \cdot g}{128 \cdot L \cdot \mu \cdot A_1} \quad (8)$$

$$Q_0 = n \cdot \frac{\pi d^4 \rho g}{128 \mu} \cdot \frac{h_0}{L} \quad (9)$$

Il parametro α_P ha dimensioni $[T^{-1}]$ ed esprime le caratteristiche di drenaggio del *serbatoio Poiseuille*; il parametro d è il diametro del tubo, μ è la viscosità dinamica dell'acqua e ρ è la densità dell'acqua.

Le equazioni 4 e 7 sono quella di MAILLET (1905) e corrispondono a quelle di un *serbatoio lineare*, dove la portata, $Q(t)$, è proporzionale in ogni momento al volume d'acqua immagazzinato $W(t)$:

$$Q(t) = \alpha \cdot W(t) \quad (10)$$

Nel serbatoio lineare la portata diminuisce esponenzialmente con il tempo ed è nulla al tempo $t = \infty$. Nel diagramma semilogaritmico, l'idrogramma appare come una linea retta con angolo d'inclinazione $\arctg(\alpha)$. Inoltre, nel serbatoio lineare il dimezzamento del valore della portata si verifica ad un tempo $t_{1/2}$, che è:

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\alpha} \quad (11)$$

Considerato che la conducibilità idraulica, K , è espressa da (TODD & MAYS, 2005):

Consider that the hydraulic conductivity, K , is expressed by (TODD & MAYS, 2005):

$$K = \frac{\rho g k_i}{\mu} \quad (12)$$

dove k_i è la *permeabilità intrinseca* di un materiale con dimensioni $[L^2]$. Se si uguagliano le equazioni 6 e 8 si ottiene (FIORILLO, 2011):

where k_i is the *intrinsic permeability* of the material with dimension $[L^2]$. Equalizing Equations 6 and 8 gives (FIORILLO, 2011):

$$A_2 \cdot k_i \cong 0.4 \cdot n \cdot d^4 \quad (13)$$

che fornisce un confronto tra il drenaggio di un *serbatoio Darcy* con un *serbatoio Poiseuille*.

which allow a comparison between *Poiseuille* and *Darcy* tank-reservoir drainage.

Le equazioni del coefficiente di recessione (Equazioni 2, 6 e 8) possono essere ridotte a:

$$\alpha = \frac{c}{A_1} \tag{14}$$

dove c è una costante idraulica, specifica delle condizioni di scarico di ciascun serbatoio (Tab. 1), indipendentemente dalla sua area di base e dalla pressione dell'acqua al suo interno. La costante idraulica, c , costituisce un parametro omnicomprendivo delle caratteristiche geometriche ed idrauliche che regolano lo scarico dell'acquifero.

Il serbatoio è stato adattato per valutare gli effetti del cambiamento dell'area, A_1 , durante il processo di scarico. In particolare, è stato considerato un serbatoio che presenta un incremento della sezione dell'area di base da $A_1^I \rightarrow A_1^{II} \rightarrow A_1^{III}$ in corrispondenza di specifici livelli dell'acqua (h_0^I, h_0^{II} and h_0^{III}). Durante il drenaggio, il valore del coefficiente di recessione cambia in corrispondenza del cambio dell'area A_1 del serbatoio.

La Fig. 3 mostra un esempio di drenaggio del serbatoio composto mostrato in Fig. 2a. Il cambio dell'area A_1 causa una variazione del coefficiente di recessione durante lo svuotamento e in questo caso (Fig.2a) si osserva un decremento di α durante il drenaggio. Indipendentemente dal modello usato (*serbatoio Torricelli* o *Lineare*), le seguenti relazioni possono essere dedotte per il serbatoio composto considerato (FIORILLO, 2011):

$$\frac{\alpha^I}{\alpha^{II}} = \frac{A_1^{II}}{A_1^I}; \quad \frac{\alpha^{II}}{\alpha^{III}} = \frac{A_1^{III}}{A_1^{II}} \tag{15}$$

The equations of the recession coefficient (Equations 2, 6 and 8) can be reduced as:

where c is an hydraulic constant, specific to the discharge conditions for each reservoir (Table 1), independent of its area and water pressure. The hydraulic constant, c , is a lumped parameter of the hole involving the geometric and hydraulic characteristics of the discharge zone.

The simple tank-reservoir model has been adapted to evaluate the effects of the change in area, A_1 , during the drainage process. In particular, an increase of area A_1 has been imposed (Fig.2a), and the changes are $A_1^I \rightarrow A_1^{II} \rightarrow A_1^{III}$ corresponding to specific water levels (h_0^I, h_0^{II} and h_0^{III}). During drainage, the value of the recession coefficient changes depending on the geometry of the reservoir.

Fig. 3 shows an example of drainage based on the composite tank-reservoir shown in Fig. 2a. The changing of the size area A_1 causes a variation of the coefficient of recession during drainage, and in this case (Fig.2a) a decrease of α is observed during drainage. Independent of the model used (*Torricelli* or *Linear reservoir*), the following relationship can be deduced for the tank-reservoirs considered (FIORILLO, 2011):

Parameters	Torricelli reservoir	Linear reservoir	
		Darcy reservoir	Poiseuille reservoir
c	$c_T = A_2^2 \cdot g$	$c_D = \frac{K \cdot A_2}{L}$	$c_P = \frac{n \cdot \pi \cdot d^4 \cdot \rho \cdot g}{128 \cdot L \cdot \mu}$
t_E^I $h_0^I \rightarrow h_0^{II}$	$t_E^I = \frac{A_1^I}{A_2} \sqrt{\frac{2}{g}} \cdot (\sqrt{h_0^I} - \sqrt{h_0^{II}})$	$t_E^I = \frac{A_1^I}{c_D} \cdot \ln \frac{h_0^I}{h_0^{II}}$	$t_E^I = \frac{A_1^I}{c_P} \cdot \ln \frac{h_0^I}{h_0^{II}}$
t_E^{II} $h_0^I \rightarrow h_0^{III}$	$t_E^{II} = t_E^I + \frac{A_1^{II}}{A_2} \sqrt{\frac{2}{g}} \cdot (\sqrt{h_0^{II}} - \sqrt{h_0^{III}})$	$t_E^{II} = t_E^I + \frac{A_1^{II}}{c_D} \cdot \ln \frac{h_0^{II}}{h_0^{III}}$	$t_E^{II} = t_E^I + \frac{A_1^{II}}{c_P} \cdot \ln \frac{h_0^{II}}{h_0^{III}}$
t_E^{III} $h_0^I \rightarrow 0$ $0 < h < h_0^{III}$	$t_E^{III} = t_E^{II} + \frac{A_1^{III}}{A_2} \sqrt{\frac{2 \cdot h_0^{III}}{g}}$	$t_E^{III} = t_E^{II} + \frac{A_1^{III}}{c_D} \cdot \ln \frac{h_0^{III}}{h}$	$t_E^{III} = t_E^{II} + \frac{A_1^{III}}{c_P} \cdot \ln \frac{h_0^{III}}{h}$
$\alpha^I \equiv \alpha_1$ $h_0^I \rightarrow h_0^{II}$	$\alpha_T^I = \frac{c_T}{A_1^I}$	$\alpha_D^I = \frac{c_D}{A_1^I}$	$\alpha_P^I = \frac{c_P}{A_1^I}$
$\alpha^{II} \equiv \alpha_2$ $h_0^{II} \rightarrow h_0^{III}$	$\alpha_T^{II} = \frac{c_T}{A_1^{II}}$	$\alpha_D^{II} = \frac{c_D}{A_1^{II}}$	$\alpha_P^{II} = \frac{c_P}{A_1^{II}}$
$\alpha^{III} \equiv \alpha_3$ $h_0^{III} \rightarrow 0$	$\alpha_T^{III} = \frac{c_T}{A_1^{III}}$	$\alpha_D^{III} = \frac{c_D}{A_1^{III}}$	$\alpha_P^{III} = \frac{c_P}{A_1^{III}}$

Tab. 1 - Parametri idraulici e fisici del serbatoio di Fig. 2a. c , costante idraulica; t_E , tempo di svuotamento; α , coefficiente di recessione (FIORILLO, 2011)
 - Physical and hydraulic parameters of the tank-reservoir drainage of Fig. 2a. c hydraulic constant; t_E emptying time; α recession coefficient

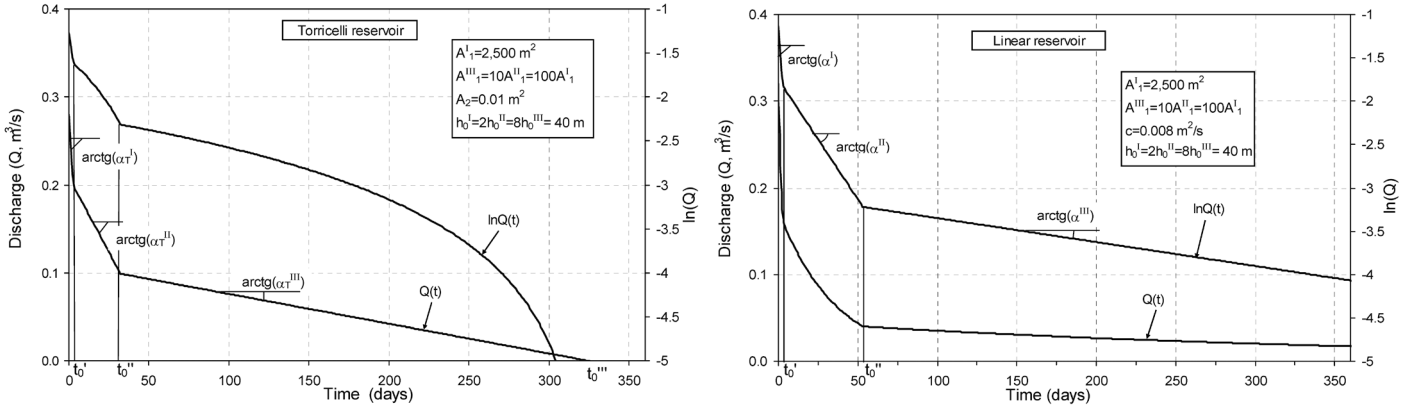


Fig. 3 - Drenaggio di un serbatoio composto, con differente area di base A_1 (FIORILLO, 2011). L'incremento dell'area A_1 ($A_1^I \rightarrow A_1^{II} \rightarrow A_1^{III}$) causa tre distinti segmenti nel diagramma portata-tempo (*serbatoio Torricelli*) o in quello semilogaritmico (*serbatoio lineare*), caratterizzati da differenti angoli d'inclinazione ($\arctg\alpha$). c è una costante idraulica del serbatoio lineare; A_2 , area della sezione del tubo-foro del *serbatoio Torricelli*; h_0 , altezza iniziale dell'acqua nel serbatoio

- Tank-reservoir drainage for composite cylindrical tank-reservoir; with different base areas, A_1 (FIORILLO, 2011). The increasing of area A_1 ($A_1^I \rightarrow A_1^{II} \rightarrow A_1^{III}$) causes three distinct segments of the discharge-time plot (*Torricelli reservoir*, in a) or $\ln(\text{discharge})$ -time plot (*Linear reservoir* in b), characterised by different slopes ($\arctg\alpha$). c is the hydraulic constant of the linear reservoir; A_2 , cross-section of the hole of the Torricelli tank-reservoir; h_0 , initial water height in the reservoir

L'equazione 15 evidenzia come la variazione del coefficiente di recessione, α , può essere semplicemente spiegata con la variazione dell'area A_1 , senza cambio di altre caratteristiche idrauliche del serbatoio.

Le proprietà del serbatoio composto aiutano a comprendere il drenaggio degli acquiferi carsici. In Fig. 2b, un pozzo/inghiottitoio simula la parte superiore di un serbatoio composto (cilindro con area A_1^I), mentre l'acquifero saturo è caratterizzato da due distinte zone sovrapposte a porosità effettiva diversa, con $n_{eff}^{III} > n_{eff}^{II}$. Durante il drenaggio, l'area della tavola d'acqua, A_c , è costante e ipotizzando che l'area del bacino coincide con quella occupata dalla tavola d'acqua, allora l'area A_1 è approssimativamente il prodotto dell'area del bacino, A_c , con la porosità effettiva, n_{eff} da cui si ottiene:

$$A_c = \frac{A_1^{II}}{n_{eff}^{II}} = \frac{A_1^{III}}{n_{eff}^{III}} \quad (16)$$

Nel caso di drenaggio senza perdita di energia (*serbatoio Torricelli*), in accordo con la equazione (16), l'equazione (15) può essere trasformata in (FIORILLO, 2011):

$$\frac{\alpha^{II}}{\alpha^{III}} = \frac{n_{eff}^{III}}{n_{eff}^{II}} \quad (17)$$

Nell'ipotesi di un flusso senza perdita d'energia ed area della tavola d'acqua costante durante lo svuotamento si ottiene che la variazione del coefficiente di recessione è controllata dalla porosità effettiva calcolata lungo la superficie della tavola d'acqua. La variazione della porosità effettiva con la profondità deve allora essere connessa con il differente sviluppo di vuoti, cavità e condotti nella zona epifreatica (zona dell'acquifero compresa tra il massimo ed il minimo livello della falda).

Durante lo svuotamento di un acquifero carsico reale, le linee di flusso presentano una prevalente componente orizzontale e convergono verso le sorgenti. Se le condizioni idrauliche (permeabilità, area

Equation 15 highlights how the variation of the recession coefficient, α , can be simply explained by the variation of the area A_1 , without any change of the hydraulic characteristics of the reservoir.

The properties of the tank-reservoir are useful in understanding the drainage of actual karst aquifers. In Fig. 2b, a shaft simulates the upper part of the composite tank-reservoir (cylinder with area A_1^I), whereas a saturated aquifer is characterised by two distinct superimposed effective porosity zones, with $n_{eff}^{III} > n_{eff}^{II}$. During drainage, the water table area, A_c , is constant, and supposing that the catchment area coincides with the area occupied by the water table, then the area A_1 is approximately the product of the catchment area, A_c , and the mean effective porosity, n_{eff} :

Considering the flux without loss of energy (*Torricelli reservoir*), according to Equation 16, the Equation 15 can be rewritten as (FIORILLO, 2011):

In this assumption (the flux without loss of energy and constant water table area, A_c) the change of the recession coefficient during drainage is purely controlled by effective porosity computed along the surface of the water table. Variation of the effective porosity in depth has to be connected to different development of voids, caves and conduits inside the epifreatic zone (aquifer zone between high and low water table level).

During drainage of an actual karst aquifer, flow lines have a prevalent horizontal component and converge towards the springs. If the aquifer hydraulic conditions (permeability, water table area)

della tavola d'acqua) non cambiano durante l'abbassamento della tavola d'acqua associato con la parte di recessione dell'idrogramma sorgivo, le caratteristiche di scarico dell'acquifero possono essere considerate approssimativamente costanti e specifiche di ciascun sistema acquifero-sorgente. L'introduzione della costante idraulica, c , consente di racchiudere in un unico parametro le caratteristiche di scarico del sistema acquifero-sorgente e l'equazione (17) può essere approssimativamente estesa anche agli acquiferi reali (FIORILLO, 2011):

$$\frac{\alpha^{II}}{\alpha^{III}} \approx \frac{n_{eff}^{III}}{n_{eff}^{II}} \quad (18)$$

valida solo se l'area della tavola d'acqua, A_c , rimane costante durante il drenaggio.

TEST DEL MODELLO: LA SORGENTE CAPOSELE

Le espressioni analitiche sopra descritte sono state applicate alla sorgente Caposele, per la quale è disponibile una dettagliata serie di misure di portata, unitamente con dati di monitoraggio di un pozzo ubicato all'interno del bacino della sorgente.

Principali lineamenti idrogeologici e idrologici della sorgente Caposele

La sorgente Caposele (nota anche come sorgente Sanità) è ubicata a quota di circa 417 m s.l.m alla sommità del fiume Sele, lungo il settore nord-orientale dei Mt. Picentini (Fig.4) e alimenta l'Acquedotto Pugliese, il principale sistema acquedottistico d'Italia che fornisce acqua idropotabile all'intera regione Puglia e parte della Campania.

change very little during the water-table lowering associated with the recession limb of the hydrograph, the discharge characteristics of the aquifer can be considered approximately constant and specific for each aquifer-spring system. The use of hydraulic constant, c , provides a lumped parameter to describe the discharge capacity of the aquifer-spring system. Under such assumptions, the Equation 17 can be approximately extended also to an actual karst aquifer (FIORILLO, 2011):

which is valid only for constant water table area, A_c , during the drainage.

MODEL TESTING: THE CAPOSELE SPRING

The above analytical results have been applied to the Caposele spring, for which a long and detailed discharge measurements are available, together to water level data series of a well located inside the spring catchment.

Main hydrogeological and hydrological features of the Caposele spring

The Caposele spring (known also as Sanità spring) is located at 417 m a.s.l., near the the head of the Sele river, along the north-eastern sector of the Mts. Picentini (Fig.4), and feeds the Acquedotto Pugliese, the main aqueduct system in Italy, which supplies water to the Puglia and partially the Campania region.

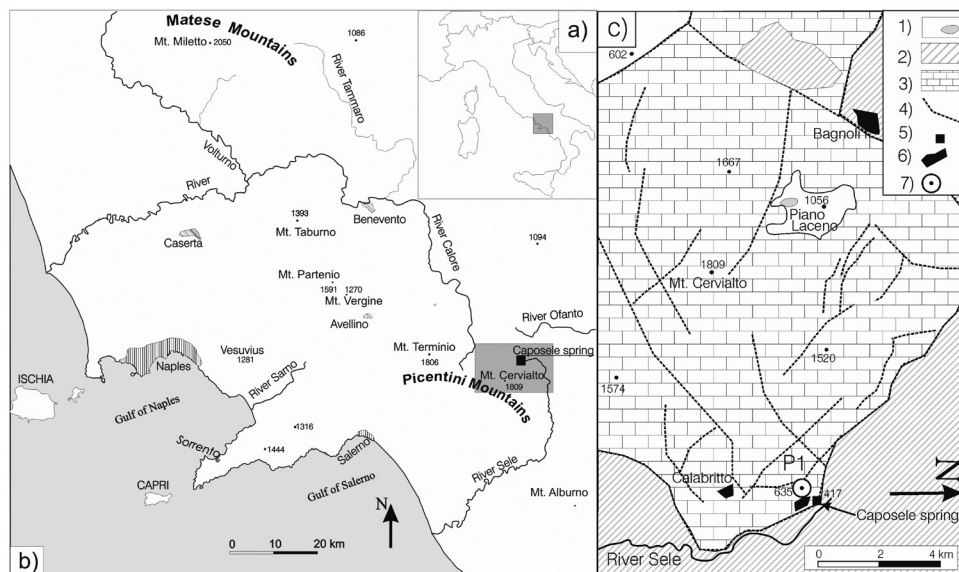


Fig. 4 - a) Southern Italian peninsula. b) Map of the western Campania region. c) Hydrogeological features of the northern Picentini Mountains outlined in part b. Key: 1) slope breccias and debris, pyroclastic, alluvial, and lacustrine deposits (Quaternary); 2) argillaceous complex and flysch sequences (Paleogene-Miocene); 3) calcareous-dolomite series (Mesozoic); 4) fault; 5) major spring; 6) village; 7) P1 well

Dopo un iniziale galleria by-pass tra lo spartiacque Sele-Ofanto, l'Acquedotto è costituito da una condotta principale e da un connesso sistema di canali a gravità che si estende fino alla penisola salentina, circa 400 km di distanza dalla sorgente. La sorgente è prevalentemente alimentata dal massiccio carbonatico/carsico del M. Cervialto, (CELICO & CIVITA, 1976) e tenuto conto dell'area di affioramento dei terreni carbonatici a quota maggiore della sorgente e da considerazioni di carattere idrogeologico, l'area del bacino è stimata di 100 - 110 km². Con una media annuale di 3.9 m³/s (periodo 1920-2011), la sorgente Caposele risulta quella con la più grande portata dell'Italia meridionale.

Il bacino risulta costituito da calcari e calcari dolomitici di età Triassico superiore - Miocene, per uno spessore complessivo di circa 2500 m, molto fratturati e fagliati, con roccia frequentemente ridotta a breccia. La serie calcareo-dolomitica è tettonicamente in contatto con depositi terrigeni ed impermeabili che includono sia complessi argillosi pre-orogeni (Paleocene) che sequenze di flysch (Miocene). Ulteriori dettagli delle caratteristiche geologiche possono trovarsi nella recente Carta Geologica d'Italia a scala 1:50,000 (ISPRA, 2009). I versanti sono ricoperti da depositi piroclastici provenienti dall'attività eruttiva del Somma-Vesuvio che giocano un importante ruolo circa l'infiltrazione nel substrato carsico. Tale copertura ha favorito la crescita di una fitta vegetazione arborea, prevalentemente costituita da castagni e nocciolieti, ricoprenti vasti settori del M.ti Picentini. La distribuzione della quota del bacino è caratterizzata per oltre il 70% da quote sopra i 1000 m s.l.m., fino alla sommità del Mt. Cervialto (1809 m s.l.m.); una vasta conca endoreica, il Piano Laceno, favorisce i processi d'infiltrazione e limita il run-off fuori dal bacino.

I dati di portata analizzati coprono un periodo di 12 anni continui, dal 1 Gennaio 2000 al 31 Dicembre 2011 (Fig. 5). Durante questo periodo, gli idrogrammi delle annate umide sono caratterizzate da blandi colmi nella stagione primaverile, come nel 2000, 2006, e 2009-2011, mentre gli idrogrammi delle annate secche sono caratterizzati da deboli colmi o da una portata sorgiva continuamente decrescente durante l'intero anno idrologico. In particolare, l'annata 2001/02 è stata caratterizzata da una delle più intense siccità idrologiche degli ultimi

After a first branch constituted by a tunnel by-pass between the Sele-Ofanto divide, the Aqueduct through a main gravity conduit and a connected channels system, reaches the Salento peninsula, about 400 km far from the spring. This spring is primarily fed by the Cervialto carbonatic massif (CELICO & CIVITA, 1976), and looking at the calcareous area with an elevation higher than the spring's and considering some hydrogeological features of the area, the estimated area is between 100 and 110 km². With a mean annual discharge of 3.9 m³/s (period 1920-2011), Caposele presents the highest spring discharge of southern Italy.

The spring catchment is formed prevalently by calcareous and calcareous-dolomitic series of the Late Triassic through the Miocene; they are 2,500 m thick, heavily fractured and faulted, and frequently reduced to breccias. The calcareous-dolomite series are tectonically bounded by terrigenous and impermeable deposits comprising complex argillaceous (Paleocene) and flysch sequences (Miocene). Further details of geological features of the Southern Apennine can be found in the Geological Map of Italy (1:50,000 scale; ISPRA, 2009). The slopes are generally mantled by pyroclastic deposits of Somma-Vesuvius activity, which have led to a growth of trees (chestnuts and hazel) which densely cover wide sectors of the Picentini mountains and play an important role in the infiltration of water into the karst substratum below. The distribution of the ground-elevation provides that 70% of the spring catchment lies above 1000 m a.s.l., up to the top of Mt. Cervialto (1809 m a.s.l.); a wide closed depressions, the Piano Laceno, favors the infiltration processes and limits the run off out the catchments.

The analyzed daily spring discharge data cover a 12-year period (January 1, 2000 through December 31, 2011) (Fig. 5). During this period, hydrographs of the wet years are characterized by well-pronounced flood during the spring season, as occurred in 2000, 2006, and 2009-2011 period, whereas hydrographs of dry years are characterized by slight flood or a continuously decreasing trend of the discharge during the hydrological year. In particular, 2001/02 was one of the most intense hydrological droughts that oc-

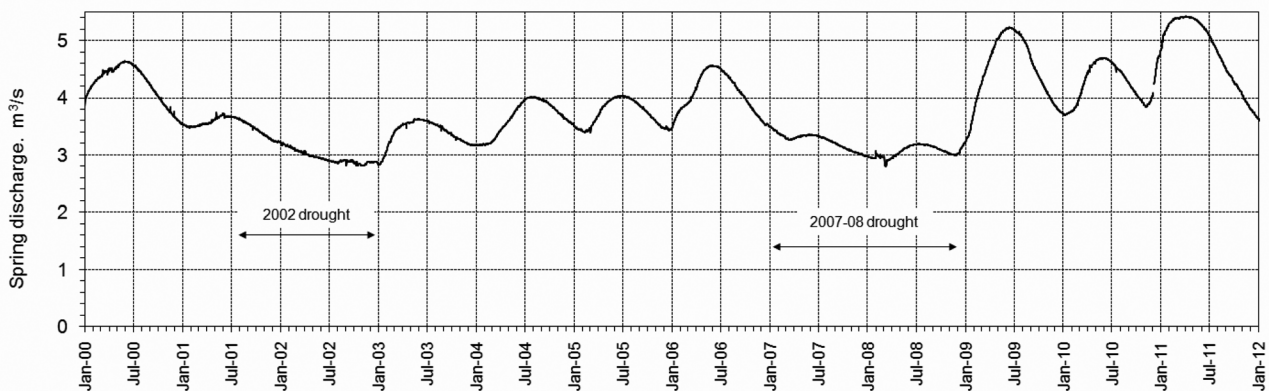


Fig. 5 - Portata sorgiva giornaliera dal 1 Gennaio 2000 al 31 Dicembre 2011; l'idrogramma è tipico di un sistema scarsamente carsificato
 - Daily Caposele spring discharge data from January 1, 2000, through December 31, 2011; hydrograph reflects the poor karstified system

decenni del sud Italia (FIORILLO & GUADAGNO, 2010) e determinò il raggiungimento dei minimi di portata in molte sorgenti alimentate da acquiferi carsici/carbonatici (FIORILLO & GUADAGNO, 2012). Dopo le annate secche del 2006/07 e 2007/08, la pioggia annuale del 2008/09 fu una delle più elevate registrate da molti pluviometri della Campania, e determinò l'incremento delle portate sorgive molto sopra la media.

In linea generale, la ricarica si verifica durante le stagioni autunno-inverno e determina il raggiungimento del colmo durante la primavera; durante la stagione primaverile-estiva per effetto dell'elevato tasso di evapotraspirazione e del calo delle precipitazioni, la ricarica può essere considerata nulla (FIORILLO *et alii*, 2007; FIORILLO, 2009). Singoli eventi di pioggia giornaliera non hanno una diretta influenza sulla portata della sorgente, come è possibile desumere dall'andamento dell'idrogramma; la causa è da addebitare allo scarso sviluppo dei condotti o alla loro poca interconnessione (Fiorillo, 2009). Queste caratteristiche indicano che il massiccio del Cervialto può essere considerato come un sistema carsico poco sviluppato. La portata risulta invece dipendere da piogge cumulate su lunghi intervalli temporali; in particolare, FIORILLO & DOGLIONI (2010) hanno analizzato la relazione tra le piogge e la portata sorgiva attraverso analisi di cross-correlazione e hanno riscontrato come la portata di Caposele risulta rispondere fino ad alcuni mesi dopo le piogge.

Modello di svuotamento dell'acquifero

Al fine di verificare l'equazione 18, sono stati considerati i dati di portata della sorgente Caposele nel periodo estate-inizio autunno. Durante questo periodo, caratterizzato da assenza di ricarica, l'idrogramma sorgivo presenta una forma concava che segue un precedente periodo dalla forma convessa connessa con il colmo di portata.

Il coefficiente di recessione di ciascun anno considerato è stato valutato diagrammando nel grafico semilogaritmico i dati giornalieri di portata (Fig.6); il periodo inizia con il 1 Settembre e termina il 31 Ottobre

curated in southern Italy (FIORILLO & GUADAGNO, 2010) and caused the historical minimum discharge in many karst/carbonatic springs (FIORILLO & GUADAGNO, 2012). After the dry years of 2006/07 and 2007/08, the annual rainfall of the 2008/09 was one of the highest of the historical series, and increased the spring discharges much more than the mean.

Recharge regularly occurs during the autumn-winter season and causes the maximum spring discharge during the spring; during the spring-summer season, due to the high rate of evapotranspiration and rainfall reduction, recharge can be considered null (FIORILLO *et alii*, 2007; FIORILLO, 2009). Single rain events (daily rainfall) have no direct influence on the spring discharge, and spring hydrographs are characterized by little or no prompt flow, due to a poor development or connection of the karst conduits (Fiorillo, 2009). These features characterize the Cervialto massif as a poor karstified system. The spring discharge depends on the long-term cumulative rainfall; in particular, FIORILLO & DOGLIONI (2010) analysed the relation between rainfall and spring discharge by cross-correlation analyses and found that Caposele springs' discharge is shifted up to several months with respect to the rainfall.

Drainage aquifer model

To verify the Equation 18, the discharge data of the Caposele spring were analyzed to focus on the summer to early-autumn period, during which time a continuous decreasing trend of the discharge is generally observed and the recharge processes can be considered negligible. During this period, spring hydrographs present a concave shape that follows the previous convex shape connected to the peak or flood earlier in the year.

To evaluate the recession coefficient of the springs, daily discharge

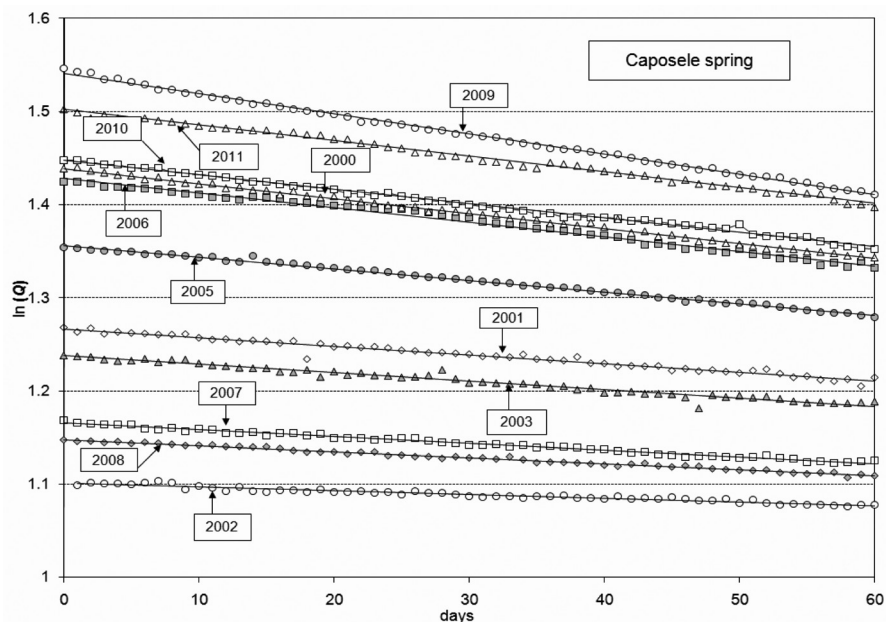


Fig. 6 - Logaritmo naturale della portata giornaliera di Caposele durante i periodi di recessione. Il giorno 0 è il 1 settembre per tutte le annate; solo per il 2002 è il 6 Aprile. I dati del 2004 non sono mostrati.
 - Natural logarithms of the Caposele group daily discharges during recession periods. Day 0 is September 1 for 2000-2011 and April 6 for 2002; no data are shown for 2004.

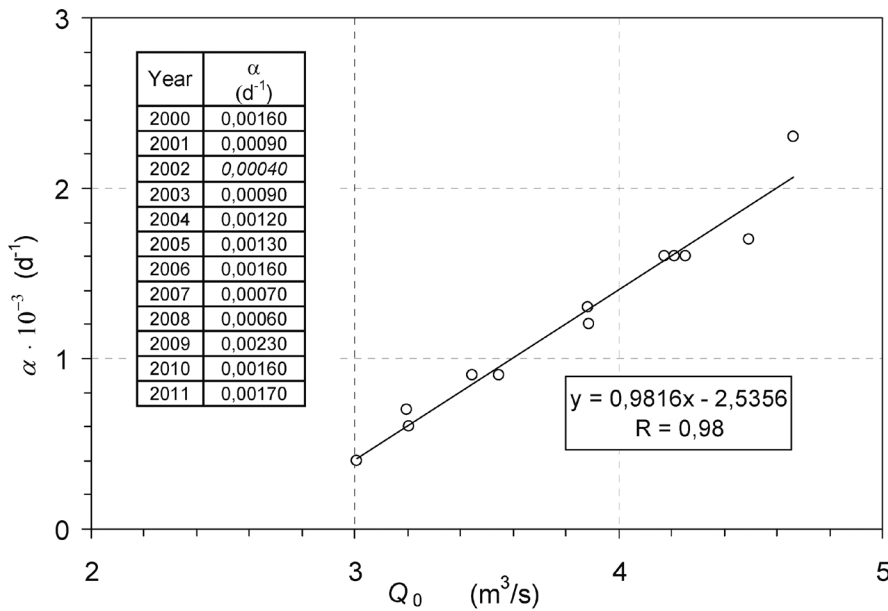


Fig. 7 - Relazione tra il coefficiente di recessione α e la portata di Caposele Q_0 all'inizio del periodo di drenaggio considerato, anni 2000-2011
 - Relation between the recession coefficient α and Caposele spring discharge at the beginning of the draining Q_0 for the years 2000-2011

(61 giorni); solo il 2002 inizia con il 6 Aprile e termina il 6 Giugno a causa dell'assenza di correlazione nel periodo 1 Settembre - 31 Ottobre 2002. Come può essere osservato, ciascuna annata appare come una linea retta, indicando che l'acquifero si comporta come un serbatoio lineare. Tuttavia, l'inclinazione della linea retta cambia da un anno all'altro, indicando una dipendenza dalle condizioni iniziali dell'acquifero, ed in particolare dalla portata sorgiva all'inizio del periodo di svuotamento considerato, Q_0 (Fig. 7). La correlazione lineare tra α e Q_0 della Fig. 7, indica che il coefficiente di recessione è più piccolo durante le annate siccitose e più elevato durante le annate umide. Pertanto, un unico coefficiente di recessione non può essere utilizzato per l'intero svuotamento dell'acquifero, in quanto α cambia anno per anno in funzione di Q_0 .

La sorgente Sanità di Caposele costituisce il principale recapito delle acque del bacino del Mt. Cervialto; altre sorgenti minori nel bacino hanno portata solo di qualche litro/secondo. Durante il drenaggio dell'acquifero, la estensione superficiale della tavola d'acqua che alimenta la sorgente Caposele può considerarsi costante nei periodi di recessione, mancando altri recapiti significativi della falda. Un utile set di dati è quello acquisito dal monitoraggio automatico del livello di falda di un pozzo ubicato a 635.54 m s.l.m., all'interno del bacino della sorgente (P1, Fig. 4). I dati disponibili ricoprono un periodo discontinuo tra il 2008 ed il 2011, dove è possibile osservare un trend simile del livello della falda nel pozzo P1 e la portata della sorgente. Di questo set di dati sono stati considerati intervalli di un mese del periodo di recessione di ciascun anno (Ottobre 2008, Ottobre 2009, Settembre 2010, Novembre 2011), per i quali sono disponibili i dati di misura. La Tab. 2 mostra il volume scaricato alla sorgente durante questi mesi, D_w , il relativo decremento del livello di falda misurato nel pozzo, ΔL , ed il tasso di decremento per unità di abbassamento del livello nel pozzo, $V_w = D_w / \Delta L$.

E' possibile osservare che durante il periodo siccitoso del 2008, il

data of each hydrological year were plotted in a semilogarithmic graph (Fig.6); the plotted period starts generally on September 1 and ends October 31 (61 days); only 2002 starts on April 6 and ends on June 6, because no-linear correlation has been found for the period September 1 to October 31. As can be observed, each plot appears as a straight line, indicating that the aquifer behaves as a linear reservoir. However, the slope of the linear fit (the recession coefficient) changes from one year to another, indicating a dependence on the initial condition of the aquifer, and in particular on the spring discharge at the beginning of the draining, Q_0 (Fig. 7). The linear and positive relationship between α and Q_0 found in Fig. 7, indicates that the recession coefficient is smaller during droughts and higher after wet years. Thus, a single recession coefficient value cannot be used to explain the entire emptying processes of the aquifer, as α changes year by year in function of Q_0 .

The Caposele spring is the only major spring draining the wide catchment of Mt. Cervialto. The minor spring in the basin drain only a few liters per second. During the draining of the aquifer, a constant water-table area can be considered for the Caposele springs, which helps to explain the variation of the recession coefficient during the draining of different years. A useful water-level dataset comes from a well located at 635.54 m a.s.l. inside the catchment of the Caposele spring (P1, Fig. 4). The available data cover a discontinuous period between 2008 and 2011, where is possible to observe the similar trend of the P1 water level and Caposele spring discharge. It has been considered one month of the recession period for each year (October 2008, October 2009, September 2010, November 2011), during which the water level data are available. Table 2 shows the volume discharged at the spring during these months, D_w , the relative water level decrease in P1 well, ΔL , and the rate $V_w = D_w / \Delta L$.

During drought of 2008 the rate, V_w , was higher than the wet pe-

Tab. 2 - Volume d'acqua scaricato alla sorgente Caposele (D_w) e abbassamento del livello della falda nel pozzo P1 (ΔL) durante Ottobre 2008, Ottobre 2009, Settembre 2010 and Novembre 2011. Il tasso di decremento V_w è espresso dal rapporto $D_w/\Delta L$
 - Water volume discharged at Caposele spring (D_w) and water level decrease in P1 well (ΔL) during October 2008, October 2009, September 2010 and November 2011. The rate of decrease V_w is expressed by the ratio $D_w/\Delta L$

Period	D_w $m^3 \times 10^6$	ΔL cm	$V_w=D_w/\Delta L$ $m^3/cm \times 10^6$
October 2008	8,2	6	1,37
October 2009	11,3	31	0,36
September 2010	10,8	24	0,45
November 2011	9,8	23	0,43

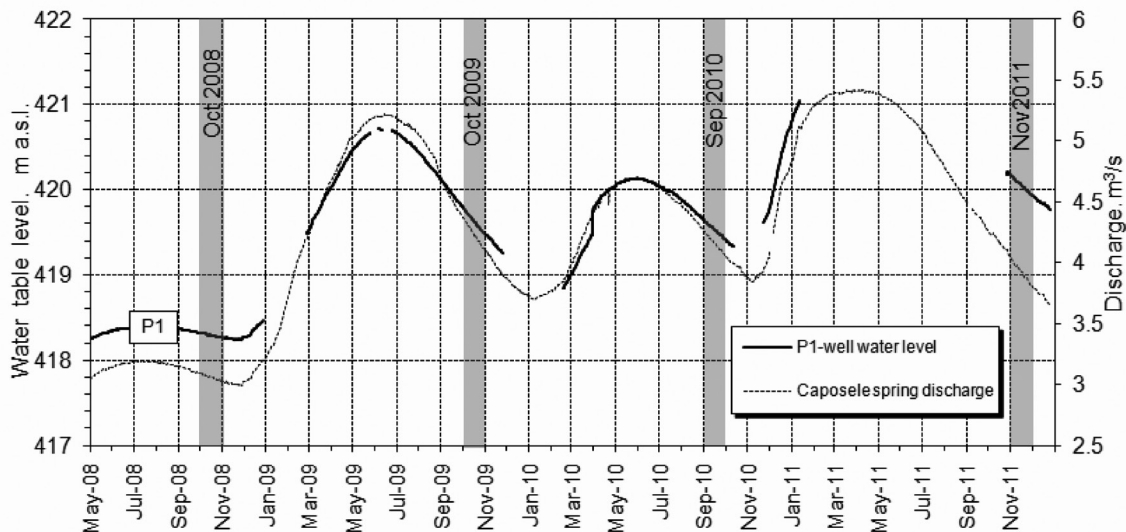


Fig. 8 - Portata sorgiva di Caposele e livello nel pozzo P1, periodo Maggio 2008 - Dicembre 2011. Per alcuni periodi i dati di misura sono mancanti
 - Caposele spring discharge and water level monitored in well P1, May 1, 2008, through December 31, 2011. Data are missing during some periods

valore di V_w è più elevato che durante i periodi umidi del 2009, 2010, e 2011. Questo differente comportamento idraulico suggerisce che le condizioni d'immagazzinamento della zona epifreatica sono diverse. Negli acquiferi non confinati la porosità effettiva può essere approssimata al coefficiente d'immagazzinamento, come discusso da STEVANOVIC *et alii* (2010). Pertanto, questo comportamento idraulico può essere spiegato con un incremento della porosità effettiva, n_{eff} , da un livello alto della tavola d'acqua ad un livello basso della stessa. Il rapporto tra i valori di V_w di due diversi anni può essere confrontato con il rapporto tra la porosità effettiva calcolata lungo la superficie della tavola d'acqua:

$$\frac{n_{eff(2008)}}{n_{eff(2009)}} \approx \frac{V_{w(2008)}}{V_{w(2009)}} = \frac{1.37 \times 10^6}{0.35 \times 10^6} = 3.91 \tag{19}$$

Durante il drenaggio degli acquiferi carsici, è stato dedotto che la variazione del coefficiente di recessione, per esempio da $\alpha^{II} \rightarrow \alpha^{III}$, con $\alpha^{II} > \alpha^{III}$, può essere addebitata alla variazione della porosità effettiva da $n_{eff}^{II} \rightarrow n_{eff}^{III}$, con $n_{eff}^{II} < n_{eff}^{III}$, attraverso l'equazione 18, valida solo se la estensione della superficie della tavola d'acqua rimane costante durante lo svuotamento. In questo caso, l'equazione 18 fornisce:

$$\frac{n_{eff(2008)}}{n_{eff(2009)}} \approx \frac{\alpha_{(2009)}}{\alpha_{(2008)}} = \frac{0.00230}{0.00060} = 3.83 \tag{20}$$

L'equazioni 19 e 20 valutano il rapporto della porosità effettiva

riod of 2009, 2010, and 2011. This different hydraulic behavior suggests that the storage conditions change into the epifreatic zone. In the unconfined aquifer the storativity can be approximated by the effective porosity, and its use in the karst aquifer has been discussed by STEVANOVIC *et alii* (2010). Thus, this hydraulic behavior can be explain by an increase of the effective porosity, n_{eff} , computed along the surface of the water table, from the high to low water-table level. Thus, the ratio between the ratio of two years can be compared with the ratio of the effective porosity:

During the draining of karst aquifers, the model of FIORILLO (2011) shows how the variation of the recession coefficient, for example from α^{II} to α^{III} , with $\alpha^{II} > \alpha^{III}$, can be approximated by the change of the effective porosity, from n_{eff}^{II} to n_{eff}^{III} , with $n_{eff}^{II} < n_{eff}^{III}$, by the Equation 18, which is valid only for a constant water table area during the draining. In this case, the Equation 18 gives:

Equations 19 and 20 calculate the effective porosity ratio by two

mediante due approcci completamente diversi, ma forniscono risultati confrontabili, verificando che l'equazione 18 è fondata.

Inoltre, confrontando i dati del 2010 e 2011, l'equazione 18 risulta sempre confermata:

$$\frac{n_{eff(2010)}}{n_{eff(2011)}} \approx \frac{V_{w(2010)}}{V_{w(2011)}} = \frac{0.45 \times 10^6}{0.43 \times 10^6} = 1.05 \quad (21)$$

$$\frac{n_{eff(2010)}}{n_{eff(2011)}} \approx \frac{\alpha_{(2011)}}{\alpha_{(2010)}} = \frac{0.00170}{0.00160} = 1.06 \quad (22)$$

CONCLUSIONI

Sulla base della forma degli idrogrammi sorgivi durante il periodo di recessione e con riferimento al coefficiente di recessione, è stato analizzato il comportamento della sorgente Sanità di Caposele durante periodi secchi o siccitosi.

Molte sorgenti carsiche mostrano una tipica variazione del coefficiente di recessione durante lo svuotamento, specialmente se vengono considerate annate siccitose che "stressano" l'acquifero portando a valori molto bassi la portata sorgiva. Tuttavia, alcune sorgenti possono presentare anche un coefficiente di recessione che cambia poco da un anno all'altro, come nel caso della sorgente umbra Bagnara analizzata da ANGELINI & DRAGONI (1997), indicando che lo svuotamento segue sempre la stessa legge esponenziale di decadimento.

FIORILLO (2011) ha mostrato che la variazione del coefficiente di recessione è fortemente controllata dal prodotto della porosità effettiva (calcolata lungo la superficie della tavola d'acqua) con l'area occupata dalla tavola d'acqua. Se l'area rimane approssimativamente costante durante lo svuotamento, la porosità effettiva calcolata lungo la tavola d'acqua controlla la forma dell'idrogramma sul grafico semilogaritmico.

Il livello della falda monitorato nel pozzo P1 ha permesso di investigare sul comportamento idraulico dell'acquifero durante i periodi secchi, riscontrando che il rapporto tra le porosità effettiva secondo la equazione 19 è molto simile a quello dedotto con la equazione 20, supportando quanto dedotto nel modello di FIORILLO (2011).

Il cambio della porosità effettiva deve essere connesso con il differente sviluppo di cavità, condotti, e vuoti che favoriscono l'incremento dell'immagazzinamento all'interno della zona epifreatica, dalle zone più elevate a quelle più basse.

Modelli numerici hanno mostrato che i fenomeni di corrosione del carbonato di calcio, con sviluppo di condotti ed incremento della porosità, si verificano sotto la superficie della tavola d'acqua negli acquiferi carsici non confinati (GABROVŠEK & DREYBRODT, 2010; DREYBRODT *et alii*, 2010). Di conseguenza, appena sotto la superficie della tavola d'acqua, c'è una forte variazione nella distribuzione dei vuoti.

La relazione $\alpha - Q_0$ della Fig.7, unitamente ai dati di monitoraggio del pozzo P1, indicano che la porosità effettiva incrementa nella zona epifreatica dell'acquifero della sorgente Caposele. Questa sorgente garantisce una elevata portata durante la lunga stagione secca mediterranea e può considerarsi come "resistente" alla siccità poiché α

different approaches, but indicate that the two results are very close, verifying that Equation 18 is well founded.

Besides, comparing data of the 2010 and 2011, Equation 18 is further confirmed:

CONCLUSIONS

Based on the shape of the spring hydrograph during the recession period and, in particular, on the value of the recession coefficient, the hydraulic behavior of the Caposele aquifer can be outlined during dry periods and droughts.

Many karst springs show a typical variation of the recession coefficient during aquifer draining, especially when droughts are included in analyses, which "stress" the aquifer by very low discharge values. However, some karst springs can present a recession coefficient quite similar from a year to another, as in the case of Bagnara spring, north Apennines (ANGELINI & DRAGONI, 1997), indicating that the spring follow always the same exponential decay.

FIORILLO (2011) has explained that the variation in the recession appears to be strongly controlled by the product of the effective porosity (along the water table) and the area occupied by the water table. If the area can be considered constant during the emptying process, the effective porosity computed along the water table level controls the shape of the hydrograph on the semilogarithmic plot.

The water-level data of the P1 well have allowed to investigate the hydraulic behavior of the aquifer during dry periods. It has been found that the ratio of the effective porosity evaluated by Equation 19 is very similar to that of Equation 20, verifying the hypothesis that the ratio between two different value of the recession coefficient can be approximated to the inverse ratio of the effective porosity computed along the surface of the water table (Equation 18).

The change in the effective porosity inside the epiphreatic zone has to be connected to different developments of caves, conduits, and voids that favor increasing water storage from a high to low water table. Numerical models have shown how corrosion phenomena cause the development of conduits and porosity just below the water table of an unconfined aquifer (GABROVŠEK & DREYBRODT, 2010; DREYBRODT *et alii*, 2010). As a consequence, just below the water table there is a strong variation in void distribution..

The $\alpha - Q_0$ relation of Fig.7, together with data of the monitored-well P1, indicate that the porosity increases in depth inside the epiphreatic zone of the aquifer of Caposele spring. This spring guarantees high discharge during the long dry Mediterranean period and can be considered as drought-resistant, as α diminishes with Q_0 . These characteristics cause an opposite behavior after droughts, as dis-

diminuisce con Q_0 . Queste caratteristiche determinano anche un comportamento opposto dopo le annate siccitose, ove la portata presenta valori minori della norma e “resiste” al suo aumento (FIORILLO, 2009).

RINGRAZIAMENTI

L'autore è grato all'Acquedotto Pugliese S.p.A. che ha supportato questo studio.

OPERE CITATE / REFERENCES

- ANGELINI P. & DRAGONI W. (1997) - *The problem of modeling limestone springs: The case of Bagnara (North Apennines, Italy)*. Ground Water, **35** (4): 612-618.
- ATKINSON T.C. (1977) - *Diffuse flow and conduit flow in limestone terrain in the Mendip Hills, Somerset (Great Britain)*. Journal of Hydrology, **35**: 93-100. doi:10.1016/0022-1694(77)90079-8.
- BAKALOWICZ M. (2005) - *Karst groundwater: a challenge for new resources*. Hydrogeology Journal, **13**: 148-160. doi:10.1007/s10040-004-0402-9.
- BONACCI O. (1987) - *Karst Hydrology*. Springer Verlag, Herdelberg, Germany.
- BONACCI O. (1993) - *Karst spring hydrographs as indicators of karst aquifers*. Hydrolog. Sc. J.; **38**: 51-62.
- CELICO P. & CIVITA M. (1976) - *Sulla tettonica del massiccio del Cervialto (Campania) e le implicazioni idrogeologiche ad essa connesse*. Bollettino della Società dei Naturalisti in Napoli, **85**.
- DREYBRODT W., ROMANOV D. & KAUFMANN, G. (2010) - *Evolution of caves in porous limestone by mixing corrosion: a model approach*. Geologia Croatica, **63** (2): 129-135.
- EISENLOHR L., KIRALY, L., BOUZELBOUDJEN M. & ROSSIER I. (1997) - *A numerical simulation as a tool for checking the interpretation of karst springs hydrographs*. J. Hydrology, **193**: 306-315.
- FIORILLO F. (2009) - *Spring hydrographs as indicators of droughts in a karst environment*. Journal of Hydrology, **373**: 290-301. doi:10.1016/j.jhydrol.2009.04.034.
- FIORILLO F. (2011) - *Tank-reservoir drainage as a simulation of recession limb of karst spring hydrographs*. Hydrogeology Journal, **19**: 1009-1019. doi:10.1007/s10040-011-0737-y.
- FIORILLO F., ESPOSITO L. & GUADAGNO F.M. (2007) - *Analyses and forecast of water resources in an ultra-centenarian spring discharge series from Serino (southern Italy)*. Journal of Hydrology, **336**: 125-138. doi:10.1016/j.jhydrol.2006.12.016.
- FIORILLO F. & DOGLIONI A. (2010) - *The relation between karst spring discharge and rainfall by cross-correlation analysis*. Hydrogeology Journal, **18**: 1881-1895. doi:10.1007/s10040-010-0666-1.
- FIORILLO F. & GUADAGNO F.M. (2010) - *Karst spring discharges analysis in relation to drought periods, using the SPI*. Water Resources Management, **24**: 1867-1884. doi:10.1007/s11269-009-9528-9.
- FIORILLO F. & GUADAGNO F.M. (2012) - *Long karst spring discharge time series and drought occurrences in southern Italy*. Env. Earth Sciences, **65**: 2273-2283.
- FORD D. & WILLIAMS P. (2007) - *Karst Hydrogeology and Geomorphology*. Chichester, England, Wiley, 562 pp.
- FORKASIEWICZ J. & PALOC H. (1967) - *Le regime de tarissement de la Foux-de-la-Vis. Etude preliminaire: Chronique d'Hydrogeologie*, BRGM, **3** (10): 61-73.
- GABROVŠEK F. & DREYBRODT W. (2010) - *Karstification in unconfined limestone aquifers by mixing of phreatic water with surface water from a local input: a model*. Journal of Hydrology, **386**: 130-141. doi:10.1016/j.jhydrol.2010.03.015.
- GOLDSCHIEDER N. & DREW D. (EDS.) (2007) - *Methods in Karst Hydrogeology*. London, Taylor & Francis, International Contributions to Hydrogeology, **26**: 264 pp.
- ISPRA (2009) - *Geological Map of Italy, 1:50.000 scale, Foglio n. 450 "S. Angelo dei Lombardi"*: Rome, Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale.
- KOVÁCS A. & PERROCHET P. (2008) - *A quantitative approach to spring hydrograph decomposition*. Journal of Hydrology, **352**: 16-29. doi:10.1016/j.jhydrol.2007.12.009.
- KOVÁCS A., PERROCHET P., KIRÁLY L. & JEANNIN P.-Y. (2005) - *A quantitative method for characterisation of karst aquifers based on the spring hydrograph analysis*. Journal of Hydrology, **303**: 152-164. doi:10.1016/j.jhydrol.2004.08.023.
- KRESIC N. & BONACCI O. (2010) - *Spring discharge hydrograph*. In *Groundwater Hydrology of Springs*. KRESIC N. & STEVANOVIC Z. (EDS.), Elsevier: 129-163.
- MANGIN A. (1975) - *Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques: Troisième partie: constitution et fonctionnement des aquifères karstiques*. Annales de Spéléologie, **30** (1): 21-124.
- MIJATOVIĆ B.F. (1968) - *A method studying the hydrodynamic regime of karst aquifers by analysis of the discharge curve and level fluctuation during the recession*. Vesnik Zavoda za Geoloska I Geofizička Istrazivanja, Serie B, **8**: 41-81.
- MILANOVIĆ P. (1976) - *Water regime in deep karst: case study of Ombla Spring drainage area*. In YEVJEVICH V. (ED.) - *Karst Hydrology and Water Resources*, Volume **1**, Karst Hydrology: Fort Collins, Colorado, Water Resources Publications: 165-186.
- SCHOELLER H. (1965) - *Hydrodynamique dans le karst. Proc. Dubrovnik Sym.* Hydrology of Fractured Rocks -UNESCO, **1**: 3-20.
- STEVANOVIC Z., MILANOVIĆ S. & RISTIC V. (2010) - *Supportive methods for assessing effective porosity and regulating karst aquifers*. Acta Carsologica, **39** (2): 313-329.
- TODD D.K. & MAYS L.W. (2005) - *Groundwater hydrology*. Wiley, 3rd edition, 636 pp.

charge present values below the normal, with a resistance to increase (FIORILLO, 2009).

ACKNOWLEDGEMENTS

Author is grateful to Acquedotto Pugliese S.p.A. for spring discharge and well-water level data.

- TORBAROV K. (1976) - *Estimation of permeability and effective porosity in karst on the basis of recession curve analysis*. Karst Hydrology and Water Resource, 1: YEVJEVICH V. (ED.), Water Resource Publication, Colorado, 121-136.
- WHITE W.B. (1988) - *Geomorphology and Hydrology of Karst Terrains*. New York, Oxford University Press, 464 pp.

Received September 2012 - Accepted January 2013