

Le risorse dinamiche della Sorgente Sanità in Caposele (Sud Italia)

Dynamic resources of the Sanità spring at Caposele (South Italy)

Massimo V. Civita, Katia Rostagno

Riassunto: La Sorgente Sanità di Caposele è la caput fluminis del F. Sele, nel nord-est della Campania. Essa, dalla fine dell'800 è stata indicata e poi studiata come possibile fonte dell'Acquedotto Pugliese e, dopo diverse vicissitudini, è stata captata nel 1911.

Sulla base dei dati raccolti, sin dall'origine degli studi (da più di cento anni), della portata giornaliera della Sorgente è stata impostata una ricerca sulle risorse dinamiche sorgive che qui è riportato in sintesi. Sono stati ricordati i diversi lavori specifici sulla Sorgente, sino alle ultime intromissioni nel massiccio del Cervialto (la Galleria di Valico per congiungere le sorgenti di Sorbo Serpico all'acquedotto), e le caratteristiche idrogeologiche del massiccio in ogni parte importante. Sono, quindi, state prese in esame le portate misurate e sono state effettuate su di esse una serie di modellazioni matematiche della curva di efflusso sorgivo. Tali modelli, studiati per la gestione delle opere di presa, hanno permesso di suddividere l'andamento sorgivo in diversi cicli operativi ed in due diversi aspetti delle curve stesse, ognuno dei quali è stato opportunamente modulato. Il lavoro ha portato a conclusioni rilevanti per l'attuale captazione e per la definizione delle fasce di rispetto di essa. Esso si con-

clude con una completa discussione delle finalità della ricerca e dei modelli effettivamente utilizzati allo scopo di una completa utilizzazione da parte del gestore della captazione.

Abstract: *The Sanità Spring at Caposele (NE of Campania – South Italy) is the main spring of the Sele river. Since the end of '800, it was indicated and was prospected as the possible base of the Acquedotto Pugliese for drinking the dry Apulia zone. The spring was effectively tapped in 1911.*

A research on the source dynamic resources was began to start in 2009 and is terminated today on the base of data collected of Spring discharge during more of 100 y. A great quantities of specific work about the Spring are collected since the last occur in the Cervialto massif (the cross gallery to connect to Aqueduct the Sorbo Serpico springs). The hydrogeological characteristics of the massif was surveyed and a hydrogeological map was completed.

The everyday discharge data are studied with numerous mathematic models of the Sanità emptying curves. The models, prepared for the tapping work management, gain to divide the spring trend in various operative cycles and in two different kind of the emptying curves, everyone examined and modulated. The research produce relevant conclusions to the actual tapping work and their protection areas against pollution. This work is concluded by a complete discussion of research finality and the models utilized for a complete operation by tapping work operator.

Parole chiave: Sorgente, rilevamento idrogeologico, immagazzinamento, bilancio, modelli matematici.

Keywords: *Spring, hydrogeological survey, aquifer storage, water budget, mathematical models.*

Massimo V. CIVITA 

GLIA - Politecnico di Torino
C.so Duca degli Abruzzi, 24 – Torino (Italia)
Tel.: +39 011505682 – Mobile: +39 3316795994
mcivita@fastwebnet.it

Katia ROSTAGNO

GLIA - Politecnico di Torino
C.so Duca degli Abruzzi, 24 – Torino (Italia)

Ricevuto: 15 dicembre 2013 / Accettato: 22 marzo 2014
Pubblicato online: 30 aprile 2014

© Associazione Acque Sotterranee 2014

Introduzione

L'area oggetto di studio corrisponde all'estrema propaggine nord – orientale dell'Appennino Campano e del Gruppo montuoso dei Picentini (fig. 1). Da quest'area provengono le più importanti risorse idriche sorgive della Campania (alimentanti le Città di Napoli, Avellino e minori) e dell'intera Puglia tramite l'acquedotto Pugliese.

Pur non essendo tra le più copiose dell'Appennino centro-meridionale, la Sorgente Sanità di Caposele ($Q_{med} = 4 \text{ m}^3/\text{s}$) ha un'importanza notevolissima dal punto di vista economico e sociale perché alimenta l'Acquedotto Pugliese, un'opera che, all'epoca della sua realizzazione (1911), fu annoverata tra le più importanti del mondo.

L'acquedotto consente l'approvvigionamento della Puglia, della Campania orientale e di parte della Basilicata, regioni



Fig. 1 - Posizione geografica dell'area studiata

Fig. 1 - Geographic position of the studied area.

molto aride e, in particolare la Puglia, è costituita da rocce molto permeabili ma soggette all'intrusione marina che sovente inquina le già scarse risorse idriche sotterranee. L'Ente Autonomo Acquedotto Pugliese, titolare dell'Acquedotto, ha raccolto puntualmente i dati di portata giornalieri della Sorgente. La serie storica, unica in Italia per lunghezza e completezza, va dal gennaio 1920 ai nostri giorni e rappresenta un'importantissima base-dati per la ricerca sull'idrodinamica e sul processo ricarica – scarica dell'unico recapito dell'acquifero carbonatico che la approvvigiona. Tale conformazione idrogeologica fa del massiccio del Cervialto una struttura-campione unica nel panorama italiano ed europeo. L'analisi della situazione generale e dei dati di portata permetterà di applicare le metodologie e ottenere gli stessi risultati su tutti i massicci carbonatici dell'Appennino e delle Alpi.

Questo lavoro esamina anno per anno le portate sorgive con moderne metodologie modellistico - matematiche, calcola le risorse idriche sotterranee e descrive i meccanismi di formazione e flusso dell'acquifero.

Schema geologico e idrogeologico

Per quanto attiene la geologia dell'area, i primi studi e rilievi si leggono in Canavari (1928) e poi nei lavori più o meno recenti di Pescatore et al. (1970), D'Argento et al. (1973), Ortolani (1974), e Salvemini & Ventrella (1996). Come per gli altri massicci dei Monti Picentini, il Cervialto è costituito da una struttura carbonatica sovrascorsa su materiali sicilidi e unità lagonegresi.

Per quanto riguarda l'idrogeologia generale, il massiccio del M. Cervialto, che costituisce il serbatoio unico della Sorgente Sanità di Caposele, è stato studiato inizialmente da Celico (1973) e da Garofalo (1976) per le loro Tesi di Laurea. Successivamente, l'intero massiccio è stato riportato in Celico e Civita (1977), che ne svilupparono la cartografia completa (fig. 2) e la descrizione dei limiti strutturali. Una Carta idrogeologica del Foglio S. Angelo dei Lombardi è stata pubblicata nel 1968 da Budetta et al. con base al 100.000.

Alcuni lavori di stampo idrologico sono apparsi di recente. La serie storica delle portate sorgive è stata vagliata con metodi statistici, più adatti allo studio della dinamica fluviale piuttosto che a quello di una sorgente. Tale studio (Fiorillo et al. 2007) come altri precedenti degli stessi autori (Fiorillo et al. 2006) non sembrano tener alcun conto del modello fisico degli acquiferi alimentanti le sorgenti e si limitano a fornire una valutazione idrologica delle massime magre, poco utile per la gestione ed inutile per la comprensione del funzionamento dei sistemi acquiferi.

Per quanto attiene agli studi geoapplicativi per la captazione e lo sviluppo della Sorgente Sanità, è necessario ricordare che la prima idea di realizzare un'opera capace di alleviare la sete endemica degli abitanti della Puglia ed i riflessi sanitari ed economici derivanti, risale al 1867 (De Vincentis 1889; Cortese 1890). Negli anni successivi, essa fu vagliata e perfezionata e, in fine, diede luogo ad un vero progetto (1902) che fu approvato ed inserito in una apposita Legge (Ministero LLPP 1912). I lavori ebbero inizio solo nel 1905 e, a causa di vari ritardi, terminarono solo nel 1915, quando l'acqua delle sorgenti del Sele fu definitivamente condotta a Bari e Brindisi. Oggi, la rete dell'Acquedotto è molto più estesa: ulteriori contributi sono stati aggiunti, da altre sorgenti e da invasi. Tuttavia, la fonte d'approvvigionamento principale rimane la Sorgente Sanità di Caposele, anche se successivamente all'acquedotto sono state riunite le Sorgenti di Bagnoli Irpino ($Q_{med} = 3,1 \text{ m}^3/\text{s}$), mediante una galleria di valico che passa sotto al massiccio del Cervialto, lunga 16,52 km.

Una breve ma completa storia dei primordi della captazione della Sorgente Sanità è riportata in Billà (1966).

Geometria dell'acquifero

L'area di alimentazione della Sorgente Sanità

La Sorgente affiora ad una quota di circa 420 m s.l.m., all'estremità W dell'abitato di Caposele, sul versante destro del fiume Sele del quale è il caput fluminis. Essa sgorga all'incirca a 40 metri più in alto dell'alveo del fiume ove il pendio declina rapidamente in corrispondenza di un'importante faglia diritta ripresa dalla neotettonica recente (fig. 2 e 5).

Il massiccio carbonatico del Cervialto si erge ad un'altitudine di 1809 m s.m.m. ed ha limiti morfologici e idrogeologici ben precisi. A nord esso è delimitato dall'alta valle dell'Ofanto, ad oriente da quella del Sele. Il limite occidentale è rappresentato dalla valle Isca la Cupa (ramo settentrionale del fiume Tusciano) e dal fiume Calore. Infine, il limite meridionale è caratterizzato da una profonda cicatrice morfologica - strutturale presente tra il massiccio del Cervialto e quello adiacente del Polveracchio ove ha origine il fiume Tusciano e il Rio Zagarone, tributario di destra del Sele.

La rete idrografica è solo in parte drenata dai corsi d'acqua suddetti. Un'altra cospicua porzione del ruscellamento superficiale è endoreico, defluendo in bacini intramontani chiusi, dando luogo a laghi stagionali, il più vasto dei quali occupa il Piano Laceno. Diverse altre aree consimili, di origine tettonico – carsica, sono presenti a varie quote all'interno del

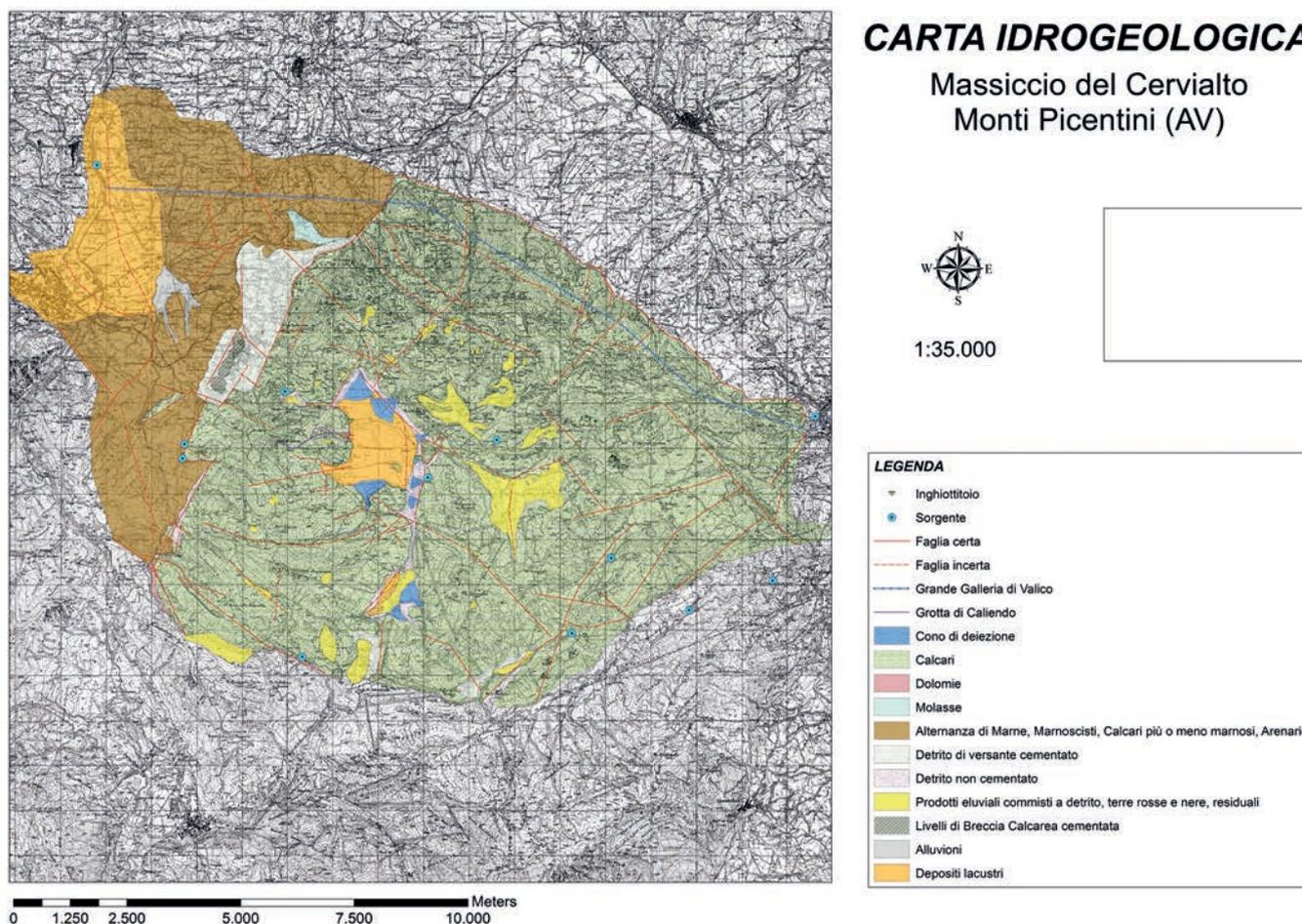


Fig. 2 - Carta idrogeologica del Massiccio del M. Cervialto: ID dei complessi in Tab. 1.

Fig. 2 - Massif of M. Cervialto hydrogeological map. Complexes ID in Tab. 1.

massiccio. Esso è coperto da una fitta vegetazione arborea dove l'isolamento creato dal fogliame induce nel sottobosco condizioni climatiche pressoché costanti. Si riscontra una temperatura più bassa che all'esterno durante i periodi caldi, dovuta alla barriera dell'aria, al calore e alla luce esercitati dalle foglie e dai rami. Allo stesso tempo, strati d'aria umida sono conservati a diretto contatto del suolo e ciò causa una difficile dispersione dell'acqua di ritenzione. L'evapotraspirazione esercitata dalla vegetazione è importante per il bilancio idrogeologico dell'area. Tutte le conche tettonico - carsiche sono state impermeabilizzate nella parte pianeggiante da materiali piroclastici fini, in massima parte argillificati, di origine vesuviana. Tale situazione è fondamentale per la comprensione dell'alimentazione dell'acquifero carbonatico. Dopo l'eruzione vesuviana del 1944, uno spesso strato di materiali piroclastici impermeabilizzarono il Lago Laceno e le altre aree a deflusso endoreico, limitando per un lungo periodo l'infiltrazione nel massiccio. Ciò appare nell'ambito delle portate sorgive come depressione evidente per circa 10 anni (Fig. 6). Il Lago si innalzò sino a raggiungere la quota più elevata, quella della Grotta di Caliendo. Questa situazione si ritrova in tutto il gruppo dei Monti Picentini, dove è stato possibile, in un lungo periodo d'osservazione sul terreno, notare che,

sino agli '60, molti dei pianalti erano stagionalmente allagati dalle acque di ruscellamento. Successivamente, a partire dalle conche più alte, l'erosione regressiva ha riaperto quasi ovunque inghiottitoi attraverso i quali le acque si trasferivano alla rete di fratture e cavità e dunque all'acquifero (Civita 1966).

Un ciclo carsico recente (Williams 1986) si è instaurato dopo le prime dislocazioni neotettoniche plioceniche mentre le successive fasi hanno surretto i massicci di molte centinaia di metri sui thalweg.

L'impermeabilizzazione della conca endoreica di Laceno (Fig. 3) ha tenuto alto a lungo il livello del lago. Le acque hanno trovato una via di tracimazione sotterranea attraverso un sistema di inghiottitoi e una lunga cavità carsica. La grotta Caliendo consiste di una serie di sale e di sifoni che convogliava le acque del lago attraverso la dorsale di Fossa della Neve sino alla Bocca di Caliendo, dopo un percorso di 3800 m con ca. 200 m di dislivello (Giulivo & Aquino 2007). Oggi il drenaggio è diminuito ed è solo temporaneo, quando raramente il lago si innalza ma, in passato, era sicuramente continuo. La Bocca di Caliendo, con la sua cascata, rappresenta quindi un troppo-pieno del lago quando esiste un contatto diretto. In caso contrario, le acque vengono richiamate a contribuire alle portate della Sorgente Sanità. Tracce di un ciclo precedente



Fig. 3 - Il polje tettonico - carsico a deflusso endoreico del Lago Laceno, parzialmente inondato.

Fig. 3 - The tectonic karstic polje of Laceno Lake, partially flooded.

si ritrovano sia in superficie (doline) sia in profondità (cavità carsiche incontrate dalla galleria di valico che unisce dal 1964 le acque delle sorgenti di Cassano all'Acquedotto, appena a N di Caposele (Billà 1966).

L'assetto idrostratigrafico dell'area di alimentazione è sintetizzato in Tab. 1 ed in Fig. 2.

La struttura idrogeologica del massiccio è stata descritta da Celico & Civita (1977) e Salvemini & Ventrella (1996). Il massiccio è limitato su tre parti da terreni impermeabili relativi e a tergo (a S) dalla linea Acerno - Calabritto coincidente con una struttura compressiva ad alto angolo che separa idrogeologicamente il massiccio del Cervialto dal retrostante M. Polveracchio.

L'area di discarica della Sorgente

La Sanità è una sorgente per soglia di permeabilità (Civita 1973). La sub verticalità del piano di faglia che mette a contatto l'acquifero con la formazione impermeabile permette di considerare che la soglia sia sovrainposta (Fig. 5).

L'acquifero si estende per tutta la zona basale del gruppo montuoso ed abbraccia, quindi, tutta l'area interessata principale. Un'ulteriore prova di tale ampiezza è data dalla temperatura dell'acqua che si mantiene costantemente intorno agli

8 – 9 °C, con ottime caratteristiche chimiche (Celico 1973).

L'ampiezza del bacino è confermata dall'analisi delle curve di deflusso. È sufficiente osservare che tra il massimo pluviometrico ed il periodo di piena della sorgente intercorrono circa sei mesi a causa dei lunghi tempi di corrivazione sotterranea.

Studi effettuati nel 1928 tramite pozzi rilevarono la presenza di argille varicolori che si appoggiavano sul complesso arenaceo (B in Fig. 5). Un lembo impermeabile del complesso sicilide (Tabella 1) è in sovrapposizione tettonica sui calcari acquiferi. A tetto delle argille varicolori, fu individuato un sottile lembo di alluvioni (Bruno 1911 – Fig. 4)

Il medesimo acquifero carbonatico (A in fig. 5) affiora nella prospiciente altura delle Coste S. Lucia, come ha dimostrato il traforo della Galleria Pavoncelli che, intercettando l'acquifero stesso, ha prodotto un'immediata riduzione della portata della sorgente Sanità (Cotecchia 1993 b).

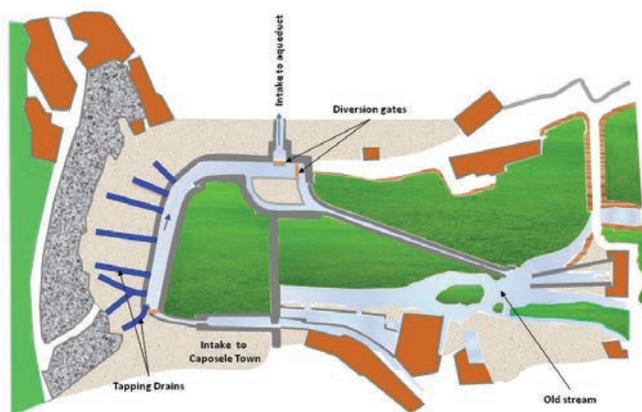


Fig. 4 - La captazione della Sorgente Sanità (Bruno 1921, ricolorata).

Fig. 4 - The Sanità Spring tapping work (Bruno 1921, recolored).

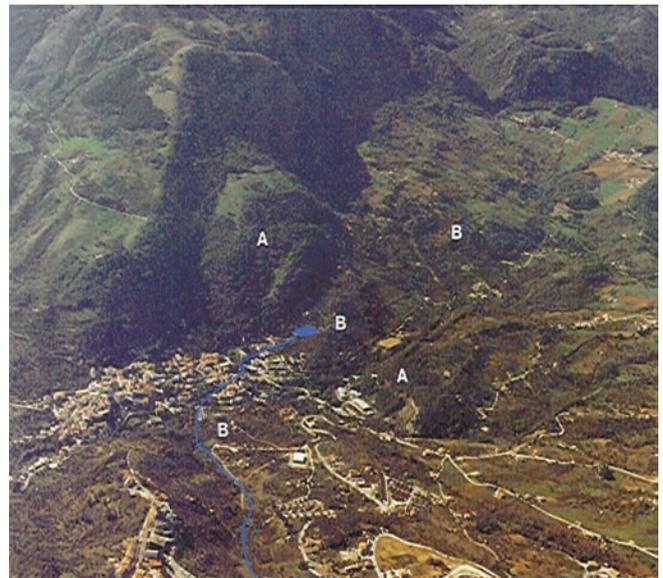


Fig. 5 - La sorgente Sanità di Caposele nel suo ambito geografico e idrogeologico: A = acquifero carbonatico; B = terreni impermeabili relativi (Cotecchia 1993, integrato Civita 2005 b).

Fig. 5 - Sanità spring at Caposele in the geographic and hydrogeological mode: A = Carbonate aquifer; B = impervious terrains (Cotecchia, 1993; integration: Civita, 2005 b).

Tab. 1 - Caratteristiche geolitologiche e idrogeologiche dei complessi che formano il massiccio del Cervialto e le aree circostanti. (le ID sono riferite alla Figura 2).
 Tab. 1 - *Geolithological and hydrogeological features of complexes forming the Cervialto massif and neighbor areas (ID referred to Fig. 2).*

Complessi idrogeologici	Età geologica	Litologia	Caratteristiche idrogeologiche	Ruolo idrostrutturale
Falda detritica	Recente	Elementi grossolani sciolti che sormontano le pareti di pendii ripidi	Permeabilità medio-elevata, che ricevono talvolta flussi sotterranei di altri complessi	Piccoli acquiferi locali
Alluviale	Recente	Sedimenti alluviali mescolati sciolti (ghiaie, sabbie e limi prevalenti) associati con piroclastiti	Permeabilità medio-elevata, raccolgono acque superficiali e a volte flussi da altri complessi	Piccoli acquiferi locali
Eluviale e piroclastiti	Quaternario	Materiali eluviali con matrice piroclastica fine; emissioni piroclastiche fini, molto argillificate nelle depressioni	Il manto piroclastico (impermeabile) sovrapposto ai pendii in calcari e nelle depressioni comporta condizioni di laghi temporanei lentamente drenati da larghe fratture sotterranee e dagli inghiottitoi	Infiltrazione secondaria dalle depressioni via inghiottitoi, se allagati
Breccie di pendio	Quaternario	Elementi grossolani cementati da cemento calcitico talvolta carsificati	Breccie grossolane con permeabilità tripla (porosità, fratturazione carsismo) – Rari acquiferi locali	Piccole sorgenti, spesso collegate a flussi sotterranei dell'acquifero principale
Arenaceo-marnoso	Cenozoico	Arenarie brune e conglomerati, alternati a marne, in facies di flysch	La facies di flysch fornisce un'importante variazione della litologia; Il grado di permeabilità varia tra ogni membro nell'insieme ma rimane molto basso nel complesso	Impermeabile, soglia di permeabilità per l'acquifero principale
Carbonato-marnoso	Cenozoico	Livelli di calcari detritici associati con marne rosse e scisti silicei	La facies di flysch fornisce un'importante variazione della litologia; Il grado di permeabilità varia tra ogni membro nell'insieme ma rimane molto basso nel complesso	Impermeabile, soglia di permeabilità per l'acquifero principale
Argille scagliose	Cenozoico – Mesozoico	Argille scagliose multicolori e marne mescolate ad una frazione lapidea più o meno abbondante	Argille scagliose caotiche e spesso plastiche, non fratturate, con una basso o nullo coefficiente d'infiltrazione ($\chi = 0,1 \div 0,0$)	Impermeabile basale, genera le soglie di permeabilità per l'acquifero principale
Calcareo	Mesozoico	Calcari fratturati e carsificati, stratificati e talvolta massicci	Grado di permeabilità elevato per indice di fratturazione (FI) e indice di carsismo (KI). Elevato $\chi = 0,9 \div 1,0$; ruscigliamento nullo (infiltrazione secondaria da depressioni tettonico-carsiche)	Acquifero principale
Calcareo-dolomitico	Mesozoico	Calcari alternati a calcari dolomitici e a dolomie carbonatiche, fortemente fratturati	Grado di permeabilità medio-alto per elevato indice di fratturazione (FI), scarso indice di carsismo (KI), in media $\chi = 0,7 \div 0,8$.	Acquifero, aggiunto a quello principale
Dolomitico	Mesozoico	Dolomie poco stratificate o massicce, fortemente fratturate e a tratti cataclaste in areniti lungo le faglie principali	Permeabilità media per elevato FI ma con scarso KI. La permeabilità è quasi nulla se la roccia è fortemente cataclaste o/e quando le fratture sono riempite da dolomite residuale e limo	Acquifero minore quando fratturato, limiti e soglie di permeabilità a causa della diminuzione di permeabilità rispetto all'acquifero

Idrodinamica dell'acquifero

L'intero massiccio del Cervialto alimenta la sorgente Sanità. Ciò significa che, nella sua notevole interezza, il massiccio può essere considerato unico come acquifero carbonatico; si tratta, dunque, di un caso molto particolare che si aggiunge ad altri considerati "Massicci Carbonatici Campione" come quello descritto da Drogue (1967) per la Francia meridionale e quello descritto da Shakhori et al. (1965) per Israele.

Sono stati utilizzati i dati di portata della sorgente Sanità, misurati quotidianamente dai gestori dell'Ente Autonomo per l'Acquedotto Pugliese dal 1919 al 1999 e successivamente dalla società AQP Acquedotto Pugliese s.p.a. che, attualmente, si occupa della captazione e della distribuzione dell'acqua attraverso l'Acquedotto Pugliese. Su questa base, è stato possibile ricostruire ed analizzare l'intero idrogramma riferito ad un periodo di quasi cento anni, precisamente dall'inizio del 1920 alla fine del 2009, pur con un piccolo "buco" dovuto alla tipologia di raccolta dei dati stessi (Fig. 6).

Come si può notare osservando l'idrogramma, il regime della sorgente varia notevolmente negli anni. La portata oscilla tra un minimo di 2,5 m³/s ed un massimo di quasi 7,5 m³/s.

Sono molto evidenti alcuni periodi che si differenziano rispetto agli altri poiché la portata massima risulta molto elevata, maggiore di 5,5 m³/s. Si tratta di anni che, come si vedrà in seguito con l'analisi dell'idrogramma di magra, sono stati preceduti e, a volte, accompagnati da precipitazioni di notevole entità e sono quindi caratterizzati dalla presenza di un discreto volume di infiltrazione secondaria.

D'altra parte, si sono verificati periodi nei quali la portata è stata molto depressa rispetto alle medie: si tratta del periodo dal 1944 al 1950 dovuto al riempimento delle conche da parte dei materiali vulcanici; ed al periodo dal 1986 al 1993, dovuto ad un notevole diminuzione dei quantitativi piovosi.

Il bilancio idrogeologico medio è stato effettuato tenendo

conto del bilancio reale che è stato possibile stabilire, tenendo conto delle infiltrazioni effettive dai campi tettonico-carsici del Lago Laceno e di altri settori similari a deflusso endoreico. L'espressione considerata è:

$$P_s = E_r + (I_p + I_{ps}) + (R_p - I_{ps}) \quad (1)$$

nella quale P_s equivale al totale medio di precipitazione, E_r è l'evapotraspirazione, I_p è l'infiltrazione reale, R_p è il ruscellamento potenziale. L'infiltrazione viene incrementata con le quantità di ruscellamento nelle aree endoreiche (I_{ps}) mentre le stesse sono tolte dal ruscellamento totale.

In media generale si ottiene:

$$259,86 = 84,30 + 145,96 + 29,61 \text{ Mm}^3 \quad (1bis)$$

che, in termini percentuali, si esprime:

$$100 = 32,44 + 56,17 + 11,39 \quad (1ter)$$

Il bilancio reale può calcolarsi anche con la classica espressione:

$$P_s = E_r + I + R \quad (2)$$

L'equazione si può scrivere anche nel modo percentuale:

$$259,86 = 84,30 + 144,32 + x \quad (2bis)$$

Per differenza, si calcola il valore del ruscellamento, unica incognita dell'equazione (2bis), ottenendo in fine $R = 31,21 \text{ Mm}^3$. A paragone della (1bis) si osserva che i volumi si discostano solo dell'1,1%.

Il volume complessivo erogato dalla Sorgente viene calcolato allo scopo di paragonarlo con il dato calcolato da Garofalo (1976). A questo scopo sono considerati i dati di portata nel periodo 1930 – 1942 (Tabella 2).

Si ottiene, dunque, un valore pari a 138,12 Mm³ che si avvicina moltissimo a quello di infiltrazione calcolato in (1bis): la lieve differenza può essere imputato alla portata di alcune piccole sorgenti (riportate in Fig. 2), la portata media delle quali è minore di 1 l/s per ciascuna.

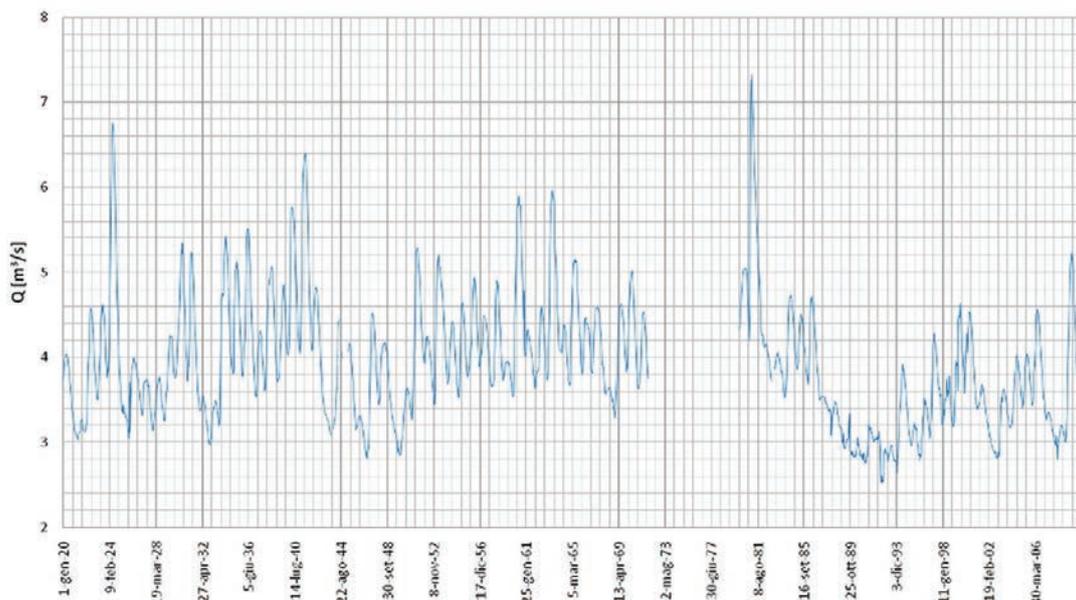


Fig. 6 - Portate della Sorgente Sanità di Caposele dal 1920 al 2009.

Fig. 6 - Sanità Spring at Caposele: discharges from 1920 to 2009.

Tab. 2 - Dati medi di portata sorgiva 1930 – 1942.

Tab. 2 - Yearly spring discharge data 1930 – 1942.

Anno	Q (m ³ /s)
1930	4,57
1931	4,37
1932	3,33
1933	3,32
1934	4,75
1935	4,42
1936	4,67
1937	3,89
1938	4,56
1939	4,27
1940	4,97
1941	5,44
1942	4,37
Media	4,38

Applicazione dei modelli matematici

Per analizzare l'andamento della Sorgente Sanità si è utilizzato il metodo di analisi matematica dell'intera curva di svuotamento (Mangin 1975) ulteriormente semplificato (Civita et al. 2005 a) e del tutto consolidato in Civita (2008).

Tale modello si basa sulla seguente equazione:

$$Q_t = Q_{R_0} e^{-\alpha t} + q_0 \frac{1 + \eta t}{1 + \varepsilon t} \quad [m^3 / s] \quad (3)$$

La prima delle due espressioni al secondo membro rappresenta l'esaurimento in regime non influenzato della parte satura del sistema. Si può notare come tale espressione coincida con il modello proposto da Maillet (1905).

Q_t è la portata sorgiva ad un tempo $t \neq 0$, Q_{R_0} rappresenta la portata al tempo t_0 , mentre α è il coefficiente di esaurimento della sorgente e si ricava dalla seguente espressione:

$$\alpha = \frac{\sqrt{Q_0} - \sqrt{Q_t}}{\sqrt{Q_t} t} \quad (4)$$

Il coefficiente è direttamente collegato alla risorsa immagazzinata all'inizio dell'esaurimento e allo spessore della zona satura. Per maggiori approfondimenti si rimanda alla trattazione di Schoeller (1967).

La seconda espressione al secondo membro rappresenta lo svuotamento dell'insaturo in presenza di infiltrazione. Essa è retta da due coefficienti: il coefficiente di eterogeneità di deflusso ε ed il coefficiente di velocità d'infiltrazione η .

Il primo regge l'attenuarsi della velocità d'infiltrazione in funzione delle caratteristiche della rete di fratture e condotti. Il secondo determina la velocità con cui l'acqua d'infiltrazione si sposta nell'insaturo.

La procedura, in sintesi, prevede di isolare i valori di portata giornalieri partendo dal picco di piena. Per ottenere un'analisi migliore è utile ripulire la curva dalle irregolarità causate dalle piene parassite che possono verificarsi durante l'anno poiché queste non influenzano in maniera rilevante lo svuotamento dell'acquifero (Civita et al. 2005 a)

In questo modo si ottiene un buon allineamento, specialmente per quanto riguarda la parte terminale dei dati relativi alla curva di esaurimento non influenzata dall'infiltrazione (Fig. 7). Tracciando una retta best - fitting su tali dati e prolungandola sino ad intercettare l'asse delle ordinate si ricava il valore Q_{R_0} , cioè il valore della portata all'inizio dell'esaurimento (Fig. 8 e 9).

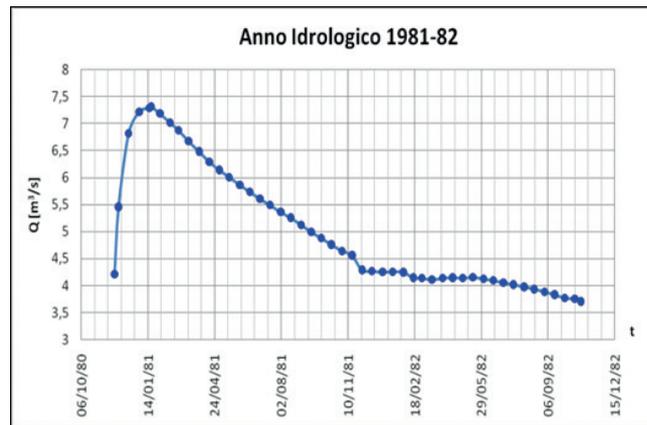


Fig. 7 - Esempio di idrogramma ripulito dalle piene parassite. Si possono osservare un primo tratto crescente che rappresenta la fase di ricarica dell'acquifero ed un secondo decrescente che indica la fase di svuotamento.

Fig. 7 - Hydrogram of Spring discharge cleaned from parasite run-off. A first part of hydrogram present the aquifer e recharge phase, the second present the recession curve.

Introducendo questo valore nell'equazione di Maillet, dopo aver calcolato il coefficiente di esaurimento α , si ottiene un'equazione che rappresenta la portata di esaurimento delle riserve della parte satura dell'acquifero:

$$Q_t = Q_{R_0} e^{-\alpha t} \quad [m^3 / s] \quad (5)$$

Il passo successivo consiste nel considerare i dati giornalieri della curva di svuotamento precedentemente depurata, ai quali vengono sottratti, a partire dal tempo $t = 0$, i valori appena ricavati, ottenendo così una nuova curva che rappresenta lo svuotamento dell'insaturo in presenza di un volume di infiltrazione.

Quest'ultima curva è retta dall'equazione a secondo membro nella funzione di Mangin:

$$Q_t = q_0 \frac{1 + \eta t}{1 + \varepsilon t} \quad [m^3 / s] \quad (6)$$



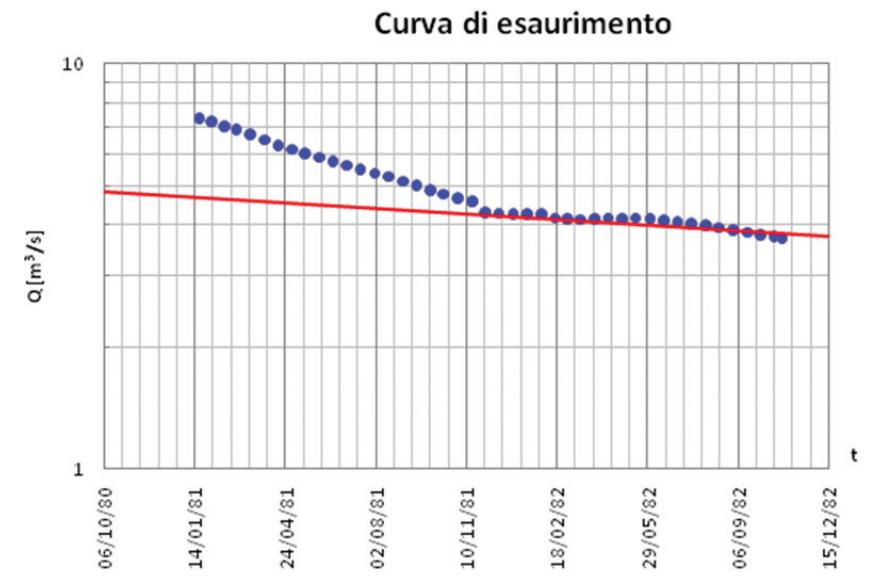


Fig. 8 - Analisi della curva di esaurimento in campo semi - logaritmico. In rosso si può notare la retta best - fitting utilizzata per estrapolare il valore di portata all'inizio dell'esaurimento Q_{R_0} , in questo caso è stata scelta pari a $4,9 \text{ m}^3/\text{s}$.

Fig. 8 - Recession curve analysis in semi - logarithm field. In red is possible to seat the best-fitting strike line to determine the effective discharge Q_{R_0} .

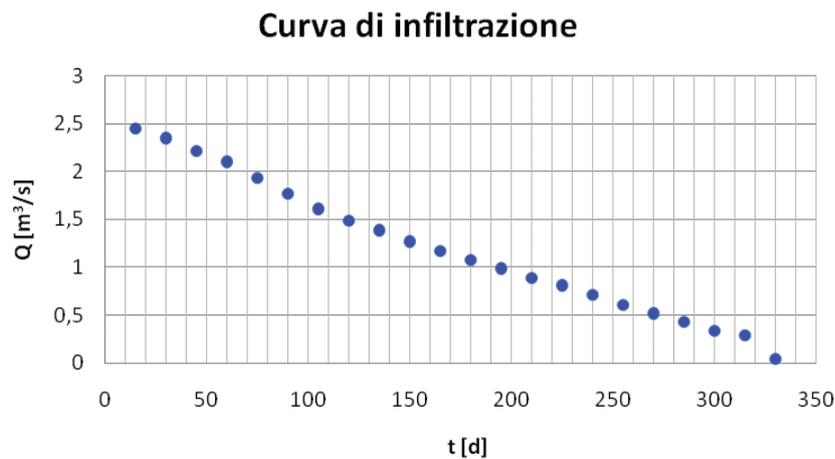


Fig. 9 - Curva di infiltrazione retta dall'equazione (4).

Fig. 9 - Infiltration curve (ref. equation 4).

A questo punto è necessario calcolare il valore del coefficiente di eterogeneità di deflusso ε . Per comodità di calcolo si è utilizzata la procedura proposta da Civita et al. (2005 a) che, pur semplificata rispetto alla procedura classica, utilizza un approccio statistico molto più corretto. Questa procedura si fonda sul trovare una curva di infiltrazione che si adatti nel miglior modo possibile all'idrogramma misurato. Si cerca, quindi, il valore più indicato di ε facendo variare questo parametro e scegliendo quello che dà origine alla curva che più si avvicina ai punti reali (Fig. 10).

Il discostamento dei due andamenti nei primi giorni si ritiene dovuto ad un disturbo provocato alla curva di infiltrazione dalle precipitazioni non ancora esaurite. In questo modo si è riusciti ad evidenziare che il termine relativo all'infiltrazione ha ca. 300 d dopo i quali inizia la curva di svuotamento.

Risultati ottenuti

Con le metodologie precedentemente considerate sono stati preparati i risultati ottenuti per tutti gli anni dei quali si dispone delle intere portate. Tali risultati sono riportati in Tabella 3 per ogni ciclo determinato dalla minima a quella successiva.

Anche se la Tabella 3 può sembrare piuttosto complicata, deve essere chiaro che ciascun simbolo rappresenta un parametro di grande risalto per il ciclo considerato.

Procedendo da sinistra, si può osservare il valore di Q_{in} ossia la portata della Sorgente al momento d'inizio dell'esaurimento. Seguono, poi, la portata finale (Q_{fin}) e quella d'indirizzo della curva di identificazione (Q_t). Le successive sono le portate ad inizio della regressione ($Q_{t=0}$) e la portata ritrovata prolungando la curva di esaurimento (Q_{R_0}).

Calcolo di Epsilon

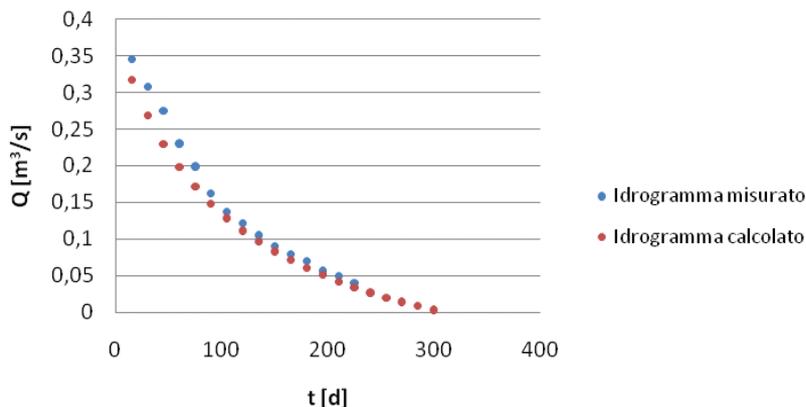


Fig. 10 - Sovrapposizione della curva d'infiltrazione misurata e calcolata. È evidente come la curva calcolata si adatti ottimamente ai dati misurati, specialmente nel tratto finale.

Fig. 10 - Superposition of the infiltration curves measured and calculated.

Segue la portata dell'infiltrazione (q_0) ed i tre tempi: il tempo finale del ciclo (t_{tot}), il tempo di svuotamento (t_{svuot}) e, negli anni nei quali si realizza l'infiltrazione diretta, il tempo finale del travaso (t_i).

I successivi valori sono: il volume della riserva per il valore di Q_{R_0} (W_0), il volume dell'infiltrazione diretta (W_{inf}) ed il volume residuale al termine del ciclo (W_{res}).

Utilizzando le trasformazioni delle curve di esaurimento (cfr. Civita 2008), vengono forniti i dati relativi alla ΔW_i , che rappresenta il consumo delle risorse regolatrici in assenza di ricarica, il tasso di rinnovamento medio (T_{rin}), il tempo minimale del rinnovamento (T_{mr}) ed il tempo di permanenza della disponibilità della riserva in mancanza di pioggia (DT_c).

I valori successivi nella Tabella rappresentano la piovosità (I_w) e la quantità effettiva delle piogge nel ciclo (I_{sb}).

I valori che seguono sono il fattore alfa (α) che caratterizza tutta la curva di esaurimento e, nei casi di infiltrazione diretta, i valori ritrovati di η' e di ε che caratterizzano l'andamento nel tempo del processo infiltrativo negli anni nei quali si è effettivamente registrato.

Discussione dei risultati

Per ognuno dei cicli è stato eseguita una scheda caratteristica che qui non può essere riportata per assenza di spazio. Si tratta di circa 80 schede che riportano, ognuna, le portate dell'anno, la curva effettiva di deflusso, la curva di decremento e quella di esaurimento.

Facendo riferimento alle schede (e quindi alla Tabella 3 che riporta i dati definitivi) si devono identificare i risultati che qui vengono discussi.

A vantaggio della captazione, va considerata la differenza tra le portate massime del ciclo con quelle minime. Dai dati in Tabella 3 si osserva che, in media, ai minimi stagionali

rimangono nell'acquifero l'87,2% della portata teorica. Ciò significa che la captazione, così come è, produce solo una piccola parte di risorse. Una posizione diversa della captazione, più bassa rispetto all'attuale, potrebbe produrre una notevole portata, maggiore di quella attuale, senza interessare in alcun modo l'ecologia dell'acquifero e, tra l'altro, affrancando la tendenza al franamento più volte riscontrate (Cotecchia et al. 1986). Ciò è evidenziato dai dati di Q_{R_0} che, in assenza di infiltrazione diretta, sono simili a quelli iniziali della curva di efflusso sorgivo. Anche alcuni degli altri indici calcolati permettono di valutare la effettiva produttività della captazione della Sorgente, a cominciare dal valore di W_0 che, in media, assomma a 429 Mm³ e quello di W_{res} che vale 374 Mm³.

Nella Fig. 11 si può riscontrare che i volumi seguono una distribuzione con picco spostato a sinistra. La maggior parte dei valori di W_0 si concentra nell'intervallo tra 300 Mm³ e 500 Mm³, mentre sono pochi i valori che superano i 600 Mm³.

Proprio grazie all'elevato volume delle riserve, la sorgente gode di un delay-time molto elevato. Infatti, nel caso del tutto teorico di cessazione della ricarica, l'acquifero potrebbe fornire una portata media di circa 3,5 m³/s per poco più di tre anni. Il dato è molto interessante perché il gestore della captazione, in caso di problemi di scarsa ricarica attiva della sorgente, potrebbe, ipoteticamente, continuare a rifornire gli utenti per un periodo molto elevato.

Un'altra caratteristica interessante è che la sorgente ha una capacità di svuotamento annua del sistema superiore ai 75 milioni di m³. Da ciò si deduce che ogni anno viene rinnovato un volume d'acqua pari al 15 - 20% del totale. Per rinnovare l'intero volume occorrono approssimativamente 5 - 7 anni.

Mediamente, l'anno idrogeologico della sorgente Sanità dura più di 420 giorni anche se occasionalmente si verificano alcuni anni idrogeologici di lunghezza molto maggiore (ad

Tab. 3 - Risultati ottenuti.
Tab. 3 - Obtained results.

Anno Idrologico	Q _{mi} (m ³ /s)	Q _{em} (m ³ /s)	Q _t (m ³ /s)	Q _{co-0} (m ³ /s)	Q _{ro} (m ³ /s)	q ₀ (m ³ /s)	t _{cor} (d)	t _{svuar} (d)	t _i (d)	W ₀ (Mm ³)	W _{inf} (Mm ³)	W _{res} (Mm ³)	ΔW _f (Mm ³ /y)	T _{fm} (%)	t _{mr} (ann)	DT _t (d)	I _w (mm)	I _{sv} (mm/y)	α	η' (d ⁻¹)	ε
1902-1903	4,26	3,98	3,98	5,15	5,72			304		441		314	127	28	3	914	3266	940	0,00112		
1903	4,13	3,63	3,63	6,55	4,25			123		286		245	41	14	7	782	2118	303	0,00128		
1903-1904	3,50	3,67	3,67	5,85	5,85			245		252		155	97	38	2	489	1866	718	0,00200		
1905	3,85	4,07	4,07	4,69	4,69			183		526		457	69	13	7	1299	3896	511	0,00077		
1906	4,14	3,86	3,86	4,94	4,94			214		368		287	81	22	4	861	2726	600	0,00116		
1920-1921	3,74	3,03	3,03	4,04	3,30	0,74	471	365	260	1196	7,0	1097	99	8	12	4197	8860	733	0,00024	0,00384	0,00020
1921	3,03	3,12	3,12	3,27	3,27		244	92		554		529	25	4	22	1962	4103	185	0,00051		
1922	3,17	3,50	3,50	4,57	4,50		412	230		388		315	73	20	5	1042	2874	585	0,00100		
1923	3,50	3,76	3,76	4,60	4,75		288	123		217		172	45	20	5	529	1607	333	0,00189		
1924-1925	3,85	3,33	3,33	6,68	4,95	1,73	517	304	215	328	201,0	221	107	32	3	768	2429	792	0,00130	0,00465	0,00300
1926-1927	3,10	3,31	3,31	3,99	4,20		426	276		420		331	89	21	5	1158	3111	659	0,00086		
1927	3,31	3,13	3,13	3,72	3,72		349	169		312		262	50	16	6	969	2311	370	0,00103		
1927-1928	3,13	3,25	3,25	3,77	3,77		366	153		339		293	46	13	7	1044	2511	340	0,00096		
1929	3,29	3,76	3,76	4,25	4,25		335	92		272		241	31	11	9	743	2014	229	0,00135		
1930	3,83	3,72	3,72	5,35	5,40		411	161		201		139	62	31	3	433	1488	459	0,00232		
1931-1932	3,72	3,37	3,37	5,18	4,30	0,88	425	238	168	393	5,0	308	85	22	5	1058	2911	629	0,00095	0,00595	0,00151
1932-1933	3,37	2,98	2,98	3,55	3,55		321	222		557		467	90	16	6	1817	4125	666	0,00055		
1933	2,98	3,19	3,19	3,49	3,54		289	124		364		328	36	10	10	1190	2696	266	0,00084		
1934	3,19	3,80	3,80	5,42	4,48	0,94	441	230	183	538	8,0	456	82	15	6	1390	3985	607	0,00072	0,00546	0,00095
1935	3,80	3,77	3,77	5,12	5,12		319	184		266		196	70	26	4	602	1970	518	0,00166		
1936-1937	3,77	3,53	3,53	5,43	4,30	1,13	428	230	199	433	8,0	356	77	18	5	1167	3207	570	0,00086	0,00500	0,00280
1937	3,53	3,60	3,60	4,26	4,26		288	123		269		228	41	15	6	733	1992	303	0,00137		
1938	3,60	3,70	3,70	5,06	5,20		411	185		250		180	70	28	3	563	1851	518	0,00180		
1939	3,70	4,03	4,03	4,86	4,86		334	138		323		270	53	16	6	776	2392	392	0,00130		
1940	4,03	4,05	4,05	5,74	4,64	1,10	366	231	184	675	8,0	589	86	13	8	1685	5000	637	0,00059	0,00543	0,00010
1941-1942	4,05	4,08	4,08	6,37	4,95	1,42	396	216	184	476	10,0	392	84	17	5	1113	3525	622	0,00090	0,00543	0,00200
1942-1943	4,08	3,09	3,09	4,75	3,68	1,07	623	428	215	779	8,0	654	125	16	6	2450	5770	925	0,00041	0,00465	0,00300
1943-1944	3,15	3,75	3,75	4,42	4,44		461	153		344		290	54	15	6	896	2548	400	0,00111		
1945	3,79	3,14	3,14	4,15	4,30		367	205		242		177	65	26	4	652	1792	481	0,00153		
1946	3,15	2,79	2,79	3,30	3,35		344	203		321		268	53	16	6	1112	2377	392	0,00090		
1947	2,79	3,42	3,42	4,49	4,05	0,44	396	199	166	412	0,4	348	64	15	4	1178	3066	474	0,00085	0,00602	0,00002
1948-1949	3,44	2,83	2,83	4,15	3,40	0,75	366	480	411	769	9,0	641	128	16	6	2622	5696	948	0,00038	0,00243	0,00400
1950	2,83	3,24	3,24	3,61	3,70		368	166		400		350	50	12	8	1250	2963	370	0,00080		
1951	3,25	3,92	3,92	5,27	4,35	0,92	411	241	181	860	8,0	774	86	10	10	2288	6370	637	0,00044	0,00552	0,00195
1952	3,92	3,44	3,44	4,23	4,23		320	242		457		377	80	17	6	1269	3385	592	0,00080		
1953	3,44	3,66	3,66	5,20	5,87		427	297		319		199	120	37	2	629	2363	888	0,00159		
1954	3,82	3,51	3,51	4,39	4,49		349	396		646		510	136	21	5	1682	4785	1007	0,00060		
1955	3,51	3,76	3,76	4,63	4,80		304	189		319		250	69	21	5	771	2362	511	0,00130		

1956	3.76	3.87	3.87	3.87	4.94	4.94	4.94	4.94	3.81	174	304	238	66	22	5	712	2251	488	0.00140	
1957	3.98	3.63	3.63	3.63	4.48	4.48	4.48	4.48	380	244	452	367	85	18	5	1170	3348	188	0.00086	
1958	3.65	3.71	3.71	3.71	4.89	4.89	4.89	4.89	396	198	274	200	74	27	4	623	2029	548	0.00160	
1959	3.72	3.53	3.53	3.53	3.95	3.95	3.95	3.95	319	161	422	370	52	12	8	1215	3126	385	0.00082	
1960	3.53	4.01	4.01	4.01	5.81	5.81	6.00	6.00	381	164	210	140	70	33	3	404	1555	518	0.00246	
1961	4.02	3.60	3.60	3.60	4.29	4.29	4.29	4.29	320	201	426	358	68	16	6	1150	3155	503	0.00087	
1962	3.82	3.72	3.72	3.72	4.38	4.38	4.74	4.74	410	191	322	253	69	21	5	788	2387	511	0.00127	
1963	3.73	4.03	4.03	4.03	5.92	5.92	5.92	5.92	456	173	230	157	73	31	3	451	1703	540	0.00222	
1964	4.03	3.65	3.65	3.65	4.32	4.32	4.05	4.05	275	154	515	464	51	10	10	1472	3814	377	0.00068	
1965	3.66	3.76	3.76	3.76	5.03	5.03	4.40	4.40	396	190	460	405	55	12	8	1247	3407	407	0.00083	
1966	3.81	3.79	3.79	3.79	4.37	4.37	4.37	4.37	319	109	290	252	38	13	8	770	2168	281	0.00130	
1967-1968	3.81	3.60	3.60	3.60	4.59	4.59	4.72	4.72	442	229	340	258	82	24	4	829	2518	607	0.00120	
1968	3.55	3.28	3.28	3.28	3.62	3.62	3.61	3.61	335	154	501	455	46	9	11	1606	3711	340	0.00062	
1968-1969	3.28	3.83	3.83	3.83	4.63	4.63	4.63	4.63	334	166	350	290	60	17	6	876	2592	444	0.00114	
1970	3.85	3.62	3.62	3.62	5.01	5.01	4.35	4.35	0.66	381	399	332	67	17	6	1061	2955	496	0.00094	0.00559
1971	3.63	3.75	3.75	3.75	4.53	4.53	4.60	4.60	319	139	270	220	50	18	5	679	2000	370	0.00147	
1980	4.33	4.21	4.21	4.21	5.05	5.05	5.15	5.15	329	133	293	240	54	18	5.5	659	2173	397	0.00152	
1981-82	4.21	3.71	3.71	3.71	7.32	7.32	4.90	4.90	2.42	693	980	742	238	24	4.1	2315	7259	1763	0.00043	0.00303
1983	3.71	3.51	3.51	3.51	4.05	4.05	4.15	4.15	341	232	497	420	77	15	6.5	1385	3679	567	0.00072	
1984	3.51	3.85	3.85	3.85	4.73	4.73	5.15	5.15	381	199	305	228	77	25	4.0	686	2261	569	0.00146	
1985	3.85	3.67	3.67	3.67	4.50	4.50	4.80	4.80	353	225	348	266	82	24	4.3	839	2578	606	0.00119	
1986-87	3.67	3.09	3.09	3.09	4.72	4.72	3.90	3.90	0.82	730	889	704	185	21	4.8	2639	6588	1373	0.00038	0.00392
1988-89	3.09	2.92	2.92	2.92	3.48	3.48	3.50	3.50	431	319	529	441	88	17	6.0	1751	3922	653	0.00057	
1989-90	2.92	2.76	2.76	2.76	3.33	3.33	3.20	3.20	669	516	957	825	133	14	7.2	3463	7092	982	0.00029	
1991-92	2.79	2.46	2.46	2.46	3.18	3.18	3.18	3.18	504	351	537	456	81	15	6.6	2144	3979	601	0.00047	
1992-93	2.54	2.63	2.63	2.63	2.96	2.96	3.10	3.10	490	186	305	259	46	15	6.6	1139	2260	340	0.00088	
1994	2.67	2.96	2.96	2.96	3.91	3.91	3.75	3.75	0.16	439	386	304	82	21	4.7	1192	2861	606	0.00084	0.000513
1995	2.97	2.82	2.82	2.82	3.23	3.23	3.30	3.30	290	192	348	298	51	15	6.9	1221	2580	375	0.00082	
1996	2.83	3.04	3.04	3.04	3.52	3.52	3.70	3.70	289	183	297	244	53	18	5.6	928	2198	393	0.00108	
1997-98	3.08	3.20	3.20	3.20	4.28	4.28	3.75	3.75	0.53	455	697	594	102	15	6.8	2150	5160	757	0.00047	0.000513
1998	3.28	3.18	3.18	3.18	3.78	3.78	3.76	3.76	279	218	423	358	65	15	6.5	1301	3133	483	0.00077	
1999	3.22	3.58	3.58	3.58	4.64	4.64	4.85	4.85	349	144	198	146	52	26	3.8	473	1469	385	0.00211	
2000	3.68	3.38	3.38	3.38	4.53	4.53	4.15	4.15	0.38	390	419	341	78	19	5.4	1169	3105	578	0.00086	0.00370
2001-02	3.40	2.81	2.81	2.81	3.68	3.68	3.30	3.30	0.38	646	906	772	135	15	6.7	3179	6714	997	0.00031	0.00323
2003	2.82	3.17	3.17	3.17	3.63	3.63	4.15	4.15	406	209	277	211	66	24	4.2	772	2051	486	0.00129	
2004	3.17	3.39	3.39	3.39	4.02	4.02	4.20	4.20	404	195	332	268	64	19	5.2	914	2457	472	0.00109	
2005	3.43	3.43	3.43	3.43	4.03	4.03	4.15	4.15	307	166	312	258	54	17	5.8	871	2314	401	0.00115	
2006	3.47	3.26	3.26	3.26	4.56	4.56	4.25	4.25	0.31	441	401	308	94	23	4.3	1092	2971	693	0.00092	0.000513
2007	3.27	2.80	2.80	2.80	3.36	3.36	3.45	3.45	343	286	410	333	77	19	5.3	1375	3035	570	0.00073	
2008	2.90	3.00	3.00	3.00	3.20	3.20	3.30	3.30	250	128	378	343	35	9	10.9	1324	2797	258	0.00076	
2009	3.02	3.72	3.72	3.72	5.22	5.22	5.25	5.25	380	183	241	171	70	29	3.4	531	1785	520	0.00188	
Media	3.50	3.46	3.46	3.46	4.50	4.50	4.52	4.52	0.82	424	208	374	76	19	6.0	1222	3175	556	0.00104	0.00580
										231	429	15.2	208	19	6.0	1222	3175	556	0.00104	0.00197

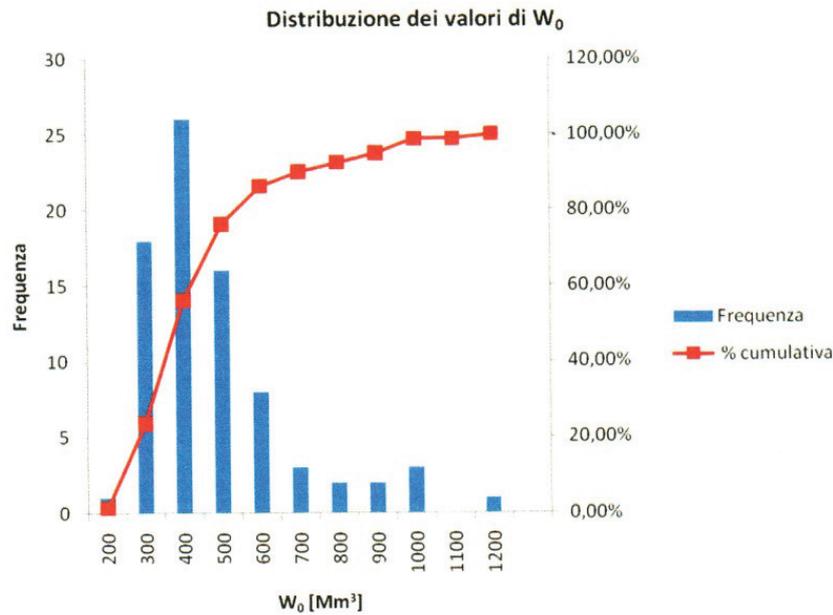


Fig. 11 - Distribuzione dei valori di W_0 . Si nota il picco che raggiunge circa 400 Mm^3 .

Fig. 11 - W_0 values distribution.

esempio tra il 1986 e il 1987, l'anno idrogeologico è durato 730 giorni). Quasi tutti gli anni mostrano evidenti picchi di portata preceduti da eventi precipitativi mediamente superiori a quelli a cui è normalmente sottoposto il territorio in esame. Solitamente gli eventi responsabili di un repentino aumento della portata sorgiva si sono verificati tra i sei ed i dieci mesi precedenti il picco. In particolare, gli eventi meteorologici di maggior rilievo accadono tra ottobre e dicembre. Nei mesi invernali, sono stati rilevati dalle stazioni a quote maggiori anche fenomeni nevosi. Proprio per questo motivo, in alcuni idrogrammi sono visibili due picchi di portata sorgiva, il primo relativo allo scioglimento della neve ed il successivo legato alle piogge.

Purtroppo, non esiste una serie di valori delle risalite del Lago Laceno, con la quale si potrebbe effettuare una statistica tra t_i e le risalite del Lago.

Le situazioni di infiltrazione diretta sono, in pratica, solo 19 sui 79 cicli esaminati. In questi casi, è stata calcolata una portata variabile tra 2,42 m^3/s (su 330 d) e 0.16 m^3/s (su 195 d). Ciò significa che tali scarse portate raggiungono l'acquifero in tempi molto lunghi e, dunque, non hanno un particolare valore in termini di inquinamento potenziale. Per tempi tanto lunghi, non è certo possibile pensare a punti di iniezione prossimi alla sorgente ma, piuttosto, a infiltrazione diretta da inghiottitoi molto lontani come quelli del Lago Laceno.

Il valore di α è più basso di un fattore rispetto alla maggioranza degli altri, anche se questa diminuzione è visibile in molti altri cicli privi di infiltrazione diretta. In media, α vale 0,0034, ossia un valore strettamente collegato alle sorgenti alimentate da calcari carsici, con ampia struttura alle spalle

composta da rocce a permeabilità elevata nel loro complesso e, dunque, a vulnerabilità molto elevata. Il basso livello di α significa che l'acquifero è molto esteso in larghezza e lunghezza, il che è perfettamente rappresentato dai risultati di bilancio.

Tenuto conto di ciò, sono state calcolate le aree di salvaguardia della Sorgente sulla base della situazione D (Civita 1995 e 2008). Mentre la ZTA (zona di tutela assoluta) è desumibile dall'andamento della captazione (Bruno 1921) con limiti di 10 m dai diversi punti, la ZR (zona di rispetto) avrà una dimensione di 200 m basata sulle relative elongazioni trapezoidali.

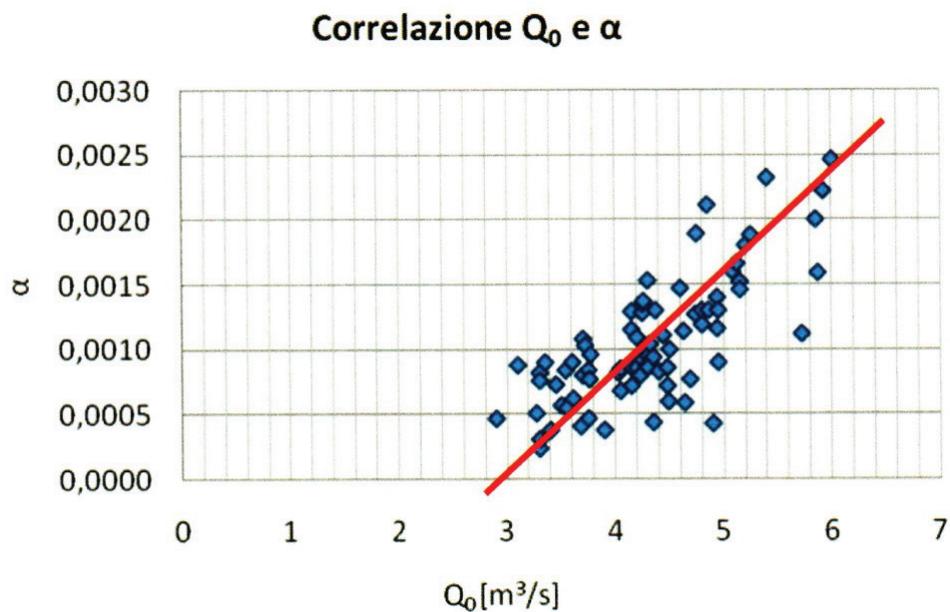
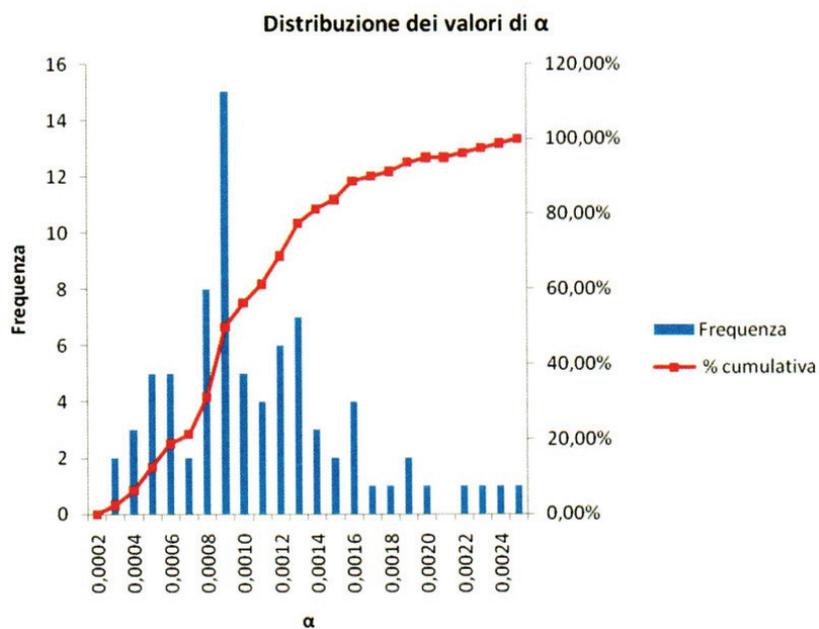
D'altra parte, il massiccio è in gran parte soggetto al Parco Nazionale dei Picentini e, nelle aree intorno al Lago Laceno dove sussistono attrezzature sportive e nuovi insediamenti, non sembra ci siano particolari perdite inquinanti che solo con l'infiltrazione diretta potrebbero raggiungere l'acquifero.

Da un punto di vista statistico, è stato possibile correlare i dati di Q_0 e di W_0 , utilizzando l'equazione $y = -2x + 12,8$, che indica un legame tra le due variabili (Fig. 12). Il coefficiente di correlazione si calcola con la seguente formula:

$$r_{x,y} = K_{x,y} / \sigma_x \sigma_y = -0,39 \quad (7)$$

Il valore <0 in (7) mostra che all'aumento di Q_0 si ha una lieve diminuzione di W_0 . La fig. 13 evidenzia alcuni outlier con valori molto maggiori rispetto a quelli medi per gli anni nei quali l'infiltrazione diretta ha avuto un qualche peso tra le due variabili.

Il coefficiente α segue un trend molto irregolare rispetto a quello di W_0 . Questo accade perché α è inversamente proporzionale al tempo di esaurimento che, a sua volta, è collegato a diversi fattori: la quantità delle precipitazioni attive, l'entità

Fig. 12 - Correlazione tra Q_0 e α .*Fig. 12 - Q_0 and α correlation.*Fig. 13 - Distribuzione dei valori di α .*Fig. 13 - α values distribution.*

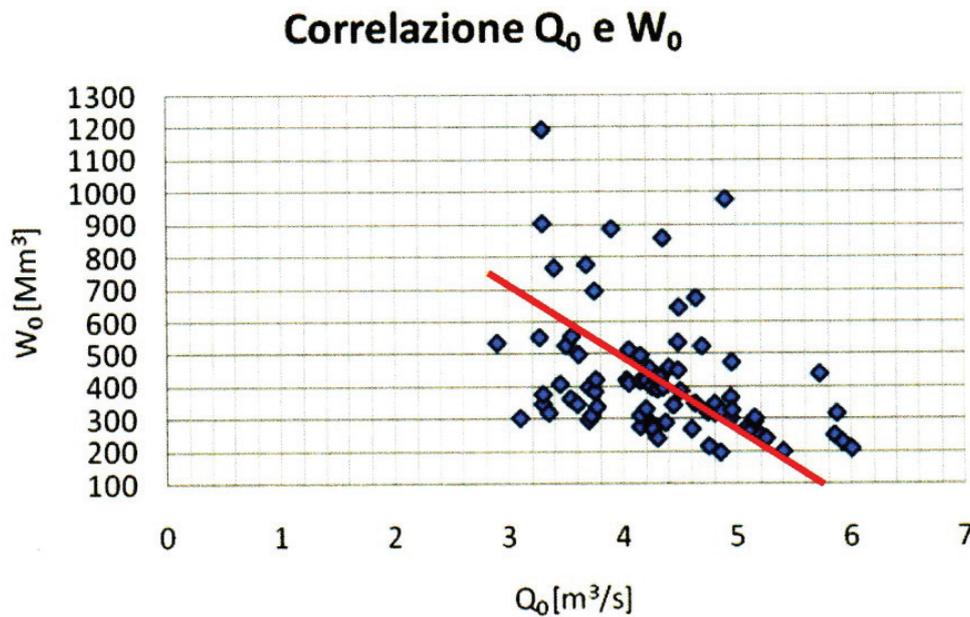


Fig. 14 - Analisi multivariata della correlazione tra Q_0 e W_0 . La linea rossa indica una discreta correlazione negativa.

Fig. 14 - Correlation between Q_0 e W_0 .

del picco di portata, le condizioni idrodinamiche dell'acquifero ecc. (Fig. 14).

Passando a valutare la distribuzione di frequenza del coefficiente α , si constata che, anche qui, i valori si dispongono con un picco poco spostato a sinistra (Fig. 13). La maggior parte dei valori è compreso tra 0,0008 e 0,0012 che si discostano poco dal valore mediano di α (0,0010).

Dal diagramma di fig. 12, infine, si nota che le due variabili (α e Q_0) sono legate da una correlazione lineare. La maggior parte dei dati si allinea lungo una retta di equazione $y = 0,00082x - 0,0025$.

Conclusioni

I rilevamenti delle portate giornaliere, effettuate quasi per un secolo dall'Acquedotto Pugliese, hanno permesso un attento e costante lavoro su ogni diverso ciclo idrogeologico della Sorgente Sanità in Caposele. I cicli sono stati suddivisi in due diverse parti, collegate al tipo di andamento della curva di efflusso sorgivo, la curva di decremento dal massimo al minimo. Si è potuto dividere i cicli anche per l'andamento relativo alla tipologia che, in alcuni casi, è distinta in due parti. Una prima parte è stata esaminata con il modello di Mangin, in parte rivalutato (Civita et al. 2005 a). L'altra parte maggioritaria delle curve non mostra segni d'infiltrazione diretta, con valori di Q_{R0} abbastanza simili alle portate massime della curva di decremento. Questa parte è soggetta, quindi, al semplice modello di Maillet (1905).

Sono stati utilizzati alcuni modelli matematici basati sulle portate e sul bilancio, ottenendo risultati interessanti che per-

mettono di assimilare il massiccio del Cervialto ad altri casi, considerati unici, in Francia ed in Israele. Si tratta, dunque, di un grande massiccio le cui acque sotterranee sono tutte recapitate ad una singola sorgente senza altre perdite, a parte alcune altre sorgenti dalla portata infima e, quindi, del tutto trascurabile.

È stato rilevato un valore del coefficiente di saturazione molto rilevante, appena diminuito dalla portata finale di ogni ciclo. Ciò permette di stabilire che la durata della portata minima può durare in media per 3 anni anche se non ci fosse più l'alimentazione da parte delle piogge, mentre i singoli modelli permettono di valutare la portata da attendersi nei casi in cui la siccità dovesse permanere a lungo.

In questa situazione, la captazione potrebbe essere spostata verso il basso, affrancando la zona soggetta a franosità. Inoltre, è stato possibile effettuare una valutazione delle aree di salvaguardia della Sorgente, in cui la ZP è soggetta all'andamento della captazione mentre la ZR è lunga circa 200 m utilizzando il metodo del tempo di dimezzamento (Civita 1995 & 2008).

In fine, utilizzando i modelli matematici derivati dall'analisi delle curve, è stato possibile calcolare il volume dell'infiltrazione diretta (~ 15 Mm³) ed il tempo di arrivo in acquifero (~ 200 d). Questi dati permettono di considerare nullo l'eventuale inquinamento trascinato.

Un particolare interesse ha portato l'analisi del coefficiente di esaurimento (α) che, in media, vale 0,00104 ma che spesso ha mostrato valori minori, rendendo la curva di esaurimento quasi piatta. L'analisi dei dati ha compreso il calcolo tasso di rinnovamento medio (T_{rin}) che pari a $\sim 19\%$; il tempo di rinnovamento (t_{mr}) che ammonta a ~ 6 anni; il DT_c (il tempo di autosostentamento della portata), pari a 1222 d (3,4 y).

BIBLIOGRAFIA

- Billà G. (1966). *Lacquedotto Pugliese. "The Pugliese Aqueduct"* Italstampa, Bari, 112 p.
- Bruno G.B. (1911). Le sorgenti della Sanità in Caposele e il loro allacciamento per l'Acquedotto Pugliese. *"The Sanità Springs in Caposele and the tapping work to Pugliese aqueduct"* Giorn. Genio Civ. 49, 80 p., Roma.
- Bruno G.B. (1921). La captazione della Sorgente Sanità di Caposele. *"Tapping work of Sanità Spring in Caposele"* Giorn. Genio Civ., 49.
- Budetta P., Celico P., Corniello A., de Riso R., Ducci D., Nicotera P. (1988). Carta Idrogeologica S. Angelo dei Lombardi 1:100.000. *"S. Angelo Lombardi 1:100.000 Hydrogeological Map"* Mem. Soc. Geol. It., 41.
- Canavari M. (1928). Manuale di geologia tecnica. Parte Idrogeologia. *"Technical Geology manual. Hydrogeological Part"* Arti Grafiche Nistri, Pisa, pp. 855-875 (con Opere citate).
- Celico P. (1973). Idrogeologia del Massiccio del Cervialto. *"Hydrogeology of the Cervialto massif"* Tesi di Laurea in Geologia, Univ. di Napoli (inedita).
- Celico P., Civita M. (1977). Sulla tettonica del massiccio del Cervialto (Campania) e le implicazioni idrogeologiche ad essa connesse. *"Structural of Cervialto massif and the hydrogeological implications"* Boll. Soc. Naturalisti in Napoli, 85, pp.555-580.
- Civita M. (1966). Idrogeologia del Massiccio del Terminio-Tuoro. *"Hydrogeology of Termini-Tuoro massif"* Mem. e Note Ist. Geol. Appl. Napoli, pp. 4-103.
- Civita M. (1973). Schematizzazione idrogeologica delle sorgenti normali e delle relative opere di captazione. *"Hydrogeological scheme of normal springs and tapping works connected"* Mem. e Note Ist. Geol. Applic. Napoli, 12, pp. 423-440.
- Civita M. (1975). Criteri di valutazione delle risorse idriche sotterranee in regioni carsiche. *"Evaluation criteria of the hydric water underground resources in karst terrains"* 3° Conv. Intern. Acque Sott., Palermo, pp. 217-237.
- Civita M.V. (1995). A methodology for delineation and design of spring protection area system. Proc. Intern. Congress IAH "Solution '95", Edmonton, Can., Sec. A, Mem. n. 3, 7.
- Civita M.V. (2008). An improved method for delineating source protection zone for karst springs based on analysis of recession curve data. *Hydrol. Journ.*, 16, 5, pp. 855-869.
- Civita M.V., Vigna B., Galfrè M. (2005 a). Nuovi contributi all'analisi della curva di svuotamento delle sorgenti carsiche. *"New contributes to analysis of depletion curves of karstic springs"* IGEA, 20, pp. 35-47.
- Civita M. (2005 b). Idrogeologia Applicata e ambientale. *"Applied and environmental hydrogeology"* Casa Editrice Ambrosiana, 794 p.
- Cortese E. (1890). Le acque sorgive delle alte valli dei fiumi Sele, Calore e Sabato. *"The spring water of the high valleys of Sele, Calore and Sabato rivers"* Boll. R. Com. Geol. It., 7.
- Cotecchia V. (1993 a). Opere in sottterraneo: rapporto con l'ambiente. *"Underground works: environment connections"* 18° Conv. Naz. Geotecnica. Rimini, pp. 145-190.
- Cotecchia V., Lattanzio M., Salvemini A & Ventrella N.A. (1993 b). Un caso emblematico di sfavorevole impatto ambientale procurato durante lo scavo di una galleria in un acquifero carbonatico dei Monti Picentini. *"Emblematic feature of unfavorable environment impact during a tunnel casing in a carbonate aquifer in Picentini mountains"* 5° Workshop Prog. Strat. CNR, Sez. Poster. Amalfi.
- Cotecchia V., Nuzzo G., Salvemini A., Ventrella N.A. (1986). Sanità Spring at Caposele (Avellino Southern Italy). Hypothesis on flow changes caused by the 23 November 1980 earthquake and boundary barrier stability problems. *Geol. Appl. e Idrogeol.*, 21, 2, Bari, pp. 317-331.
- Drogue C. (1967). Le bassin - témoin en terrains calcaires. Le bassin du Saugras. *"The pilot basin in karst terrains. The Sougras Basin"* AIHS Coll. de Dubrovnik, 73, Louvain.
- D'Argento B., Pescatore T. Scandone P. (1973). Schema geologico dell'Appennino meridionale (Campania - Lucania). *"Geologic scheme of South Apennines (Campania - Lucania)"* Acc. Naz. dei Lincei, Quad. 185, pp. 49-72.
- De Vincentis (1889). Progetti di Acquedotto per le tre Puglie. *"Aqueduct plane for the tree Puglia's"* Napoli.
- Fiorillo F., Esposito L., Guadagno F.M. (2006). Analyses and forecast of water resources in an ultra-centenarian spring discharge series from Serino (southern Italy). *Journ. Hydrol.*, 36, (2007), pp. 125-138.
- Fiorillo F., Esposito L., Ventafrida G. (2007). La previsione delle magre della sorgente Sanità di Caposele (AV), alimentante l'Acquedotto Pugliese. *"The minimum flow prevision of Sanità Spring in Caposele (AV) feeding Pugliese aqueduct"* Atti Acc. Naz. Lincei, VII Giorn. dell'Acqua. 22/03/2007), Roma, pp. 155 - 163.
- Garofalo S. (1976). Applicazione degli elementi finiti al calcolo dell'infiltrazione potenziale media. *"Finite elements application for mean potential infiltration calculation"* Tesi di Laurea in Geologia, Univ. di Napoli (inedita).
- Giulivo I., Aquino S. (2007). La Grotta Caliendo. *"The Caliendo cave"* Acqua & Territorio, 15, pp. 50-55.
- Maillet E. (1905). Essais d'hydraulique souterrain et fluviale. *"Underground and fluvial Hydraulic report"* Librairie Scient. Hermann, Paris, 218 p.
- Mangin A.I. (1975). Contribution a l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques. Troisième partie - Thèse. *"Contribution to the hydrodynamic evaluation of karstic aquifers. Third part - Thesis"* Lab. Souter. du Centre National de la Recherche scientifique, Moulis, pp. 21-124.
- Ministero dei LL.PP., Direzione Generale delle opere idrauliche (1912). Relazione sul progetto di massima dell'Acquedotto Pugliese compilato dal R. Ufficio superiore del Genio Civile in data 20 ottobre 1902. *"General plane of Pugliese aqueduct compiled by Civil R. Office on 20 October"* fasc. 1, II Ediz., Roma.
- Ortolani F. (1974). Faglia trascorrente pliocenica nell'Appennino campano. *"Pliocene trans current fault in Campania Appennine"* Boll. Soc. Geol. It., 93, pp. 609-622.

- Pescatore T., Sgrosso I., Torre M. (1970). Lineamenti di tettonica e sedimentazione nel Miocene dell'Appennino campano-lucano. "Structural and sedimentation outlines in Campano – Lucano Appennine Miocene" Suppl. Boll. Soc. Naturalisti in Napoli, 78, pp. 337-406.
- Salvemini A., Ventrella N.A. (1996). Horst – Graben - Horst al margine nord-orientale dei Monti Picentini (Appennino meridionale): Un contributo agli studi idrogeologici sugli acquiferi carsici di Caposele, Cassano Irpino e Quaglietta. "Horst – Graben – Horst at North-Eastern limits of Picentini Mountains (South Apennines): Contribution to hydrogeological research on karstic aquifers of Caposele, Cassano Irpino and Quaglietta" Mem. Soc. Geol. It., 51, pp.467-483.
- Schoeller H. (1967). Hydrodynamique dans le karst (Ecoulement et emmagazinement). "Karst Hydrodynamic (outflow and storage)" IAH Coll. Dubrownik «Hydrologie des roches fissurées », Bull. AIH, 12, 2, pp. 7-21
- Shakhori A., Michaeli A., Rosenzwaig D. (1965). Hydrologic studies on a representative karst catchment in Israel. AIHS Symp. Budapest, 1, 66, Louvain.
- Williams P.W. (1986). The role of the subcutaneous zone in karst hydrology. Journ. of Hydrol., 61, pp.45 – 67.



- RICERCHE GEOLOGICHE
- TRATTAMENTO DELLE ACQUE
- TECNOLOGIE D'AMBIENTE
- PROTEZIONE DALLA CORROSIONE
- INFORMATICA APPLICATA

- LABORATORI D'ANALISI
- SERVIZI D'INGEGNERIA
- ARCHITETTURA & DESIGN
- ENERGIA E SVILUPPO SOSTENIBILE
- SICUREZZA E IGIENE AMBIENTALE

ECOGEO S.R.L.
Società Unipersonale

Via F.lli Calvi, 2 - 24122 BERGAMO
Tel. 035/27.11.55 Fax 035/23.98.82
N. R.E.A. BG 345358 - Capitale Sociale: € 30.000,00 i.v.
C.F. Part. IVA e N. Iscriz. R.I. 03051330169
<http://www.ecogeo.net> e-mail: info@ecogeo.net
Posta Elettronica Certificata: ecogeo@pec.ecogeo.net