

IDRODINAMICA SOTTERRANEA IN SUCCESSIONI CARBONATICHE IN FACIES DI BACINO: L'AREA CAMPIONE DI MONTE CAMPO (MOLISE, ITALIA MERIDIONALE)

GROUNDWATER FLOW IN CARBONATE BASIN FACIES: THE TEST AREA OF MOUNT CAMPO (MOLISE, SOUTHERN ITALY)

VINCENZO ALLOCCA(*), FULVIO CELICO(**), PANTALEONE DE VITA(*) & SILVIA FABBROCINO(*)

(*) Università degli Studi di Napoli "Federico II", Dipartimento di Scienze della Terra, Largo S. Marcellino, 10 - 80138 Napoli, Italy

(**) Università degli Studi del Molise, Dipartimento di Scienze e Tecnologie per l'Ambiente e il Territorio, Contrada Fonte Lappone - 86090 Pesche (IS), Italy

RIASSUNTO

Le attività di ricerca sono state rivolte alla comprensione del comportamento idrogeologico degli acquiferi carbonatici in facies di bacino, diffusamente presenti in alcuni settori dell'Italia meridionale, principalmente costituiti da calcari, calcari con selce e marne. Questo tipo di acquiferi, a differenza di quelli costituiti dalle serie di piattaforma carbonatica, ovvero da litotipi calcarei carsificati, calcareo-dolomitici e dolomitici, non è mai stato studiato in precedenza, sebbene esso rappresenti la principale fonte di approvvigionamento idropotabile nel Molise. Tra le metodologie di studio è stata principalmente utilizzata l'analisi del regime del deflusso idrico sotterraneo, soprattutto in relazione ai fenomeni di ricarica, sia diffusi che eventualmente concentrati in canali carsici.

L'area campione oggetto di studio comprende il rilievo carbonatico del Monte Campo (Isernia, Molise). I limiti dell'acquifero carbonatico sono stati definiti mediante rilievi geologico-strutturali, una campagna di sondaggi elettrici verticali e sondaggi a carotaggio continuo. L'insieme delle indagini ha consentito di accertare l'esistenza della continuità idrogeologica tra la struttura del Monte Pasquale-Abeti Soprani ed i rilievi carbonatici contigui, rappresentati da Monte Campo s.s., Monte S. Nicola e Monte del Cerro.

L'acquifero carbonatico del Monte Campo mostra l'esistenza sia di una circolazione idrica sotterranea basale, orientata principalmente verso il gruppo sorgivo di Fonte Quarto, che di un articolato sistema di falde sospese in alta quota. La circolazione per falde sospese in alta quota è riconducibile all'esistenza di intercalazioni a minore permeabilità nella serie sedimentaria carbonatica, senza escludere il contributo del sistema epicarsico, in relazione allo spessore variabile ed al grado di sviluppo. Il gruppo sorgivo basale di Fonte Quarto è caratterizzato da un regime variabile che ha mostrato nel periodo di monitoraggio una sequenza di numerose fasi di ricarica ed esaurimento. La variabilità delle portate sorgive è risultata strettamente dipendente dalla distribuzione delle sequenze pluviometriche ed influenzata dalle caratteristiche della zona vadosa (spessa all'incirca 100 metri, in media). Il deflusso sotterraneo mostra variazioni pochi giorni dopo i fenomeni pluviometrici (circa 4). Nel caso specifico, questo dato sperimentale non si accorda bene con l'ipotetico effetto di un deflusso rapido in canali carsici, in diretta connessione con la sorgente, quanto piuttosto con fenomeni di infiltrazione efficace nel reticolo di fes-

ABSTRACT

The research has been focused on the hydrogeological behaviour of the basin facies carbonate aquifers that largely outcrop in the Molise region (southern Italy) and are mainly constituted of limestone, cherty limestone and marls. This kind of aquifers, differently from the ones constituted by carbonate platform series, knownly formed by karst limestone, dolomitic-limestone and dolomite, has never been studied in the past, even if they represent the main drinking water resource for the Molise region. The analysis of the groundwater regime is the main method applied in this study, thus the influences given by diffuse infiltration of rainfall or by concentrated infiltration of runoff in karst areas have been investigated.

The sample area that we have analysed corresponds to the Mount Campo carbonate mountain (Isernia, Molise). The boundaries of the carbonate aquifer have been defined by means of geological surveys, geophysical and borehole investigations. Such explorations allowed recognising the hydrogeological continuity between the Mount Pasquale-Abeti Soprani structure and the neighbouring carbonate mountains, represented by Mount Campo s.s., Mount S. Nicola and Mount Cerro.

The Mount Campo carbonate aquifer shows the existence both of a basal and of a perched groundwater flows. The latter is mainly due to the existence of low permeability interbeds within the carbonate series, even if the surficial karst system could also play an important role according to its variable thickness and development grade. The Fonte Quarto basal spring is characterized by a variable regime, which has shown a sequence of numerous recharge and recession phases during the monitoring period. The variability of spring discharges is strictly dependent by the temporal rainfall pattern and it is influenced by the characteristics of the vadose zone (thick about 100 meters, in average). The groundwater flow generally shows variations beginning from few days (about 4) after rainfall events. This experimental observation is not in agreement with the hypothetical effect due to quick influx of runoff through karst conduits, directly interconnected with the spring. Differently, the sequence of discharge spikes can be mainly related to diffuse infiltration of precipitations within the network of discontinuities. Taking into account the thickness of the

sure che pervadono l'acquifero. Prendendo in considerazione lo spessore della zona vadosa, il tempo di ritardo tra gli apporti pluviometrici e l'incremento delle portate sorgive ha permesso di stimare indirettamente la velocità di infiltrazione in circa 22 m/g. Questo valore, leggermente inferiore a quelli calcolati negli altri acquiferi carbonatici dell'Italia centro-meridionale, è giustificato dall'esistenza di livelli a bassa permeabilità nell'ambito della zona vadosa, più che dalla presenza di terreni di copertura poco permeabili. Differentemente, alcune prove di emungimento, effettuate in prossimità della sorgente basale, hanno mostrato valori di trasmissività di 3.0×10^{-2} m²/s ed un coefficiente di immagazzinamento di circa 3.1×10^{-2} , simili a quelli determinati per gli acquiferi francamente costituiti da serie di piattaforma carbonatica. Ciò può essere interpretato con l'assenza di stratificazioni a bassa permeabilità nell'ambito della zona di saturazione. Il differente comportamento idrodinamico tra la zona di saturazione e quella vadosa trova riscontro nelle caratteristiche stratigrafiche della serie sedimentaria che, verso l'alto, è caratterizzata dalla presenza di intercalazioni marnose a minore permeabilità.

Un'ulteriore conferma al modello idrogeologico è stata fornita dalle analisi idrogeochimiche ed isotopiche delle acque sotterranee.

PAROLE CHIAVE: *acquiferi carbonatici, facies di bacino, meccanismi di ricarica, modalità di flusso, falde sospese, Molise, Italia meridionale*

INTRODUZIONE

Il presente lavoro è stato finalizzato alla messa a punto di un modello concettuale dell'idrodinamica sotterranea dell'acquifero carbonatico, in facies di bacino, del Monte Campo (Molise). Tale acquifero, che in precedenza non è mai stato oggetto di studi, può essere considerato, per le sue peculiari caratteristiche litostratigrafiche, strutturali e idrogeologiche, quale bacino campione poiché rappresentativo di numerose idrostrutture dell'Italia meridionale costituite da successioni carbonatiche in facies di bacino o di transizione.

Nelle diverse fasi di studio ci si è soffermati, non solo sulla ricostruzione dello schema di circolazione idrica sotterranea (ivi compresa la definizione dei limiti dell'acquifero e delle relative condizioni al contorno), ma anche sull'analisi delle dinamiche idrogeologiche ed idrogeochimiche che caratterizzano la falda in rete.

L'esistenza di dati ed informazioni acquisite mediante un monitoraggio, a cadenza settimanale, delle portate sorgive del gruppo Fonte Quarto ha consentito di ricavare una serie di interessanti e nuove indicazioni circa le modalità di risposta della falda in rete ai differenti fenomeni di ricarica. Inoltre, dati idrogeologici e geologico-strutturali hanno fornito utili spunti per la comprensione dei motivi che controllano la formazione di falde sospese, o d'alta quota, ampiamente diffuse nell'ambito del rilievo carbonatico.

Le interpretazioni idrogeologiche sono state avvalorate anche dall'analisi dei dati chimico-fisici ed isotopici delle acque sotterranee.

ASSETTO GEOLOGICO-STRUTTURALE

L'analisi dell'assetto geologico-strutturale e la valutazione delle

vadose zone, the average time lag, between rainfalls and increase of spring discharges, indicates infiltration velocities of about 22 m/d. Such a value is slightly lower than those calculated in the other carbonate aquifers of the central-southern Italy and it can be related to the existence of low permeability interbeds within the vadose zone rather than of low-permeability mantling overburdens. Differently, the pumping tests carried out close to the basal spring have shown a transmissivity of 3.0×10^{-2} m²/s and a storage coefficient of 3.1×10^{-2} , similar to typical values determined for limestone aquifers. This result has been inferred as indicative of the local absence of low permeability interbeds in the saturated zone. The different behaviour between the saturation and vadose zones is confirmed by the different stratigraphic characters of the carbonate series, which presents lower-permeability marly interbeds in the upper part.

A further validation of the hydrogeological model has been achieved by the hydrogeochemical and isotopic analyses of groundwater.

KEY WORDS: *carbonate aquifers, basin facies, groundwater recharge, groundwater flow, perched groundwater, Molise, southern Italy*

INTRODUCTION

This study has been focused on the comprehension of a conceptual model of groundwater flow in the basin facies carbonate aquifer of Mount Campo (Isernia, Molise region). Such aquifer has never studied before and we considered it as a sample groundwater basin because, according to the peculiar lithostratigraphic, structural and hydrogeological characteristics, it is representative of the basin facies carbonate series, largely outcropping in the Southern Italy. Therefore, in the different stages of the study, the groundwater flow scheme, comprehending the identification of the aquifer's boundaries, and the hydrogeological processes that control the variability of flow regime and the quality of groundwater have been examined.

The availability of weekly discharge measurement for the Fonte Quarto spring has allowed the comprehension of new and relevant information concerning the recharge of groundwater in this kind of aquifer. Additionally, recent geological, structural and hydrogeological data have provided new information useful to the understanding of the perched groundwater formation, existing at relatively high altitude and largely diffused in the studied carbonate mountain.

The hydrogeological conceptual modelling has been based on the aforesaid data and has been also validated by means of hydrochemical and isotopic groundwater data.

GEOLOGICAL AND STRUCTURAL SETTING

The analysis of the geological and structural setting and its con-

implicazioni sullo schema di circolazione idrica sotterranea, è avvenuta attraverso la ricostruzione dei caratteri litostratigrafici e strutturali dell'area del Monte Campo, effettuata anche mediante l'espletamento di indagini geofisiche e geognostiche.

Caratteri stratigrafico-strutturali

La dorsale carbonatica del Monte Campo è costituita da un'unità stratigrafico-strutturale appartenente alle sequenze sedimentarie del Bacino Pelagico Molisano (DI BUCCI, 1995a, b; CORRADO *et alii*, 1997a, b). Essa è compresa tra i depositi carbonatici di piattaforma Laziale-Abruzzese ed Apula, il Flysch di Agnone e le successioni sedimentarie postorogeniche, affioranti, queste ultime, lungo il margine adriatico del territorio molisano. Dal punto di vista litostratigrafico, la struttura del Monte Campo (Fig. 1a) è costituita da una successione sedimentaria terrigena (di età Langhiano sup.-Tortoniano sup.) caratterizzata dal basso verso l'alto da calcari detritici, biocalcareni, depositi conglomeratici e brecce cementate, livelli calcarenitici, a luoghi con selce, un'alternanza di marne, calcari marnosi (AA.VV., 1969; CLERMONTÉ, 1977; PATACCA *et alii*, 1992; DI BUCCI, 1995a), in strati generalmente medi e spessi. La litofacies più francamente marnosa e marnoso-argillosa, localmente evolvente ad arenaceo-argillosa, si rinviene in prevalenza nella parte alta della successione carbonatica. Un'esigua coltre di alterazione superficiale, in parte pedogenizzata ed a granulometria grossolana (prevalentemente sabbiosa ed occasionalmente detritica) mantella discontinuamente i litotipi carbonatici ivi affioranti. Sovrapposti all'anzidetta successione carbonatica si rinvengono i depositi flyschoidi di natura prevalentemente arenaceo-argillosa e, subordinatamente, calcareo-marnosa, appartenenti all'Unità del Flysch di Agnone (Tortoniano-Messiniano). Sottoposta ad essa, invece, si rinviene l'Unità delle Argille Varicolori (Oligocene?-Miocene Inf.).

I rapporti tra le diverse formazioni affioranti nell'area del Monte Campo sono prevalentemente di natura tettonica, ad esclusione del margine sud-orientale della struttura, laddove il contatto tra il Flysch di Agnone e la successione carbonatica è di natura prevalentemente stratigrafica (DI BUCCI, 1995a).

Dal punto di vista strutturale, la struttura del Monte Campo (Fig. 1a) è caratterizzata da diffuse deformazioni plicative che si esplicano in anticlinali e sinclinali con assi subparalleli, orientati in direzione NNW-SSE, ed immergenti verso S con inclinazione di una decina di gradi (DI BUCCI, 1995a; DI BUCCI & SCROCCA, 1997). Nel complesso, essa è costituita da una struttura a pieghe asimmetriche contraddistinta, lungo il fianco occidentale, da un evidente motivo di accavallamento tettonico sul Flysch di Agnone e dissecata, nel settore centrale, da discontinuità tettoniche a carattere essenzialmente distensivo aventi direzione prevalentemente NNW-SSE.

Ulteriori elementi strutturali, a cinematica sia inversa che trascorrente, marcano il limite morfostrutturale esistente tra il Monte Campo s.s. ed i rilievi del Monte Pasquale-Abeti Soprani (CLERMONTÉ, 1977; DI BUCCI, 1995a). Proprio in corrispondenza di tale allineamento tettonico (Fig. 1a), ad andamento circa E-W, si sviluppano le principali

condizionamento ruolo on the groundwater flow scheme has been achieved by means of the reconstruction of lithostratigraphic and structural characteristics of the Mount Campo area, obtained also by geophysical and borehole data.

Geological and structural characters

The Mount Campo carbonate ridge is constituted by a stratigraphic and structural unit belonging to the series of the Pelagic Molisan Basin (DI BUCCI, 1995a, b; CORRADO *et alii*, 1997a, b). It is interposed between the outcroppings of the series of Latial-Abruzzi and Apulian carbonate platforms, the Agnone Flysch and the post-orogenic series (along the Adriatic border of the Molise region).

The stratigraphic scheme of the Mount Campo carbonate ridge (Fig. 1a) can be described as a terrigenous series (Langhian - upper Tortonian), formed, from the bottom, by detrital limestone, bio-calcareni, conglomerates and cemented breccias, calcarenites (locally cherty), marly limestone and marl (AA.VV., 1969; CLERMONTÉ, 1977; PATACCA *et alii*, 1992; DI BUCCI, 1995a), with medium to thick bedding.

The lithofacies that is mostly constituted of marls and clayey marls, which locally evolves upward to an arenaceous-clayey lithofacies, is mainly present in the upper part of the carbonate series. A thin eluvial mantle with coarse grain size texture, mostly constituted by sand and partly transformed by pedogenetic processes, discontinuously mantles carbonate slopes.

Flysch deposits overlap the carbonate series. They belong to the *Agnone Flysch* (Tortonian-Messinian) and they have a predominantly arenaceous-clayey composition that subordinately is also calcareous-marly. These deposits also overlap the *Argille Varicolori* Unit (Oligocene? - lower Miocene).

In the Mount Campo area, the contacts among the aforesaid units result to be of tectonic type, except for the south-eastern border of the structure, whereas the contact between the *Agnone Flysch* and the carbonate rocks is of stratigraphic type (DI BUCCI, 1995a).

The structural setting of the Mount Campo carbonate mountain (Fig. 1a) is characterised by anticlines and synclines, with sub-parallel axes oriented NNW-SSE and dipping with inclination of about 10° (DI BUCCI, 1995a; DI BUCCI & SCROCCA, 1997). On the whole, it can be sketched as a structure with asymmetric folds characterised, along the western flank, by an evident thrusting above the *Agnone Flysch* and dissected, in the central sector, mainly by tensional faults with NNW-SSE prevalent strike.

Further structures, both with compressive and strike-slip kinematics, are located at the morphostructural boundary existing between Mount Campo s.s. ad Mount Pasquale-Abeti Soprani (CLERMONTÉ, 1977; DI BUCCI, 1995a). Exactly in correspondence of such tectonic alignment (Fig. 1a), E-W oriented, the most evident karst phenomena are located, among which are the endorheic basin of Anitra's lakes ad the Cannavinella sinkhole system.

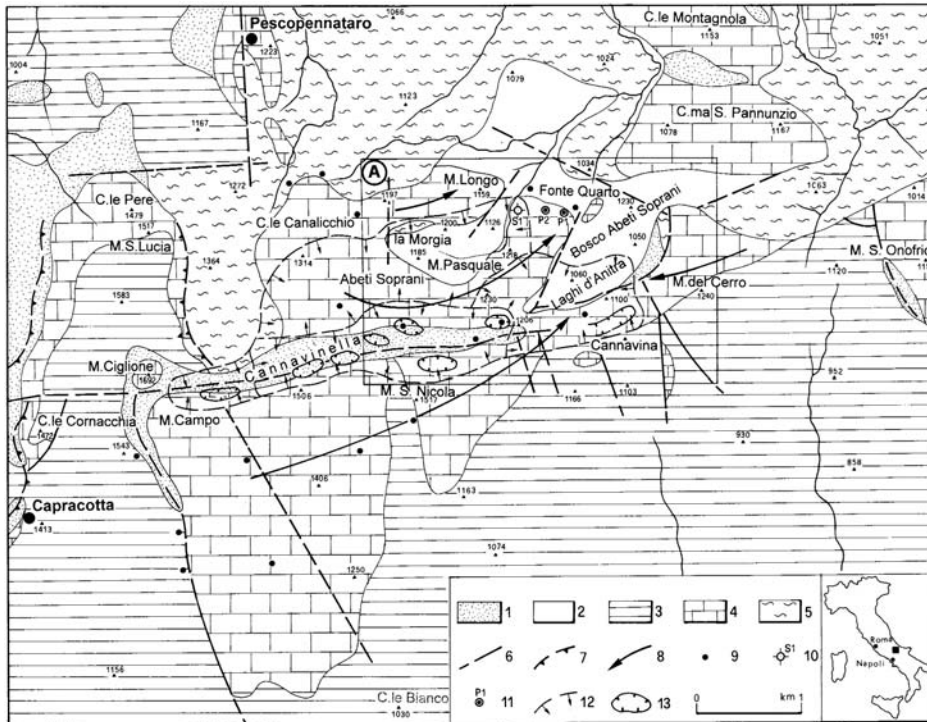


Fig. 1a - Schema strutturale e circolazione idrica sotterranea dell'acquifero carbonatico di Monte Campo. Nel riquadro A è riportata l'area di figura 1b.

Legenda: 1) complesso detritico; 2) complesso fluvio-lacustre; 3) complesso arenaceo-marnoso-argilloso; 4) complesso carbonatico; 5) complesso delle Argille Varicolori; 6) faglia (presunta se tratteggiata); 7) sovraccorrimiento (presunto se tratteggiato); 8) direzione principale di flusso della falda di base; 9) sorgente di base (Fonte Quarto) e d'alta quota; 10) sondaggio; 11) pozzo; 12) limiti di aree a deflusso endoreico; 13) doline

- Structural and groundwater flow schemes of the Mount Campo carbonate aquifer. In the rectangle A the area shown in the figure 1b is located.

Legend: 1) debris complex; 2) fluvial-lacustrine complex; 3) arenaceous-marly-clayey complex; 4) carbonate complex; 5) Argille Varicolori complex; 6) fault and hypothesised fault; 7) thrust; 8) main direction of basal groundwater flow; 9) basal spring (Fonte Quarto) and spring due to perched groundwater flow; 10) borehole; 11) well; 12) endorheic basins boundaries; 13) sinkhole

forme carsiche epigee, tra cui il bacino endoreico dei Laghi dell'Anitra ed il sistema doliniforme dell'area di Cannavinella.

Prospezioni geofisiche e geomeccaniche

L'indagine geofisica è consistita nell'esecuzione di 13 Sondaggi Elettrici Verticali (SEV), mediante la configurazione quadripolare di Schlumberger, eseguiti con stendimenti di $AB \leq 600$ metri e disposti lungo tre diversi allineamenti (Figg. 1b e 2). La disposizione e l'estensione degli stendimenti geoelettrici sono state programmate con la finalità di acquisire nuovi elementi stratigrafico-strutturali circa l'esistenza del substrato carbonatico nelle aree morfologicamente più depresse (la Morgia e i Laghi dell'Anitra) circostanti l'area sorgiva Fonte Quarto, laddove affiorano depositi fluvio-lacustri prevalentemente limo-argillosi e sabbioso-limosi.

Sulla base dei risultati delle indagini geofisiche, sono state eseguite tre perforazioni geomeccaniche ubicate in prossimità della medesima area sorgiva Fonte Quarto (Fig. 1b). Esse sono state finalizzate sia alla calibrazione dei parametri utilizzati per l'inversione delle indagini geoelettriche e sia ad ottenere elementi litostatigrafici di maggior dettaglio riguardo la successione carbonatica del Monte Campo. Due perforazioni, dopo opportuno condizionamento (pozzi P1 e P2), sono state utilizzate per la caratterizzazione idrodinamica dell'acquifero mediante prove di emungimento.

I risultati ottenuti hanno permesso l'individuazione di più orizzonti elettrostratigrafici. Dall'alto verso il basso (Fig. 1b), è stato possibile riconoscere la seguente successione.

Un primo orizzonte, i cui valori di resistività sono compresi tra 30

Geophysical and drilling investigations

Geophysical investigations, consisted of 13 resistivity Vertical Electrical Soundings (VES), have been executed with the Schlumberger's quadripolar configuration extended up to $AB \leq 600$ meters and disposed to form three different alignments (Figg. 1b and 2). In particular, the location and orientation of geophysical investigations have been arranged to optimize the acquisition of new stratigraphic and structural data concerning the presence of a deep carbonate body in the morphologically lowest zones, surrounding the Fonte Quarto spring (la Morgia and Anitra's lakes), filled by silty-clayey and sandy-silty fluvial-lacustrine deposits.

Contemporarily to the geophysical investigations, three boreholes have been drilled in the area of the Fonte Quarto spring (Fig. 1b). They have been finalised both to the calibration of the parameters applied to the inversion of resistivity surveys and to the detailed reconstruction of the Mount Campo stratigraphic series. Two boreholes, after a specific conditioning, have also been used to carry out pumping tests and hydraulic characterisation of the carbonate aquifer (wells P1 and P2).

The inversion of the resistivity curves allowed the identification of several electro-stratigraphic horizons. From the top to the bottom, the following succession has been reconstructed.

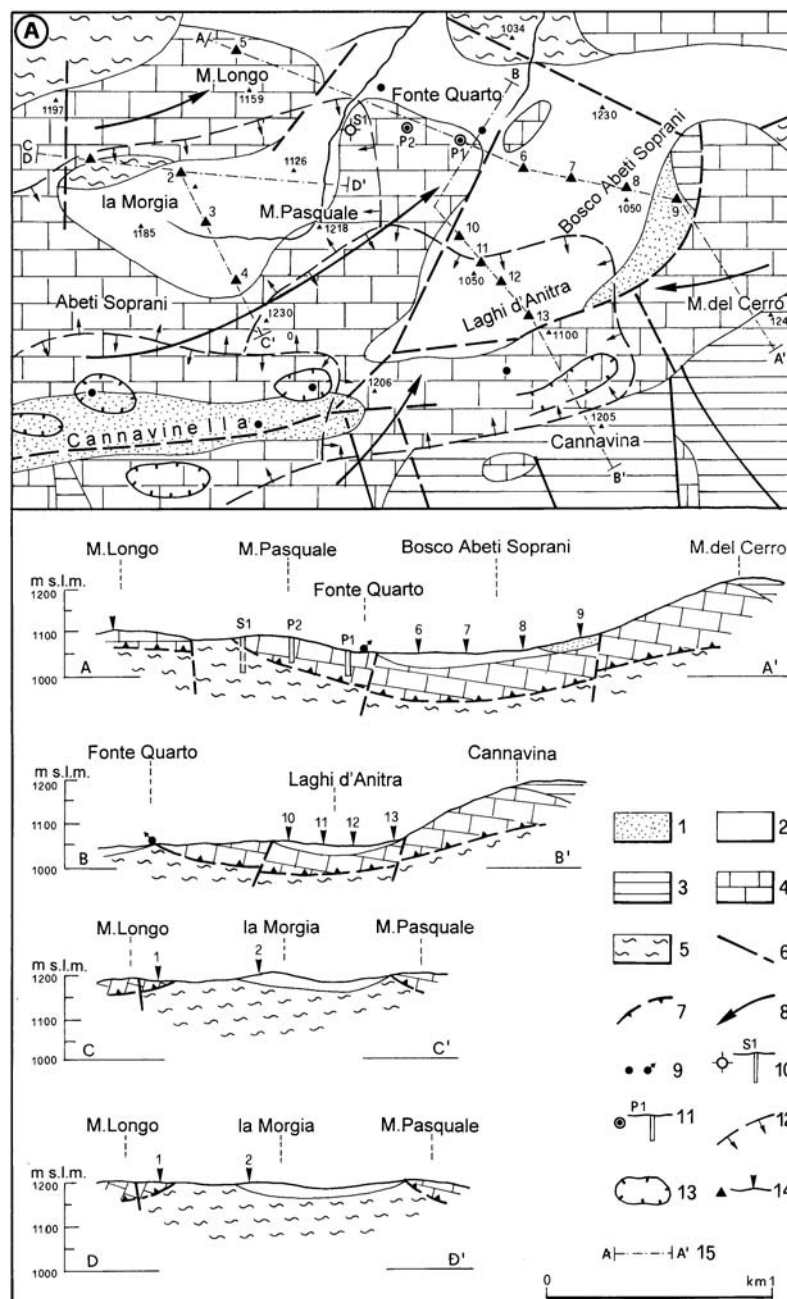
A first horizon, with resistivity values ranging from 30 to 60 Ωm , corresponds to fluvial-lacustrine and talus-eluvial deposits outcrop-

Fig. 1b - Schema idrostrutturale dell'area sorgiva di Fonte Quarto

Legenda: 1) complesso detritico; 2) complesso fluvio-lacustre; 3) complesso arenaceo-marnoso-argilloso; 4) complesso carbonatico; 5) complesso delle Argille Varicolori; 6) faglia (presunta se tratteggiata); 7) sovrascorrimento (presunto se tratteggiato); 8) direzione principale di flusso della falda di base; 9) sorgente di base (Fonte Quarto) e d'alta quota; 10) sondaggio; 11) pozzo; 12) limiti di aree a deflusso endoreico; 13) doline; 14) ubicazione dei SEV; 15) traccia di sezione

- Hydrostructural scheme of the Fonte Quarto area

Legend: 1) debris complex; 2) fluvial-lacustrine complex; 3) arenaceous-marly-clayey complex; 4) carbonatic complex; 5) Argille Varicolori complex; 6) fault and hypothesised fault; 7) thrust; 8) main direction of basal groundwater flow; 9) basal spring (Fonte Quarto) and spring due to perched groundwater flow; 10) borehole; 11) well; 12) endorheic basins boundaries; 13) sinkhole; 14) Vertical Electrical Sounding (VES); 15) geological cross section



e 60 Ω m, corrispondente ai depositi fluvio-lacustri e detritico-eluviali, affioranti nella zona del Bosco Abeti Soprani, dei Laghi dell'Anitra e de la Morgia (Fig. 1b, sez. A-A', B-B', C-C' e D-D'). Un secondo orizzonte, caratterizzato da valori di resistività maggiori di 100÷150 Ω m, coincide con le rocce carbonatiche appartenenti all'idrostruttura del Monte Campo (Fig. 1b, sez. A-A' e B-B'). Un terzo orizzonte, contraddistinto da valori di resistività inferiori o uguali a 10 Ω m, coincide con i terreni dell'Unità delle Argille Varicolori (Fig. 1b, sez. A-A'). Tale assetto è stato anche confermato dai risultati della per-

ping in the zone of Bosco Abeti Soprani, of Anitra's lakes and of the La Morgia area (Fig. 1, sections A-A', B-B', C-C' and D-D'). A second horizon, characterised by values of resistivity higher than 100÷150 Ω m, corresponds to a carbonatic bedrock, which belong to the Mount Campo structure (Fig. 1b, sections A-A' and B-B'). A third horizon, characterised by resistivity values equal or lower than 10 Ω m, corresponds to the *Argille Varicolori* Units (Fig. 1b, section. A-A'). This stratigraphic interpretation has been validated by the S1 borehole (Fig. 1b and A-A' section) carried out some hundreds meters

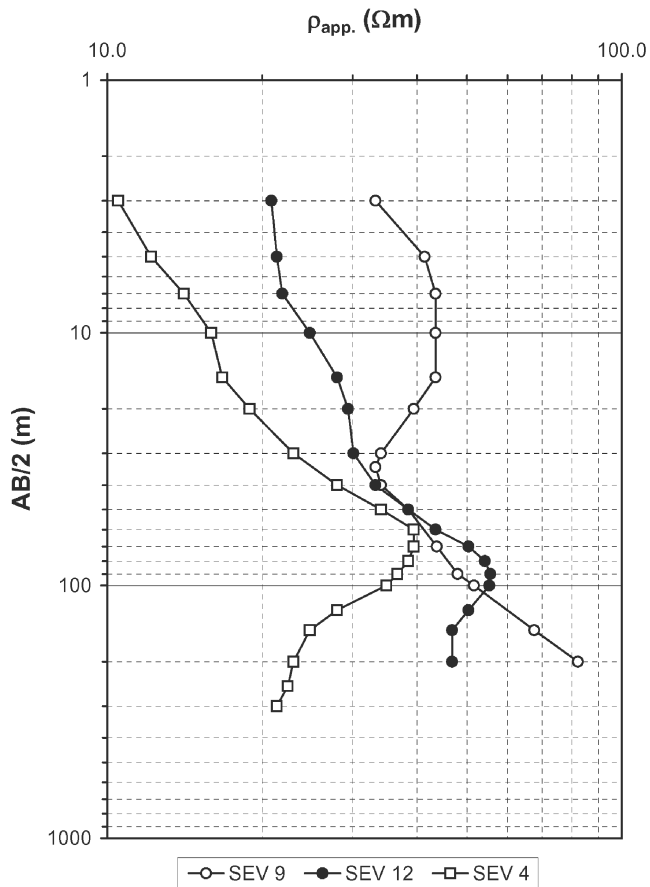


Fig. 2 - Sondaggi Elettrici Verticali (SEV) rappresentativi
- Representative Vertical Electrical Soundings (VES)

forazione S1 (Fig. 1b e sez. A-A') eseguita a qualche centinaio di metri di distanza, ad ovest dell'area sorgiva Fonte Quarto, nella quale è stato rinvenuto a circa 90 m di profondità la base del complesso carbonatico e quindi il contatto con le Argille Varicolori.

La ricostruzione dell'assetto geometrico dell'acquifero carbonatico e dei complessi a bassa permeabilità ad esso giustapposti ha comportato le seguenti principali implicazioni sull'interpretazione dello schema di circolazione idrica sotterranea. Tra i risultati di maggiore rilevanza, la presenza di un substrato carbonatico poco profondo, sottoposto ai depositi superficiali affioranti nell'area del Bosco Abeti Soprani e dei Laghi dell'Anitra (Fig. 1b, sez. A-A' e B-B'), indica che i rilievi carbonatici del Monte del Cerro-Monte S. Nicola sono idrogeologicamente interconnessi con la restante struttura del Monte Pasquale-Abeti Soprani. Invece, il rilievo carbonatico del Monte Longo, posto a nord dell'area de la Morgia, risulta idrogeologicamente isolato (Fig. 1a e 1b) dal resto della struttura del Monte Campo. Ciò è riconducibile, oltre che all'esistenza di motivi tettonici com-

westward from the Fonte Quarto spring, in which the bottom of the carbonate complex, namely the top of the *Argille Varicolori*, has been found about at 90 m deep.

By means of the abovementioned data, the stratigraphic and structural schemes of the carbonate aquifer have been comprehended, thus implying the following deductions from the hydrogeological point of view. Among the principal results, the carbonate ridges of Mount del Cerro-Mount S. Nicola result to be interconnected with the other structure of Mount Pasquale-Abeti Soprani by means of a carbonate bedrock comprised within a depth of 100 m, which is underlain to the surficial deposits outcropping filling the area of Bosco Abeti Soprano and Anitra's lakes (Fig. 1b, sections A-A' and B-B').

Instead, the carbonate mountain of Mount Longo, located northward of the La Morgia area, is hydrogeologically isolated from the rest of the Mount Campo structure (Figs. 1a and 1b). This situation can be related, besides of the existence of compressive tectonic struc-

pressivi, anche alla presenza di locali discontinuità a carattere distensivo (Figg. 1a, 1b, sezz. C-C' e D-D') che hanno generato una rilevante fascia cataclastica a cui è attribuibile un decremento localizzato della conducibilità idraulica del mezzo fratturato. Questi risultati sono in accordo con quanto sperimentalmente accertato in un altro acquifero carbonatico dell'Appennino molisano (CELICO *et alii*, 2006).

SCHEMA DI CIRCOLAZIONE IDRICA SOTTERRANEA

L'analisi dei dati stratigrafici e strutturali, integrata con le prospezioni geofisiche e geomeccaniche, ha permesso di ricostruire lo schema di circolazione idrica sotterranea dell'acquifero del Monte Campo e di definirne le relative condizioni al contorno. Da quanto acquisito è emerso che il rilievo del Monte Campo (Fig. 1a) costituisce un'unità idrogeologica delimitata: (a) a nord e ad est, dall'accavallamento tettonico sull'Unità delle Argille Varicolori; (b) ad ovest, dall'accavallamento tettonico sui depositi miocenici del Flysch di Agnone e, subordinatamente, sull'Unità delle Argille Varicolori; (c) a sud, dalla discontinuità tettonica, ad andamento circa E-W, che separa i rilievi del Monte Campo *s.s.* e del Monte S. Nicola da quello del Monte Pasquale-Abeti Soprani, ovvero dal contatto con i depositi miocenici meno permeabili del Flysch di Agnone. Ciononostante, i rilievi del Monte Campo *s.s.* e del Monte S. Nicola, risultano in continuità idrogeologica con la restante parte dell'acquifero, per l'esistenza di un substrato carbonatico relativamente poco profondo sottoposto ai depositi fluvio-lacustri della zona del Bosco Abeti Soprani e dei Laghi dell'Anitra (Fig. 1b, sezz. A-A' e B-B'). È quindi possibile ipotizzare l'esistenza di una direttrice principale del deflusso idrico sotterraneo lungo il suddetto allineamento, orientata verso il gruppo sorgivo basale Fonte Quarto, ubicato a circa 1040 m s.l.m. Per quanto riguarda la struttura del Monte Longo, posta a nord dell'area de la Morgia (Fig. 1a), l'assetto strutturale locale induce un deflusso della falda di base prevalentemente verso i depositi fluvio-lacustri ad esso adiacenti, rendendo così autonomo tale settore dalla restante unità carbonatica.

Pertanto, sulla base di tale assetto è possibile dedurre che il bacino sotterraneo di alimentazione del gruppo sorgivo Fonte Quarto è costituito dall'insieme dei seguenti rilievi: Monte Campo *s.s.*, Monte Ciglione, Monte S. Nicola, C.le Canalicchio, Monte Pasquale-Abeti Soprani e Monte del Cerro (Fig. 1a). Del resto, considerando i valori di rendimento medio unitario ($m^3/s \times km^2$) delle idrostrutture carbonatiche similari dell'Appennino meridionale (CELICO, 1983a, b), gli unici rilievi del C.le Canalicchio e del Monte Pasquale non avrebbero un'estensione tale da giustificare l'entità delle portate sorgive erogate dal gruppo Fonte Quarto (portata media $0.072 m^3/s$ nell'anno idrologico 1982-1983). Ciò è stato ulteriormente confermato attraverso l'analisi dei contenuti isotopici riscontrati nelle stesse acque sorgive.

Ulteriore elemento di particolare interesse idrogeologico dell'unità carbonatica del Monte Campo è la presenza di numerose scaturigini ubicate a quota più alta delle sorgenti basali (gruppo Fonte Quarto), alimentate da falde sospese o d'alta quota. Esse, pur essendo caratterizzate da una portata relativamente bassa (comprese tra $0.0045 m^3/s$

tures, also with the local presence of tensional structures (Figs. 1a and 1b, 1b, sections C-C' and D-D'), which generate lower permeability cataclastic zones, hence in agreement with the findings of CELICO *et alii* (2006) in an experimental site in the Southern Apennines.

GROUNDWATER FLOW SCHEME

The analysis of stratigraphic and structural data, integrated with the results of the geophysical surveys and the boreholes, allowed the reconstruction of the groundwater flow scheme in the Mount Campo aquifer and the definition of the aquifer's boundaries. From what recognized, the Mount Campo structure (Fig. 1a) constitutes a hydrogeological unit confined as follows: (a) to North and East by the thrust on the *Argille Varicolori* Unit; (b) to West by the thrust onto the Miocene deposits of the *Agnone Flysch* and, subordinately, on the *Argille Varicolori* Unit; (c) to South, by the tectonic structure which strike is approximately oriented E-W, and that separate the Mount Campo *s.s.* and Mount S. Nicola structure from the Mount Pasquale-Abeti Soprani structure, namely from the low-permeability Miocene deposits of the Agnone Flysch. Nevertheless, Mount Campo and Mount S. Nicola, are hydrogeologically continuous with the remnant part of the aquifer, by mean of a relatively shallow carbonate bedrock underlain to the fluvial-lacustrine deposits in the zones of the Bosco Abeti Soprani and the Anitra's lakes (Fig. 1b, sections A-A' and B-B'). It is possible to hypothesise a principal groundwater flow pattern along the aforesaid alignment, oriented toward the Fonte Quarto basal spring, located at about 1040 m a.s.l.

As it regards the Mount Longo structure, located to North of the La Morgia area (Fig. 1a), the local structural setting controls the basal groundwater flow towards the adjoining fluvial-lacustrine deposits, therefore inducing the hydrogeological autonomy of such sector from the remnant part of the carbonate aquifer.

Therefore, on the basis of such configuration it can be inferred that the recharge area of the Fonte Quarto spring (corresponding to the Mount Campo hydrogeological unit) results constituted by the additional contribute of the following carbonate mountains: Mount Campo *s.s.*; Mount Ciglione, Mount S. Nicola, Canalicchio Hill, Mount Pasquale-Abeti Soprani and Mount Cerro (Fig. 1a). Differently, considering the average groundwater yield value of the aquifer ($m^3/s \times km^2$) (CELICO, 1983a, b), the single mountains of Canalicchio Hill and Mount Pasquale are not sufficiently extended to justify the discharge of the Fonte Quarto spring (discharge of $0.072 m^3/s$ in average for the 1982-1983 hydrological year). This has been subsequently confirmed by means of the isotopes analyses of the spring groundwater.

A particularly relevant hydrogeological observation is the presence of numerous springs located at an altitude greater than the basal springs of Fonte Quarto, which are fed by perched groundwater. Even if they are characterised by relatively low discharge values

e $0.0001 \text{ m}^3/\text{s}$), costituiscono importanti fonti di approvvigionamento idrico locale, soprattutto per la loro posizione strategica rispetto alle possibili utenze (agricole e civili).

Sulla base della distribuzione areale delle sorgenti e dei diversi elementi litostratigrafici, strutturali e idrogeologici è stato possibile identificare i fattori responsabili della scomposizione verticale dell'idrodinamica sotterranea, ovvero della formazione di una circolazione idrica sotterranea sospesa rispetto a quella basale.

Tra gli elementi stratigrafici di maggiore importanza, è da considerare che, nell'ambito della serie carbonatica del Monte Campo (ed in particolare nella porzione sommitale), esistono livelli marnosi e marnoso-argillosi, aventi spessore fino a qualche metro, la cui geometria tabulare ed il forte contrasto di permeabilità con le rocce più francamente calcaree (molto fratturate e carsificate) costituiscono un importante motivo di frazionamento verticale dei deflussi idrici sotterranei. Inoltre, il più elevato stato di fratturazione e/o carsificazione dell'epicarso, che assume vistose forme nell'area di Cannavinella (Fig. 1a), incide fortemente sulla genesi di locali falde sospese, a regime per lo più stagionale.

Oltre ai motivi litostratigrafici responsabili del deflusso sotterraneo ad alta quota, anche l'assetto strutturale locale della serie carbonatica condiziona il deflusso delle acque sotterranee, consentendo l'emergenza di una parte di queste a quote relativamente elevate. Infatti, buona parte delle scaturigini d'alta quota si colloca in corrispondenza delle principali discontinuità tettoniche (Fig. 1a); ciò dimostra che, seppure localmente, tali elementi strutturali possono costituire per la circolazione idrica sotterranea nella parte più superficiale del rilievo: (a) un ostacolo, se caratterizzati da fasce a minore permeabilità ed orientati in direzione perpendicolare alle direttrici di flusso; (b) un dreno, se caratterizzati da una maggiore permeabilità locale e posti in direzione sub-parallela alle direttrici di flusso delle acque sotterranee.

Per le altre sorgenti, invece, ubicate lungo il contatto tra rocce carbonatiche e depositi flyschoidi o Argille Varicolori (Fig. 1a), la genesi è ascrivibile alle differenti caratteristiche idrogeologiche che caratterizzano le diverse formazioni, oltre che ai motivi litostratigrafici e strutturali anzidetti. Nella fattispecie, il deflusso idrico sotterraneo sospeso o d'alta quota è condizionato localmente, come accade per la circolazione idrica sotterranea basale, dall'andamento piano-altimetrico della "cintura impermeabile", rappresentata dal Flysch di Agnone e/o dalle Argille Varicolori.

Caratterizzazione idrodinamica dell'aquifero

Nel corso delle indagini idrogeologiche sono state eseguite due prove di emungimento sul pozzo P2 (Figg. 1a, 1b), allo scopo di determinare sperimentalmente i principali parametri idrodinamici dell'aquifero carbonatico del Monte Campo. Innanzitutto, si è proceduto alla realizzazione di una prova preliminare, a gradini di portata crescente ed in regime stazionario, finalizzata alla ricostruzione della curva caratteristica (Fig. 3) e al calcolo dei parametri da essa derivanti (portata critica, portata di esercizio ottimale, portata specifica, etc.).

(ranging from $0.0045 \text{ m}^3/\text{s}$ to $0.0001 \text{ m}^3/\text{s}$), they locally constitute important water resources above all for the strategic position respect to the possible local use (agricultural and urban).

First of all, it should be considered that in the upper part of the Mount Campo carbonate series marly and marly-clayey interbeds exist (up to 1 m thick), whose tabular geometry and relevant permeability contrast with the calcareous terms (with high fracturing and permeability grade) constitute the principal cause of vertical groundwater flow fractioning. Moreover, the higher fracturing state and/or the development of karst phenomena in the surficial part of the mountain (i.e. Cannavinella area; Fig. 1a) strongly influence the occurrence of local perched groundwater with seasonal regime.

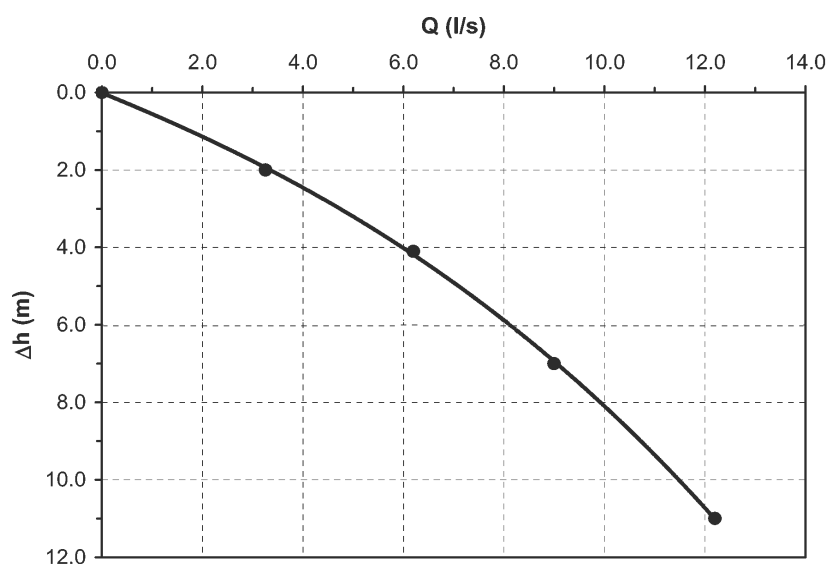
Besides the lithologic and stratigraphic causes that lead to the formation of a perched groundwater flow, the structural setting of the carbonate series also conditions the groundwater outflow, allowing the surfacing of a part of them. In fact, a large part of the high altitude springs is located in correspondence of the principal tectonic structures (Fig. 1a); this observation indicates that, even if locally, such structural elements can constitute for the groundwater flow in the upper part of the mountain: (a) a barrier, if they are constituted of low-permeability bands and oriented perpendicularly to the groundwater flow directions; (b) a drain, if they are characterised by a local increase of permeability and are located sub-parallelly to the groundwater flow directions.

Instead, for the other springs, located along the contact between carbonate rocks and flysch deposits or the *Argille Varicolori* Unit (Fig. 1a), the genesis can be related to the variable hydrogeological features that characterise the different formations, besides the aforesaid lithologic and stratigraphic causes. Particularly, the perched groundwater flow is locally influenced, as it happens for the basal groundwater flow, by the spatial and altitudinal variation of the impermeable belt, represented by the *Agnone Flysch* and/or by the *Argille Varicolori* Unit.

Hydrodynamical characterisation of the aquifer

During the hydrogeological investigations, two pumping tests have been carried out on the well P2 (Fig. 1b), in order to experimentally determine some of the principal hydrodynamic parameters of the Mount Campo carbonate aquifer. Firstly, a preliminary pumping test in steady state flow regime and with increasing constant pumping-drawdown steps has been carried out in order to determine the discharge-drawdown curve (Fig. 3) and the related parameters (critical pumping discharge, allowable pumping discharge, specific discharge, etc.).

Fig. 3 - Curva caratteristica del pozzo P2
- Discharge-drawdown curve of the P2 well



Sulla base di tali risultati, si è proceduto successivamente ad eseguire, sullo stesso pozzo P2, un secondo test a portata costante (pari alla portata di esercizio: circa $0.005 \text{ m}^3/\text{s}$) e di lunga durata, misurando gli abbassamenti piezometrici nel limitrofo pozzo P1 (Figg. 1a, 1b e 4).

La durata dell'intera prova, eseguita in regime transitorio, è stata di 95 ore. Dall'analisi dei dati sperimentali, è stato possibile determinare, mediante l'applicazione del metodo di Cooper-Jacob (COOPER & JACOB, 1946), un valore di trasmissività (T) pari a $3.00 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$; tale valore, relativamente elevato, è attribuibile alla locale presenza di rocce maggiormente permeabili, a prevalente componente calcarea, riscontrate tra l'altro nelle perforazioni P1 e P2 eseguite nell'intorno dell'area sorgiva.

Il coefficiente di immagazzinamento (S), assimilabile alla porosità efficace dell'acquifero, essendo questo non confinato, è risultato pari a 3.10×10^{-2} ; detto valore è in linea con quelli determinati in alcuni acquiferi carbonatici dell'Appennino centro-meridionale, in facies di piattaforma, variabili da 2.6×10^{-2} a 4.0×10^{-2} (CELICO *et alii*, 1977; CELICO, 1981; 1982), ad ulteriore testimonianza della notevole incidenza della componente calcarea sulle caratteristiche idrodinamiche locali dell'acquifero.

Il raggio d'azione del pozzo, al termine della prova, risultato pari a diverse centinaia di metri (circa 860 m), è da mettere in relazione all'elevata trasmissività locale dell'acquifero fratturato.

MECCANISMI DI RICARICA E MODALITÀ DI DEFLUSSO IDRICO SOTTERRANEO

Di seguito si descrivono i caratteri idrogeologici più significativi che controllano la ricarica e le modalità di deflusso idrico sotterraneo dell'acquifero carbonatico del Monte Campo, dedotti mediante l'analisi integrata dei dati pluviometrici e di portata sorgiva e successivamente confermati anche attraverso l'analisi dei dati chimico-fisici ed isotopici delle acque sotterranee.

On the basis of the preliminary results, a second test with a pumping constant discharge (equal to the optimal allowable pumping discharge previously determined, about $0.005 \text{ m}^3/\text{s}$) has been performed on a pumping station, measuring the progressive drawdown in the P1 well (Figs. 1b and 4).

The pumping test, carried out in transient flow regime, lasted about 95 hours. From the analyses of the experimental data, it has been possible to determine, applying the Cooper-Jacob method (COOPER & JACOB, 1946), a transmissivity (T) values of $3.00 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$. Such a relatively high value can be related to the local presence of higher permeability rocks, mainly calcareous, also recognised during the drilling of P1 and P2 boreholes.

The storage coefficient (S), nearly coincident with the effective porosity of the unconfined aquifer, resulted equal to 3.1×10^{-2} ; this value is in good agreement with the effective porosity determined in some carbonate platform facies aquifers of the central-southern Apennines (CELICO *et alii*, 1977; CELICO, 1981; 1982), that ranges from 2.6×10^{-2} to 4.0×10^{-2} , thus confirming the influence of the calcareous component on the local hydraulic characteristics of the aquifer. Once the pumping test was completed, the well radius reached several hundred meters (about 860 m), in accordance with the high transmissivity of the fractured medium.

AQUIFER RECHARGE AND FEATURES OF THE GROUNDWATER FLOW

In the following paragraph we describe the principal hydrogeological characters that concern recharge and groundwater flow mechanisms in the Mount Campo carbonate aquifer. Such elements have been inferred by the comparative analysis of rainfall and discharge data of the Fonte Quarto spring and by the analysis of physical, chemical and isotopic characteristics of the groundwater.

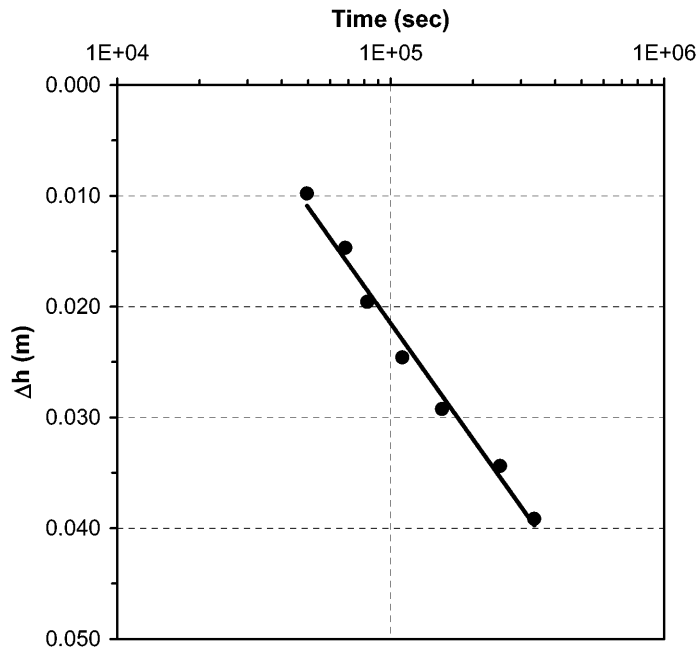


Fig. 4 - Diagramma depressioni piezometriche (Δh) -Log tempo (sec) per il pozzo di osservazione P1
- Drawdown (Δh) - Log time (sec) graph for the monitoring P1 well

Analisi dei dati di portata sorgiva

Le indagini idrogeologiche espletate nell'area del Monte Campo, nel gennaio 2000, hanno consentito di censire e rilevare circa 20 sorgenti, di cui una è alimentata dalla falda di base (gruppo Fonte Quarto; 1040 m s.l.m.) mentre le altre da una circolazione idrica sotterranea sospesa in alta quota. Queste ultime sorgenti, distribuite lungo i versanti carbonatici (Fig. 1a), sono localizzate nella fascia di altitudine compresa tra 1100 e 1590 m s.l.m.

Poiché lo studio è stato focalizzato prevalentemente sull'analisi delle dinamiche della falda di base, le sorgenti d'alta quota sono state monitorate solo in due differenti periodi (agosto 2000 e gennaio 2001), al fine di acquisire informazioni sulla loro persistenza nelle diverse fasi dell'anno idrologico. Dette sorgenti, sulla base delle misure di portata (variabili tra 0.0045 m³/s, in piena, e 0.0001 m³/s, in magra), sono contraddistinte da un regime variabile con carattere da perenne a stagionale.

Per il gruppo sorgivo Fonte Quarto, invece, i dati di portata derivati dal monitoraggio mensile, eseguito tra agosto 2000 e gennaio 2001, hanno consentito, anche mediante l'utilizzo delle misurazioni a cadenza settimanale effettuate tra luglio 1982 e maggio 1984 (CASSA PER IL MEZZOGIORNO, 1984), di comprendere le dinamiche della falda in rete. In base alla ricostruzione ed all'analisi dell'idrogramma sorgivo (Fig. 5), nonché al successivo confronto con le precipitazioni giornaliere (pioggia e neve), registrate dalla stazione meteorologica di Pescopennataro (gestita dall'ex S.I.M.N.- Compartimento di Pescara), sono state derivate le seguenti interpretazioni.

L'intero gruppo sorgivo Fonte Quarto è caratterizzato da una portata media, riferita all'anno idrologico 1982-1983, pari a circa 0.072 m³/s, mentre il valore medio del periodo agosto 2000-gennaio 2001

Analysis of the spring discharge data

The field hydrogeological investigations carried out in the Mount Campo area in the January 2000 allowed the survey of about 20 springs, one fed by the basal groundwater flow (Fonte Quarto spring; 1040 m a.s.l.) and the others fed by perched groundwater in relatively higher altitudes. These latter springs, distributed along the slopes (Fig. 1a), are located in the altitudinal range comprised from 1100 to 1590 m a.s.l.

According to the purpose of the study, focused on the comprehension of the basal groundwater flow hydrodynamics, the high altitude springs have been monitored in two different periods only (August 2000 and January 2001) and with the specific scope to discover their persistence during the hydrologic year. These springs resulted with variable discharges ranging from 0.0045 m³/s to 0.0001 m³/s, respectively in the periods of maximum and minimum flow, and with a regime from perennial to seasonal.

Instead, the monthly discharge data collected for the Fonte Quarto spring in the period of August 2000 and January 2001 allowed the understanding of important aspects concerning the groundwater flow hydrodynamics, which have been further confirmed through the comparative analysis of weekly discharge data collected in the period between July 1982 and May 1984 (CASSA PER IL MEZZOGIORNO, 1984).

From the reconstruction and the analysis of the spring hydrograph (Fig. 5), as well as the subsequent comparison with daily precipitations (rainfall and snow), recorded by the Pescopennataro meteorological station (controlled by the ex-S.I.M.N. - Compartment of Pescara), we have derived the following interpretations.

The Fonte Quarto spring is characterised by an average discharge, referred to the hydrologic year 1982-1983, equal to about

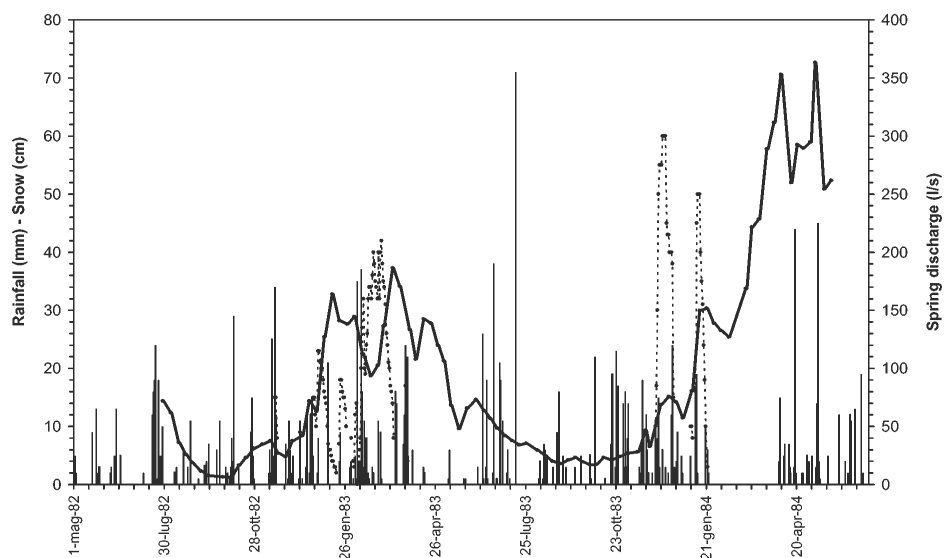


Fig. 5 - Confronto tra piogge giornaliere (istogramma), neve (linea tratteggiata) e portate sorgive del gruppo Fonte Quarto (linea continua)
 - Comparison between daily rainfall (vertical bars), snow (dashed line) and discharges of the Fonte Quarto spring (continuous line)

è invece risultato pari a circa $0.045 \text{ m}^3/\text{s}$.

Nell'ambito dei tre anni idrologici (1981-1982, 1982-1983 e 1999-2000) oggetto di monitoraggio delle portate sorgive, l'idrogramma ha mostrato ripetute fasi di rapida ricarica ed esaurimento, in stretta relazione con l'occorrenza di precipitazioni, sovrapposte ad un trend di esaurimento di lungo periodo, tra il tardo inverno e l'inizio autunno. L'analisi dell'esaurimento di lungo periodo, mediante il modello di Maillet (MAILLET, 1905), ha evidenziato valori elevati del coefficiente di esaurimento (a), rispettivamente pari a $5.20 \times 10^{-2} \text{ g}^{-1}$, $1.84 \times 10^{-2} \text{ g}^{-1}$ e $6.50 \times 10^{-3} \text{ g}^{-1}$ (Figg. 6a, 6b e 6c) e quindi una elevata capacità di svuotamento dell'acquifero basale. Valori ancora più elevati del coefficiente di esaurimento sono stati riscontrati nelle fasi di esaurimento di breve periodo, soprattutto durante la ricarica inver-

$0.072 \text{ m}^3/\text{s}$, while the average discharge value in the period August 2000–2001 has been evaluated in about $0.045 \text{ m}^3/\text{s}$.

During the three observed hydrologic years (1981-1982, 1982-1983 and 1999-2000) the spring hydrograph showed repeated phases of rapid recharge and recession phases, strictly dependent by precipitation inputs, superimposed onto and a main recession trend from the late winter to the early autumn. The analysis of the main recession trend by the Maillet's model (MAILLET, 1905), has globally indicated a rapid depletion capacity of the basal aquifer with high values of the recession coefficient (a) respectively corresponding to $5.20 \times 10^{-2} \text{ g}^{-1}$, $1.84 \times 10^{-2} \text{ g}^{-1}$ and $6.50 \times 10^{-3} \text{ g}^{-1}$ (Figs. 6a, 6b, 6c). Higher values have been found on the short-term recession phases, especially during the winter recharge, when a strong contri-

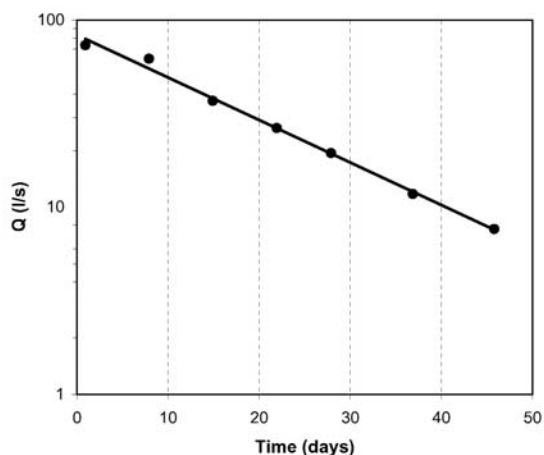


Fig. 6a - Fase di esaurimento del gruppo sorgivo Fonte Quarto, nell'anno idrologico 1981-1982. Il primo dato si riferisce alla portata del 28 luglio 1982
 - Depletion phase of the Fonte Quarto spring in the 1981-1982 hydrologic year. The first value is referred to the discharge recorded on the 28th July 1982

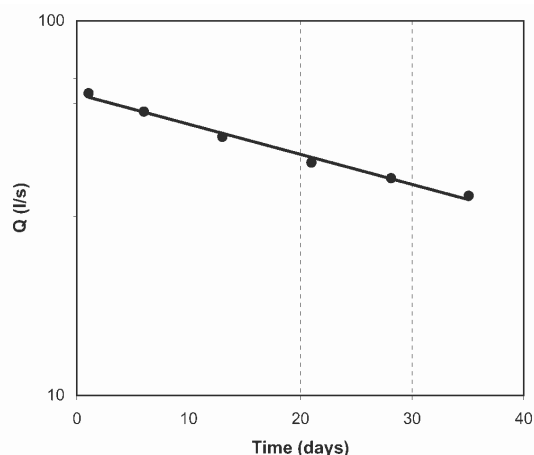


Fig. 6b - Fase di esaurimento del gruppo sorgivo Fonte Quarto, nell'anno idrologico 1982-1983. Il primo dato si riferisce alla portata del 13 giugno 1983
 - Depletion phase of the Fonte Quarto spring in the 1982-1983 hydrologic year. The first value is referred to the discharge recorded on the 13th June 1983

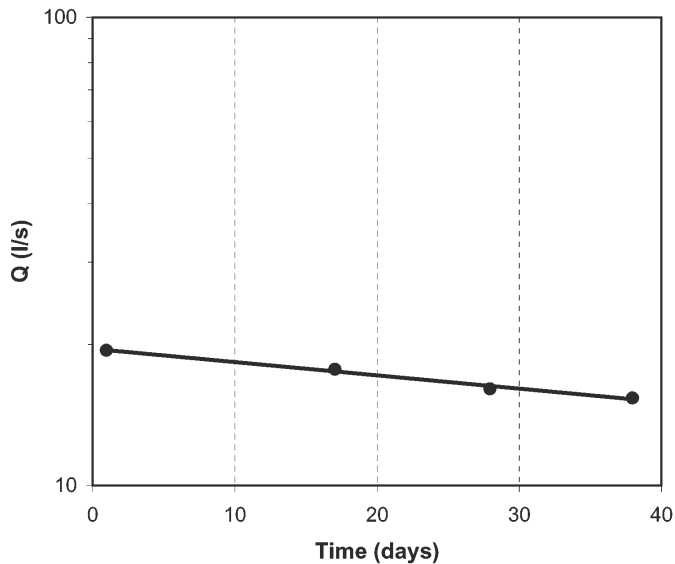


Fig. 6c - Fase di esaurimento del gruppo sorgivo Fonte Quarto, nell'anno idrologico 1999-2000. Il primo dato si riferisce alla portata del 13 agosto 2000
- *Depletion phase of the Fonte Quarto spring in the 1999-2000 hydrologic year. The first value is referred to the discharge recorded on the 13th August 2000*

nale, quando sussiste un rilevante contributo delle fratture caratterizzate da maggiore apertura.

Tuttavia, se le differenze riscontrate nelle fasi di decremento delle portate in periodo estivo, tra il primo ed il secondo anno idrologico, sono attribuibili al differente regime pluviometrico (Fig. 5), lo stesso non può essere affermato con certezza per il terzo anno idrologico. Infatti, per quest'anno, il valore più basso di α ($6.50 \times 10^{-3} \text{ g}^{-1}$) potrebbe essere stato influenzato dalla differente cadenza temporale di monitoraggio.

Le articolate dinamiche della falda, nelle diverse fasi dell'anno idrologico, sono da attribuire alla presenza di circuiti idrici sotterranei piuttosto veloci, legati all'infiltrazione efficace diretta, ossia ad un deflusso prevalentemente in rete e, solo subordinatamente, in canalizzazioni carsiche. Ciò è evidenziato dall'esistenza di episodi di ricarica che, sebbene rapidi, sono modulati nel tempo una durata fino a diversi giorni o settimane; pertanto, tale meccanismo di ricarica, a differenza dei fenomeni di intumescenza (esauribili anche in poche ore o giorni), caratteristici di sorgenti interconnesse con circuiti in canalizzazioni carsiche, è attribuibile alla presenza prevalente di un'alimentazione diretta e diffusa della falda in rete.

Una conferma dell'estrema variabilità del regime sorgivo del gruppo Fonte Quarto è fornita anche dall'elevato valore dell'indice di Meinzer (pari a circa 252%), calcolato per l'anno idrologico 1982-1983. La rapidità, con cui la falda di base risente del fenomeno dell'infiltrazione efficace, è certamente influenzata dallo spessore relativamente ridotto della zona vadosa (mediamente pari a circa 80÷100 m; Fig. 1b, sez. A-A' e B-B') e dalla conducibilità idraulica verticale relativamente elevata. Infatti, sulla base dei suddetti tempi di ritardo tra eventi pluviometrici ed incremento delle portate sorgive è stato possibile stimare una velocità media di percolazione attraverso la zona vadosa di circa 22 m/g. Detto valo-

bution of the opened fractures exists.

Nevertheless, even though the discharge recession phases observed during summer are quite different between the first and the second hydrologic year, because of the different rainfall pattern (Fig. 5), the difference between the first (and/or the second) and the third hydrologic year can not be similarly justified. Probably the lower value of α ($6.50 \times 10^{-3} \text{ g}^{-1}$), estimated for the last hydrologic year, could have been influenced by the sparse monitoring. In other words, in such complex hydrogeological framework, the monthly monitoring could give an apparent modulation and/or attenuation of the real groundwater dynamic both during recharge and recession periods.

The articulated dynamics of the groundwater flow in the fissured aquifer, in the different phases of the hydrologic year, can be related to the presence of rapid groundwater paths, connected with the effective infiltration and with a groundwater flow in opened fractures (and only subordinately in karst conduits).

This has been evidenced by the existence of recharge episodes that, even if rapid, resulted to be modulated according to their duration extended up to some days or weeks. Therefore, such recharge mechanism, differently from the rapid discharge fluctuations (with a duration of some hours or days), which are characteristic of springs connected with karst conduits, can be related to the prevailing presence of groundwater flow in a diffuse network of little opened fractures.

A confirmation of the enhanced variability of the spring regime is also given by the high value of the Meinzer's coefficient, calculated for the 1982-1983 hydrologic year as equal to 252%. The velocity of the response of the basal water table to recharge phenomena can be related to the relatively thin vadose zone (thick about 80÷100 m; Fig. 1b, sections A-A' and B-B'). On the basis of the estimated time lag between precipitations and discharge increase, the calculation of a mean velocity of percolation through the vadose zone of about 22 m/d has been made. Such velocity value result to be lower than those estimated

re è inferiore a quelli riscontrati in acquiferi carbonatici in facies di piattaforma dell'Italia meridionale (pari a circa 30 m/g; in CELICO, 1997; CELICO & MATTIA, 2002). Tale dato è coerente con le relative differenze litostratigrafiche, strutturali, oltre che idrogeologiche, caratterizzanti le diverse serie carbonatiche, di piattaforma e di bacino.

Inoltre, il regime della falda in rete è caratterizzato da una notevole variabilità anche durante il periodo successivo alla principale fase di ricarica. Infatti, contrariamente a quanto è stato più volte verificato in numerosi altri acquiferi carbonatici dell'Appennino meridionale di grande estensione (CELICO, 1983a), la fase di esaurimento estiva-autunnale è influenzata da eventi di pioggia anche non particolarmente intensi (Fig. 5). Nella fattispecie, tali differenze sono verosimilmente connesse, a parità di altri fattori (litologia, assetto strutturale, fenomeno carsico, spessore non-saturo, etc.), con la presenza di terreni di copertura discontinui e di limitato spessore oppure a tessitura grossolana, e quindi ad elevata conducibilità idraulica.

ANALISI CHIMICO-FISICHE E ISOTOPICHE DELLE ACQUE SOTTERRANEE

La caratterizzazione chimico-fisica delle acque sotterranee è stata basata sull'elaborazione di dati sperimentali relativi a campionamenti effettuati sul gruppo sorgivo Fonte Quarto con cadenza mensile, nel periodo compreso tra dicembre 1982 e novembre 1983 (CASSA PER IL MEZZOGIORNO, 1984). Sono stati inoltre considerati anche i contenuti isotopici delle stesse acque sotterranee ($\delta^{18}\text{O}$, δD e UT), riferiti a due differenti periodi (marzo 1983 ed ottobre 1983).

Caratterizzazione chimico-fisica delle acque sotterranee

L'analisi e l'elaborazione dei dati è stata finalizzata all'acquisizione di elementi di comprensione in merito al chimismo, ai meccanismi di mineralizzazione ed allo stato qualitativo delle acque sotterranee e quindi di conferma dello schema generale di circolazione idrica sotterranea. La variabilità dei principali parametri chimico-fisici è stata interpretata in accordo alle peculiari caratteristiche del flusso idrico sotterraneo.

Le acque del gruppo Fonte Quarto sono caratterizzate da temperature mediamente basse, comprese tra 4.3 e 7.5 °C, i cui massimi valori si registrano nel periodo di magra o in occasione di significativi incrementi di portata. La conducibilità elettrica (CE) ed il residuo fisso (TDS) assumono valori mediamente bassi, rispettivamente pari a 373 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e 211 mg/l; i rispettivi intervalli di variazione sono compresi tra 320÷414 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e tra 179÷229 mg/l. La facies idrochimica (Fig. 7a) è di tipo bicarbonato-alcantino-terrosa (PIPER, 1944); le acque sorgive sono pertanto caratterizzate, in accordo con la natura prevalentemente calcarea dell'acquifero, da una preminente presenza di ioni Ca^{++} e HCO_3^- e, subordinatamente, di ioni Mg^{++} , Na^+ e SO_4^{--} (Fig. 7b).

La variazione del grado di mineralizzazione delle acque sorgive (Fig. 8) mostra che le più alte concentrazioni si registrano durante il

for some of the main carbonate platform facies aquifers of the Southern Italy (lower than 30 m/d CELICO, 1997; CELICO & MATTIA, 2002). This result is consistent with the lithologic, stratigraphic, structural and hydrogeological differences, which characterise the different carbonate series, respectively related to carbonate platform and basin paleo-depositional environments.

Moreover, the groundwater flow regime, in the fractured medium, shows a marked differentiation even in the period following the main recharge phase. In fact, differently from what usually observed in various other carbonate aquifers of the Southern Apennines with large extension (CELICO, 1983a), the principal recession phase, through the summer and the autumn, results as much influenced even by pluviometric phenomena with ordinary intensity (Fig. 5). In particular, such differences can be likely related, besides factors as lithology, structural setting, karst phenomena, vadose zone thickness, etc., with the scarce presence, in some areas, of a significant mantle of soil, or with the presence of coarse grain size soil with high hydraulic conductivity.

CHEMICAL, PHYSICAL AND ISOTOPIC ANALYSES OF GROUNDWATER

The chemical and physical characterisation of groundwater has been carried out by means of the elaboration of data collected in the period December 1982 and November 1983 by means of a monthly sampling of the Fonte Quarto spring (CASSA PER IL MEZZOGIORNO, 1984). Isotopic data of the same groundwater ($\delta^{18}\text{O}$, δD e UT), referred to two different periods (March 1983 and October 1983), have been also considered.

Chemical and physical characterisation of groundwater

The analyses have been finalised to the comprehension of the groundwater chemical composition, of the mineralization modes as well as of the qualitative state, therefore from them the general groundwater flow scheme has been validated. The variability of the principal chemical and physical groundwater parameters has been interpreted according to the peculiar characteristics of the groundwater flow.

The Fonte Quarto spring is characterised by low temperatures, ranging between 4.3 and 7.5 °C, whose maxima occur in the low flow period or during relevant discharge increment. The Electrical Conductivity (CE) and the Total Dissolved Solids (TDS) have relatively low values, equal to average values of 373 $\mu\text{S}/\text{cm}$ and 211 mg/l, respectively. The correspondent variation intervals are comprised between 320÷414 $\mu\text{S}/\text{cm}$ and between 179÷229 mg/l. The hydrochemical facies is Ca^{++} - HCO_3^- type (PIPER, 1944) (Fig. 7a); the groundwater of the spring are characterised, according to the mainly calcareous aquifer composition, by a dominant presence of Ca^{++} and HCO_3^- ions and, subordinately, of Mg^{++} , Na^+ and SO_4^{--} ions (Fig. 7b).

The variation of the mineralization grade (Fig. 8) shows that the highest concentrations occur during the recession period, but also in

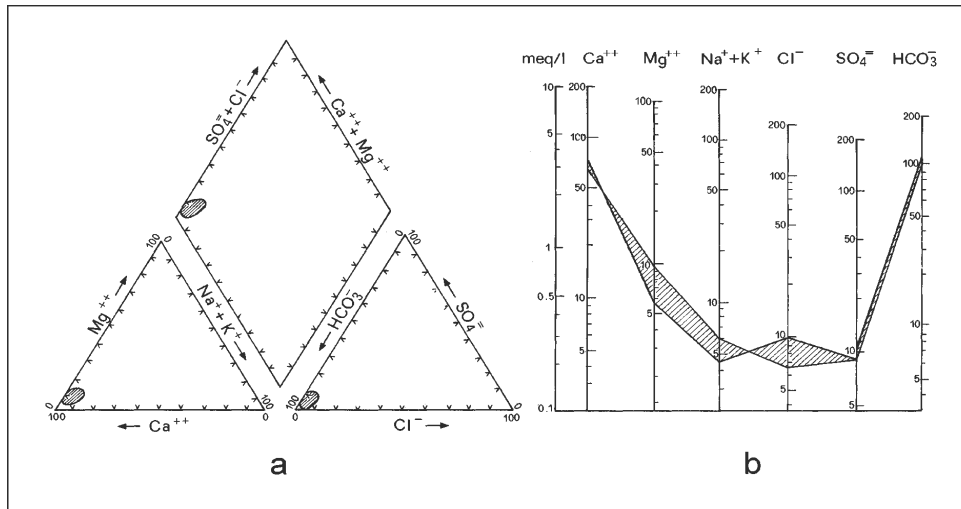


Fig. 7 - Diagramma di Piper (a) e di Schoeller-Berkaloff (b)
- Piper (a) and Schoeller-Berkaloff (b) diagrams

periodo di esaurimento della falda, anche se sono stati registrati significativi incrementi di conducibilità elettrica in occasioni di importanti eventi di ricarica. Ciò, in accordo con la variazione di gran parte dei principali ioni (HCO_3^- , Na^+ , K^+ , Mg^{++} , SO_4^-), è da correlare, nel primo caso, alla presenza di circuiti idrici sotterranei relativamente più lenti (e quindi più mineralizzati) interconnessi con la fitta rete di microfratture e, nel secondo caso, alla mobilizzazione di acque a circuito più profondo che, per effetto della stessa ricarica, ossia dell'incremento del carico idraulico, vengono facilitate, nel loro deflusso, a riemergere in superficie. Avvalorano tale tesi le correlazioni lineari positive tra i valori di temperatura e di CE (R^2 pari a 0.79), tra i valori di durezza e di CE (R^2 pari a 0.84), nonché gli incrementi del rapporto $r\text{SO}_4^{++}/r\text{Cl}^-$ in magra e/o in occasioni di eventi di pioggia particolarmente intensi.

I principali rapporti caratteristici denotano un'impronta decisamente di origine carbonatica. Infatti, il rapporto $r\text{Mg}^{++}/r\text{Ca}^{++}$ (compreso tra 0.08 e 0.30; Fig. 8) rientra ampiamente nell'intervallo dei valori caratteristici di acque circolanti in rocce calcaree (SCHOELLER, 1975).

Il rapporto $r\text{SO}_4^-/r\text{Cl}^-$, compreso tra 0.70 e 1.30, evidenzia la presenza di una significativa interazione tra acque sotterranee e litotipi marnosi e marnoso-argillosi, intercalati nella serie carbonatica, che avviene maggiormente nel periodo di magra, quando le acque sotterranee defluiscono prevalentemente nel fitto reticolo di microfratture in cui ha sede la falda in rete. In tal senso, i valori più elevati, registrati in concomitanza di episodi di ricarica dell'acquifero, confermano la mobilizzazione di acque più mineralizzate a circuito più lento, residenti nella parte più profonda della falda di base.

L'accertata presenza di discrete concentrazioni di F^- , comprese tra 0.17 e 0.30 mg/l, e di Sr^{++} , comprese tra 0.32 e 0.64 mg/l, è anch'essa ascrivibile ai succitati motivi lito-stratigrafici. I valori più elevati registrati nel periodo di massima ricarica (gennaio-aprile 1983) ed in picchi localizzati nel periodo di magra, sono riconducibili alla mobilizzazione di circuiti più lenti e profondi presenti all'interno nell'acquifero fessurato.

Sulla base dei dati disponibili, i bassissimi valori di NH_4^+ , NO_3^- ,

the high flow period after relevant recharge events. This behaviour is in agreement with the temporal variations of the principal ions (HCO_3^- , Na^+ , K^+ , Mg^{++} , SO_4^-) and can be correlated in the first case to the presence of relatively slow groundwater path in the micro-fractures network, namely with higher TDS. Moreover, in the second case, to the mobilisation of deep groundwater that is induced to outflow owing to the recharge effect, namely due to the increase of hydraulic gradient. The previous interpretations are confirmed by: positive linear correlations between groundwater temperature and CE (R^2 equal to 0.79) and between hardness and CE (R^2 equal to 0.84) as well as the increments of the $r\text{SO}_4^{++}/r\text{Cl}^-$ during low flow period and/or in occurrence of high intensity rainfall periods.

The principal characteristic ionic ratios are in agreement with the typical calcareous aquifer hydrochemical facies. In fact (Fig. 8), the ratio $r\text{Mg}^{++}/r\text{Ca}^{++}$ (comprised between 0.08 and 0.30) is included in the range of characteristic values of groundwater of the calcareous aquifers (SCHOELLER, 1975).

The ratio $r\text{SO}_4^-/r\text{Cl}^-$, which ranges between 0.70 and 1.30, shows the presence of a significant interaction of groundwater with marly and marly-clayey rocks that are interbedded into the carbonate series. Such interaction is more evident in the low flow period, namely in the period in which groundwater flow occur in the micro-fractures network. In such a sense the highest values recorded in concomitance of aquifer recharge episodes, confirm that such mechanism of mineralization is connected with the involvement of slower circuits, flowing in the deeper part of the aquifer.

The proved presence of significant concentrations of F^- , ranging between 0.17 and 0.30 mg/l, and of Sr^{++} , ranging between 0.32 and 0.64 mg/l, can be related to the aforesaid lithological and stratigraphic factors. The highest values have been recorded in the period of maximum recharge (January-April 1983) and in occasion of discharge peaks occurred after high intensity rainfalls during low flow period. This behaviour can be comprised by means of the aforesaid mechanism of mobilisation of slow and deep groundwater flow paths

NO₂⁻, Cl⁻ e sostanza organica denotano un buono stato qualitativo della risorsa (D.L.vo 152/99).

L'impatto esercitato dalla presenza diffusa di attività di pascolo e/o dallo spargimento di concimi organici risulta del tutto trascurabile; ciò suggerirebbe che l'acquifero possa esercitare un'efficace azione di autodepurazione nei confronti dei possibili fenomeni di contaminazione presenti in superficie. Tuttavia, la cadenza di monitoraggio mensile, decisamente rada rispetto alla variabilità dei meccanismi di ricarica e di flusso idrico sotterraneo, potrebbe aver celato fenomeni di inquinamento, altresì accertabili esclusivamente mediante campionamenti a cadenza giornaliera o settimanale. Infatti, la necessità di intensificare la cadenza del monitoraggio qualitativo delle risorse idriche sotterranee è stato di recente accertata (CELICO *et alii*, 2004a; CELICO *et alii*, 2004b) anche in altre aree carbonatiche molisane, caratterizzate da scenari idrogeologici ed antropici molto simili a quello in esame.

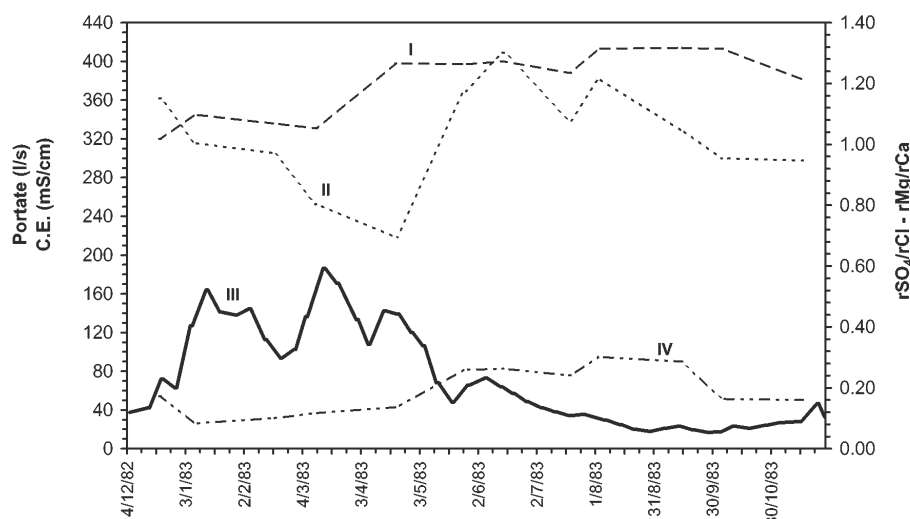


Fig. 8 - Confronto tra parametri fisici e chimici delle acque del gruppo Fonte Quarto e portate sorgive (I: conducibilità elettrica C.E.; II: rSO₄⁻/rCl⁻; III: portate sorgive; IV: rMg/rCa)
 - Comparison between physical and chemical parameters of the Fonte Quarto spring and discharges (I: electric conductivity; II: rSO₄⁻/rCl⁻; III: spring discharge; IV: rMg/rCa)

Analisi isotopica delle acque sotterranee

Anche i contenuti isotopici (δ¹⁸O, δD e U.T.) riscontrati nelle acque sorgive del gruppo Fonte Quarto (Tab. 1), nel periodo marzo 1983 e ottobre 1983, confermano lo scenario idrodinamico in precedenza delineato.

Tramite l'utilizzo della legge empirica di variazione lineare δ¹⁸O/altitudine, ricostruita per alcuni bacini idrografici molisani defluenti nel Mar Adriatico (ZUPPI *et alii*, 1974), è stato possibile stimare, in via preliminare, la quota media del bacino di alimentazione del gruppo sorgivo Fonte Quarto. Il valore determinato, pari a circa

in the fractured aquifer.

On the basis of the available data, the low values of NH₄⁺, NO₃⁻, NO₂⁻, Cl⁻ and organic matter indicate a good quality status of groundwater (D.L.vo 152/99).

The impact of the diffuse pasture activity and/or the organic fertilizer strewing appears to be negligible. This observation suggests that the aquifer would have an efficient depuration role against pollution phenomena coming from the ground surface. Nevertheless the monthly monitoring frequency, very sparse respect to the complexity and the articulation of recharge and groundwater flow mechanisms, could have hide pollution phenomena detectable only through a temporal closer sampling (daily or weekly). In fact, the need to intensify the usual criterions of qualitative monitoring of groundwater has been recently verified (CELICO *et alii*, 2004a; CELICO *et alii*, 2004b) even in other carbonate areas of the Molise region, characterised by hydrogeological and land-use features similar to the examined case.

Isotopic analysis of groundwater

The isotopic concentrations δ¹⁸O, δD and U.T. detected in the groundwater of the Fonte Quarto spring (Tab. 1), in the period March-October 1983, confirm the hydrodynamic scenario previously described.

By means of the empirical linear relation δ¹⁸O/altitude, reconstructed for some Molisan hydrographic basins flowing in the Adriatic Sea (ZUPPI *et alii*, 1974), the average altitude of recharge areas of the Fonte Quarto spring has been preliminarily estimated. The estimated value is about equal to the mean altitude of mountains

Tab. 1 - Dati isotopici delle acque del gruppo sorgivo Fonte Quarto
 - Isotopic data of the Fonte Quarto springs

Sampling period					
March 1983			October 1983		
δ ¹⁸ O	δD	UT	δ ¹⁸ O	δD	UT
-9,71	-57,2	13,7	-9,65	-60,1	54,1

1400 m s.l.m., è comparabile con la quota media dei rilievi che costituiscono l'idrostruttura del Monte Campo (Fig. 1a).

Inoltre, i valori di tritio, variabili tra marzo ed ottobre 1983 nell'intervallo 43.7 e 54.1 U.T. (Tab. 1), hanno fornito indicazioni utili sui tempi di residenza delle acque di infiltrazione efficace all'interno dell'acquifero. Infatti, dal confronto con la concentrazione media annua (pari a circa 50 U.T.), registrata nel 1980 (GONFIANTINI, 1983) per le acque di pioggia della stazione pluviometrica di Genova-Sestri, ha evidenziato che le acque sorgive del gruppo Fonte Quarto risultano caratterizzate da tempi di residenza piuttosto brevi. Ciò è interpretabile come un'ulteriore conferma dell'esistenza di un'idrodinamica sotterranea a ricambio attivo, con circuiti prevalentemente rapidi nell'acquifero carbonatico.

CONCLUSIONI

Le ricerche finora condotte hanno consentito di ampliare le conoscenze riguardanti gli acquiferi carbonatici dell'Italia meridionale, facendo luce sulle peculiari caratteristiche idrogeologiche e idrodinamiche di quelli in facies di bacino, finora poco studiati poiché meno importanti, a scala regionale, di quelli in facies di piattaforma carbonatica, dai quali dipende l'approvvigionamento dei principali sistemi acquedottistici.

L'attività di ricerca multidisciplinare ha consentito di effettuare le seguenti principali considerazioni. Il rilievo del Monte Campo costituisce un'unità idrogeologica i cui limiti corrispondono a contatti di natura tettonico-stratigrafica, esistenti tra la serie carbonatica e le unità circostanti (Flysch di Agnone e Argille Varicolori), queste ultime, caratterizzate da un grado molto basso di permeabilità relativa. L'assetto strutturale e l'estrema articolazione litostratigrafica della serie condizionano, in modo marcato, la circolazione idrica sotterranea, consentendo la formazione di emergenze idriche, oltre che basali, anche a quote elevate. Infatti, la presenza di intercalazioni marnose e marnoso-argillose, nonché il diverso grado di fratturazione e di carsificazione della parte più superficiale della successione carbonatica, generano, localmente, scomposizioni verticali della circolazione idrica sotterranea, dando origine a numerose falde sospese o d'alta quota (Fig. 1a). La presenza di un elevato grado di fratturazione dell'ammasso roccioso ed un'evidente fenomenologia carsica epigea (Fig. 1a) determina, per la falda di base, meccanismi di ricarica e modalità di flusso idrico sotterraneo piuttosto articolati. Dall'analisi integrata dei dati pluviometrici e di portata (Fig. 5), sono stati evidenziati circuiti idrici sotterranei prevalentemente in rete. In particolare, ciò è stato ipotizzato sulla base della rapidità delle dinamiche di ricarica e di svuotamento, fortemente dominate dall'infiltrazione diffusa nel mezzo fratturato. Anche in periodo "non influenzato", la circolazione idrica sotterranea è risultata caratterizzata da deflussi connessi con circuiti veloci e relativamente poco profondi, tali da determinare tempi di risposta dell'acquifero, di circa 4 giorni, correlabili al ridotto spessore della zona vadosa (circa 80÷100 m).

Inoltre, se da un lato il valore medio di velocità di percolazione

constituting the Mount Campo structure (Fig. 1a).

Moreover, the mean values of tritium, equal to about 49 U.T., which ranged in the period March – October 1983 between 43.7 and 54.1 U.T. (Tab. 1), gives a useful indications for what concerns the groundwater flow duration. In fact, the comparison with the mean annual concentration (about 50 U.T.), recorded in 1980 (GONFIANTINI, 1983) by the Genova-Sestri rain gauge station (belonging to the IAEA-OMM network), allowed to recognise as the groundwater of the Fonte Quarto spring is characterised by paths with relatively short duration.

This result represents a further validation about the existence of an active groundwater hydrodynamics with generally very rapid paths within carbonate aquifer.

CONCLUSIONS

The researches that we carried out, allow to amply the hydrogeological knowledge concerning carbonate aquifers in the Southern Italy, focusing the scope on the characterisation of the basin facies aquifers, less studied up to now because of their minor importance at the regional scale than the carbonate platform facies aquifers, from which the feeding of the principal aqueduct systems depends.

The multidisciplinary activity carried out for the aquifer of Mount Campo, allow the following final considerations. Mount Campo constitutes a hydrogeological unit whose boundaries correspond to tectonic and stratigraphic contacts existing between carbonate series and the lower permeability surrounding units (*Agnone Flysch* and *Argille Varicolori*). The structural setting and the marked lithological and stratigraphic articulation of the carbonate series strongly influence the groundwater flow, allowing the formation of springs both basal and located at higher altitudes. In fact, the presence of scarcely permeable marly and marly-clayey interbeds as well as the different fracturing and development of the karst phenomenon in the upper part of the carbonate series, generate a vertical differentiation of the groundwater flow that contributes to the formation of numerous perched groundwater bodies (Fig. 1a).

The presence of a high fracturing grade of the aquifer and the development of the karst phenomenon (Fig. 1a) implies articulated recharge and groundwater flow mechanisms. From the integrated analysis of rainfall and discharge data (Fig. 5), the flow paths of the basal groundwater have been hypothesised to develop mainly in the fracture network. In particular, this conceptual model has been inferred on the basis of the rapid groundwater hydrodynamics, related to the recharge and recession phases, which are mainly controlled by the diffuse infiltration in the fractured medium. In fact, the basal groundwater flow resulted characterised by quick paths, with a time lag of about 4 days between rainfall events and the water table rise. This can be also attributed to the relatively low thickness of the vadoso zone (about 80÷100 m).

Moreover, if the mean value of the percolation velocity (slightly

(di poco superiore a 20 m/g) evidenzia, a grande scala, le differenti peculiarità idrodinamiche esistenti tra le successioni carbonatiche in facies di bacino e di piattaforma, dall'altro, i valori piuttosto elevati di trasmissività e del coefficiente di immagazzinamento (entrambi dell'ordine di 10^{-2}), sottolineano che, seppure a scala locale, detti sistemi acquiferi possono risultare particolarmente trasmissivi, alla stregua di quelli carbonatici in facies di piattaforma.

Tra l'altro, anche l'analisi dei dati chimico-fisici ed isotopici conferma quanto sopra delineato in merito al comportamento idrodinamico dell'acquifero. Infatti, il basso grado di mineralizzazione delle acque sotterranee ($373 \mu\text{S}/\text{cm}$), i ridotti tempi di residenza all'interno dell'acquifero (valori medi di tritio pari a 49 U.T.), nonché la spiccata variabilità stagionale del chimismo, forniscono indicazioni convergenti verso il suddetto modello concettuale di deflusso idrico sotterraneo.

Quanto sperimentalmente acquisito consente di dimostrare che le idrostrutture carbonatiche in facies di bacino e/o quelle ad esse assimilabili per caratteristiche litostratigrafiche (es. successioni carbonatiche in facies di transizione), ampiamente diffuse in Molise ed in differenti aree dell'Appennino meridionale, risultano caratterizzate: (a) da una circolazione idrica sotterranea particolarmente complessa e scomposta verticalmente, le cui dinamiche possono essere notevolmente veloci; (b) da un regime delle falde composito, in cui si evidenziano una stretta relazione tra fenomeni di ricarica e variazioni del deflusso sotterraneo con mobilitazione sia di circuiti idrici sotterranei lenti e profondi che, soprattutto, superficiali e veloci della falda in rete.

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia l'Ing. Russo, direttore dell'ex Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale, Compartimento di Pescara, per aver cortesemente fornito i dati pluviometrici relativi alla stazione di Pescopennataro (IS).

OPERE CITATE / REFERENCES

- AA.VV. (1969) - *Carta geologica dell'Italia, in scala 1:100000 (F. 153, Agnone)*. Serv. Geol. It., Roma.
- CASSA PER IL MEZZOGIORNO (1984) - *Indagini specialistiche idrogeologiche sulle sorgenti Quarto, Surienze (bacino F. Sangro), Capo Fiume e Acquevive (bacino F. Aventino)* - P.S. 29/1033. Roma.
- CELICO F. (1997) - *Sulle modalità di flusso idrico sotterraneo in idrostrutture carbonatiche di estensione regionale: i Monti Lepini (Lazio)*. Tesi di Dottorato di ricerca in Geologia Applicata, Università degli Studi di Ferrara.
- CELICO F., PETRELLA E. & CELICO P. (2006) - *Hydrogeological behaviour of some fault zones in a carbonate aquifer of Southern Italy: an experimentally-based model*. *Terra Nova* **18**: 308-313, doi: 10.1111/j.1365-3121.2006.00694.x.
- CELICO F. & MATTIA C. (2002) - *Analisi degli effetti indotti dal sisma del 23/11/1980 sugli equilibri idrogeologici della sorgente Sanità (Campania), mediante simulazione ragionata delle dinamiche di ricarica e di esaurimento*. *Quaderni di Geologia Applicata*, **1**: 5-18.
- CELICO F., VARCAMONTI M., GUIDA M. & NACLERIO G. (2004a) - *Influence of precipitation and soil on transport of fecal enterococci in fractured limestone aquifers*. *Appl. Environ. Microbiol.*, **70** (5): 2843-2847.
- CELICO F., MUSILLI I. & NACLERIO G. (2004b) - *The impact of pasture and manure spreading on microbial groundwater quality in carbonate aquifers*. *Environ. Geol.*, **46** (2): 233-236.
- CELICO P. (1981) - *Metodologia di calcolo e possibilità di utilizzazione dei principali parametri idrodinamici dell'acquifero carbonatico dei Monti Lepini (Lazio meridionale)*. *Mem. e Note Ist. Geol. Appl.*, **16**: 1-32.
- CELICO P. (1982) - *La falda in rete dei monti di Venafro: ipotesi di captazione e possibili ripercussioni sul regime idrologico delle sorgenti*. *Mem. e Note Ist. Geol. Appl.*, **XCI**: 43-65.

greater than 20 m/d) roughly shows the different hydrodynamic characteristics existing between the two types of carbonate series aquifers, respectively formed in basin and carbonate platform paleo-depositional environments, the high transmissivity (about $10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$) and the storage coefficient (3.10×10^{-2}), evidence that, even if locally, such aquifers can result particularly permeable, like those of carbonate platform facies.

Finally, the analysis of the chemical, physical and isotopic groundwater parameters confirm what previously pointed out about the groundwater hydrodynamics. In fact, the low mineralization grade ($373 \mu\text{S}/\text{cm}$), the short underground flow duration, due to the quite correspondent values of tritium between groundwater and rainfalls, as well as the fluctuations of the chemical parameters give indications that are in agreement with the hydrogeological model (Fig. 8).

The data allow to sketch the hydrogeological behaviour of the basin facies carbonate series and/or those similar in lithology and stratigraphy (i.e. transitional facies carbonate series), largely diffused in Molise, as to be characterised by: (a) a particularly complex and vertically differentiated groundwater flow, with rapid dynamics; (b) a composite basal flow regime characterised by a rapid relationship between the recharge phenomena and the increase of the spring discharge, thus involving both deeper and slower groundwater flow paths and mainly shallower and quicker groundwater flow paths.

ACKNOWLEDGEMENTS

We thank Eng. Russo, director of the ex-Hydrographic and Tidal National Service, Compartment of Pescara, to kindly have furnished rainfall data of the Pescopennataro (IS) rain gauge station.

- CELICO P. (1983a) - *Idrogeologia dei massicci carbonatici, delle piane quaternarie e delle aree vulcaniche dell'Italia centro-meridionale (Marche e Lazio meridionali, Abruzzo, Molise e Campania)*. Quaderni della Cassa per il Mezzogiorno, **4/2**: 1-225, Roma.
- CELICO P. (1983b) - *Le risorse idriche sotterranee dell'Appennino centro-meridionale*. Idrotecnica, **1**: 3-18.
- CELICO P., CIVITA M., MACCHI A. & NICOTERA P. (1977) - *Il sistema idrogeologico dei monti calcareo-dolomitici di Salerno: idrodinamica, riserve globali e loro degradazione a seguito dello scavo della galleria ferroviaria S. Lucia*. Mem. e Note Ist. Geol. Appl., **13**: 1-44.
- CELICO P., DE GENNARO M., GHIARA M.R., RUSSO D. & STANZIONE D. (1984) - *Relazioni tra idrodinamica e composizione chimica e isotopica delle acque di alcuni massicci carbonatici del Molise*. Periodico di Mineralogia, **53**: 67-88.
- CLERMONTÉ J. (1977) - *La bordure abruzzaise sudorientale et le haut Molise: histoire sédimentaire et tectonique comparée*. Riv. It. Paleont., **83** (1): 21-102.
- COOPER H. H. & JACOB G. E. (1946) - *A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarising well field history*. Am. Geophys. Un. Trans., **27**: 256-534.
- CORRADO S., DI BUCCI D., NASO G. & BUTLER R.W. (1997a) - *Thrusting and strike-slip tectonics the Alto Molise region (Italy): implications to the Neogene-Quaternary Evolution of the Central Apennines Orogenic System*. Geol. Soc. Bull. London, **154**: 679-688.
- CORRADO S., DI BUCCI D., NASO G. & BUTLER R.W. (1997b) - *Neogene-Quaternary Evolution of the Central Apennine Orogenic System (Italy): a structural and paleomagnetic approach in the Alto Molise region*. EUG 9 Meeting, Strasburgo (Francia), Abstract Supplement N. 1, Terra Nova, 9, 388.
- DI BUCCI D. (1995a) - *Rapporti tra piattaforme carbonatiche e "Alloctono" lungo la Media Valle del Sangro*. Boll. Soc. Geol. It., **114**: 443-463 (Roma).
- DI BUCCI D. (1995b) - *Evidenze di strutture regionali profonde nel settore a Sud della Maiella: il contributo dell'analisi da foto aeree e dei dati di pozzo*. Boll. Soc. Geol. It., **114**: 477-496 (Roma).
- DI BUCCI D. & SCROCCA D. (1997) - *Assetto tettonico dell'Alto Molise (Appennino centrale): considerazioni stratigrafiche e strutturali sull'Unità di Montenero Val Cocchiara*. Boll. Soc. Geol. It., **116**: 221-236.
- GONFIANTINI R. (1983) - *La composizione isotopica delle precipitazioni*. Rend. Soc. It. Min. e Petrol., **38-39**: 1175-1187.
- MAILLET E. (1905) - *Essais d'hydraulique souterraine et fluviale*. Libr. Scient. Hermann, Paris.
- PIPER A.M. (1944) - *A graphic procedure in the geochemical interpretation of water analysis*. Am. Geophys. Un. Trans., 25.
- PATACCA E., SCANDONE P., BELLATALLA M., PERILLI N. & SANTINI U. (1992) - *La zona di giunzione tra l'arco appenninico settentrionale e l'arco appenninico meridionale nell'Abruzzo e nel Molise*. Studi Geologici Camerti, 2 (Volume Speciale) CROP **11**: 417-441.
- SCHOELLER H. (1975) - *Le chimisme des eaux souterraines*. Atti 3° Conv. Intern. sulle Acque Sotterranee, 1-3 Novembre 1975, Palermo, **1**: 593-611.
- ZUPPI G.M., FONTES J. CH. & LETOLLE R. (1974) - *Isotopes du milieu et circulations d'eaux sulfurées dans le Latium*. Proc. Symp. Vienna, Isotope Techniques in Groundwater Hydrology, **1** (IAEA), Vienna.

Received December 2005 - Accepted May 2006