

Valutazione e protezione delle risorse idriche sotterranee nella dorsale carbonatica M. Catria-M. Nerone (Marche)

Pierluigi BISON, Claudio MARIOTTI, Mario PIERONI, Fabio PIOVESANA, Mario PRIANTE, Simone PUGI (*)

SOMMARIO

La presente nota costituisce una sintesi dei risultati ottenuti nell'ambito del "Progetto regionale di captazione idropotabile tramite perforazione di pozzo e monitoraggio delle risorse idriche esistenti in località Burano", affidato all'Aquater S.p.A. dalla Regione Marche su finanziamenti del Ministero delle Protezione Civile.

Gli obiettivi dello studio sono stati i seguenti:

- a) Individuare e valutare i caratteri idrogeologici dell'area e reperire, tramite perforazione di un pozzo sperimentale, nuove risorse idriche indenni, presenti negli acquiferi dei complessi carbonatici.
- b) Identificare e caratterizzare i rapporti tra i prelievi del pozzo da perforare nell'ambito del progetto con la ricarica dell'acquifero e le sorgenti della zona, stimando le risorse idriche sotterranee disponibili.
- c) Assicurare un costante controllo della quantità e della qualità delle acque sotterranee.

L'intero studio ha utilizzato quanto di più attuale nel campo della tecnologia e rappresenta uno dei primi esempi di valutazione integrata delle risorse idriche in chiave moderna.

Nella dorsale carbonatica sono stati riconosciuti 3 complessi idrogeologici principali (Scaglia, Maiolica, Massiccio/Corniola) separati da acquicludi la cui continuità laterale è strettamente dipendente dalle locali condizioni tettonico-strutturali e dal tipo di sedimentazione di alto e basso strutturale che ha caratterizzato il bacino giurassico.

Gli acquiferi dei complessi superiori (Scaglia, Maiolica) hanno una circolazione idrica strettamente condizionata dall'andamento giaciturale degli strati, dalle condizioni tettonico-strutturali e da caratteri tipicamente morfologici. I caratteri idrodinamici dedotti dallo studio delle sorgenti, indicano un tipo di circolazione idrica attiva ed una facies idrochimica tipicamente bicarbonato-calcica. Nell'acquifero di base (Massiccio/Corniola), si hanno due tipi di circolazione idrica: una in condizioni di falda libera ed una in condizioni di falda confinata.

Le acque della falda libera, nelle zone di alto morfologico (alti strutturali), rivelano le stesse caratteristiche idrodinamiche ed idrochimiche di quelle che caratterizzano gli acquiferi superiori.

La falda in pressione, che viene a giorno lungo le incisioni fluviali del F. Bosso e F. Burano, per particolari condizioni tettonico-strutturali, presenta acque più mineralizzate in Mg e SO₄ a dimostrazione di maggiori tempi di contatto acqua-roccia serbatoio, con valori estremi nel caso in cui abbiano un contatto con le Anidriti di Burano.

La ricarica dell'acquifero profondo, come dimostrato dalle analisi isotopiche, avviene negli alti morfologici del M. Catria e del M. Nerone. Dai dati di perforazione è stato anche possibile evidenziare nell'acquifero basale la presenza di tre "stratificazioni idrauliche" strettamente legate ai processi di ricementazione che si verificano nei primi 120-130 m di profondità per fenomeni di "self sealing".

Il bilancio idrologico calcolato sia per tutta l'area di studio (250 km²) che per l'area della struttura carbonatica M. Catria-M. Nerone (115 km²) depurata cioè di quelle porzioni non direttamente contribuenti al bilancio profondo ha fornito una potenzialità residua pari a circa 1.03 m³/s, che corrisponde ad una risorsa fruibile di 0.34 m³/s.

1. METODOLOGIA DI STUDIO

L'approccio metodologico seguito per la realizzazione dello studio è così schematizzabile:

- a) Rilevamento geologico-strutturale dell'intera area (250 km²) alla scala 1:25.000, rilievo geologico-strutturale e geomorfologico in scala 1:10.000 per la parte centrale della zona (circa 100 km²).
- b) Rilievo geologico, strutturale e plano-altimetrico delle principali cavità carsiche esistenti e caratterizzazione idrochimica delle acque rinvenute.
- c) Esecuzione di prospezioni geofisiche mediante sismica a riflessione e sondaggi elettrici verticali.
- d) Censimento dei punti d'acqua esistenti nell'area (sorgenti, pozzi e sezioni fluviali significative) e predisposizione di una rete di monitoraggio mensile su punti "indice".
- e) Installazione di una rete di monitoraggio strumentale automatico, con teletrasmissione dei dati, sui punti d'acqua più significativi (relativa agli afflussi meteorici, temperature, livelli idrici in sorgenti e corsi d'acqua).
- f) Installazione di 3 stazioni sismometriche per lo studio della microsismicità dell'area.
- g) Esecuzione di campagne mensili di monitoraggio delle portate e dei principali parametri chimico-fisici su punti della rete di controllo, per un periodo di 13 mesi.
- h) Esecuzione di 2 campagne di monitoraggio idrochimico su 50 punti d'acqua.
- i) Calcolo del bilancio idrologico dell'area.
- j) Perforazione di un pozzo sperimentale in località Ponte Alto (Fiume Burano) ed esecuzione di prove di emungimento per la determinazione dei parametri idraulici dell'acquifero.

2. ASSETTO TETTONICO-STRUTTURALE E CIRCOLAZIONE SOTTERRANEA

La dorsale carbonatica del M. Catria-M. Nerone costituisce una struttura antiforme di direzione appenninica ad asse leggermente arcuato nell'ambito della cosiddetta Dorsale umbromarchigiana, con depressione assiale in corrispondenza dell'incisione del F. Burano e culminazione nelle aree del M. Catria e M. Nerone (Fig. 1).

L'assetto strutturale risulta caratterizzato da uno stile prevalentemente plicativo con pieghe, sovrascorrimenti, faglie distensive e trascorrenti; il nucleo della dorsale, costituito dai calcari del Massiccio, affiora lungo le principali incisioni fluviali (aree

(*) AQUATER S.p.A. (ENI) S. Lorenzo in Campo, Italia.

di basso strutturale), per fenomeni di precedenza e sovrainposizione, e nelle aree di alto morfologico del M. Nerone, a nord, e del M. Catria, M. Acuto a sud (aree di alto strutturale). La struttura è delimitata con continuità sul versante nord-orientale da un fronte di movimento inverso, principale (piano di sovrascorrimento frontale) che dal Corno di Catria è rinvenibile fino a Secchiano, da dove prosegue per Fosto e Baccardi, pur con rigetti inferiori o comunque decrescenti; il contatto Marne a Fucoidi-Maiolica, che si può seguire dalla zona di Genga Aguzza-M. Morcia fino alla zona di Secchiano, è interpretabile come un retroscorrimento innescatosi per scollamento della parte basale delle Marne a Fucoidi. A tali elementi tettonici principali è associata una serie di pieghe e pieghe-faglie ad asse parallelo che interessa le formazioni della Scaglia e delle Marne a Fucoidi. Al sistema plicativo si associano faglie trascorrenti destre, di direzione circa N-S (da NNE-SSO a NNO-SSE), particolarmente evidenti nella parte meridionale della zona in studio (M. Catria-Corno di Catria, linea Frontone-Badia di Sitria) e faglie sinistre di direzione ENE-OSO (faglia di Acquanera e faglia del M. Cardamagna) nella zona del M. Nerone. Risulta quindi evidente, nella struttura esaminata, una circolazione e direzione dei deflussi idrici sotterranei condizionata dall'assetto strutturale della dorsale, dalle principali dislocazioni tettoniche, dall'inclinazione dell'asse delle

pieghe e dalle principali incisioni fluviali che rappresentano il livello di base degli acquiferi; la presenza di più livelli di scollamento tettonico limita in profondità la geometria concentrica delle pieghe, modificando parte dei contatti stratigrafici originari e causando un significativo riflesso nella struttura dei potenziali acquiferi. A livello di circolazione idrica profonda, le discontinuità tettoniche sviluppate in direzione appenninica, determinano una compartimentazione idraulica che limita il flusso delle acque in direzione prevalentemente longitudinale alla struttura (Fig. 2).

3. IDROGEOLOGIA ED IDROCHIMICA

Considerando che le diverse litofacies carbonatiche presentano caratteri idrogeologici macroscopici simili ed operando una classificazione dei vari litotipi affioranti in base ai caratteri di permeabilità, sono distinguibili dall'alto verso il basso i seguenti complessi [DEIANA G., DRAMIS F., MORETTI A., 1970]

- a - Complesso idrogeologico della Scaglia
- b - Complesso idrogeologico della Maiolica
- c - Complesso idrogeologico del Massiccio/Corniola.

I complessi riferibili alle formazioni del Bisciario, della Marnoso-arenacea e alle Arenarie di M. Vicino, presentando modesta

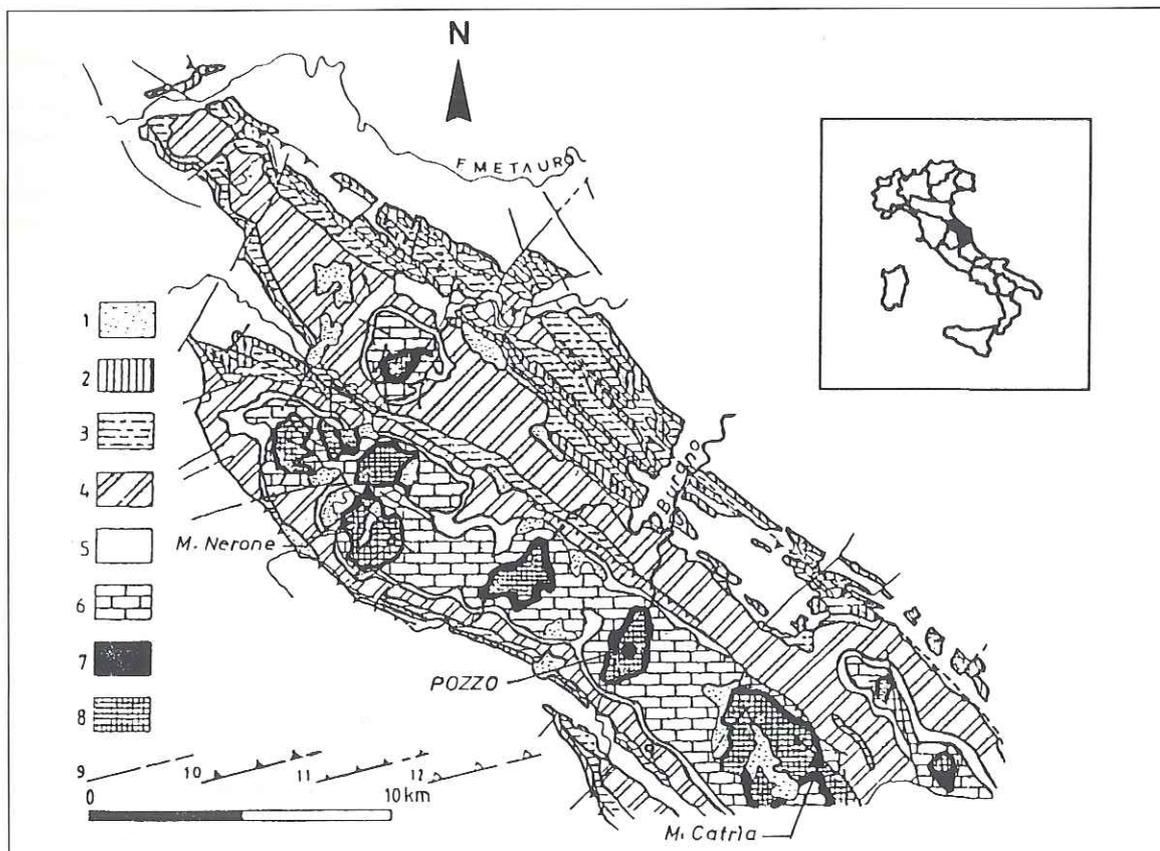


FIG. 1 - Schema idrogeologico dorsale carbonatica M. Catria-M. Nerone

Legenda: 1. Detriti; 2. Bisciario; 3. Acquiclude della Scaglia Cinerea; 4. Complesso idrogeologico della Scaglia; 5. Acquiclude delle Marne a Fucoidi; 6. Complesso idrogeologico della Maiolica; 7. Acquiclude della Formazione del Bosso; 8. Complesso idrogeologico del Massiccio/Corniola; 9. Faglie e faglie probabili; 10. Sovrascorrimenti principali; 11. Sovrascorrimenti secondari; 11. Retroscorrimenti

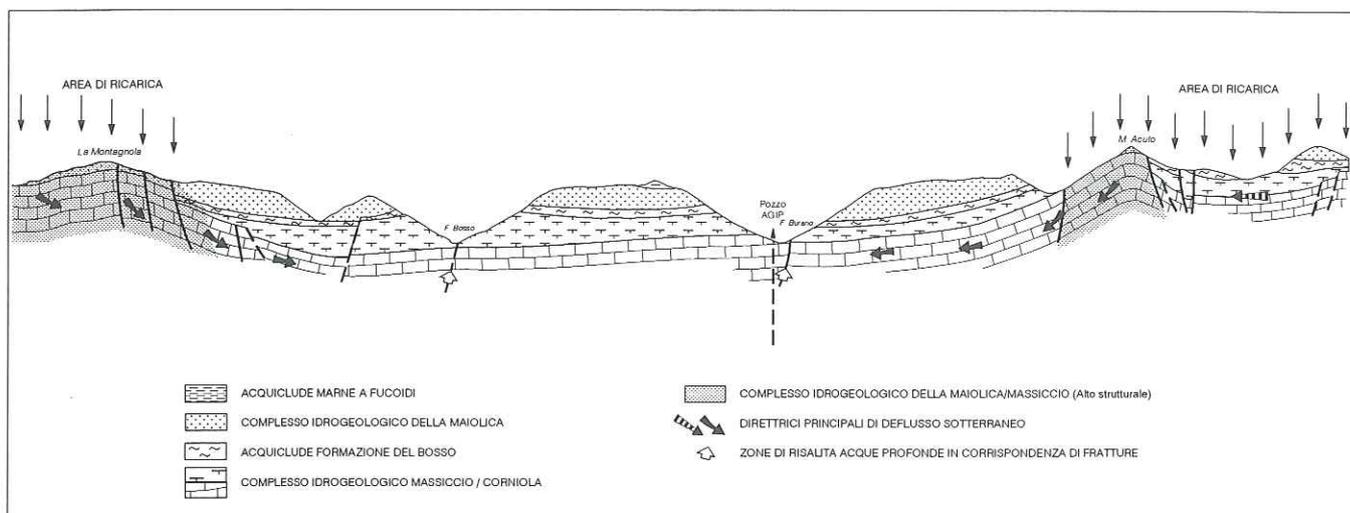


FIG. 2 - Sezione schematica longitudinale alla dorsale

importanza ai fini dello studio, non vengono discussi nella presente nota.

Gli acquiferi presenti nei complessi carbonatici, sono sostenuti da "acquicludi", rappresentati da litotipi a permeabilità da bassa a molto bassa, appartenenti alla Formazione del Bosso, ai Calcari diasprini, alla parte basale delle Marne a Fucoidi ed alle marne della Scaglia Cinerea; quest'ultima, che chiude in alto la Scaglia Rossa, e le Marne a Fucoidi, che la sostengono, rappresentano livelli continui dal punto di vista stratigrafico, mentre il Rosso ammonitico, interposto tra il complesso "Massiccio/Corniola" ed i calcari della Maiolica, ha un andamento discontinuo in relazione ai due tipi di sedimentazione di alto e basso strutturale che hanno caratterizzato il bacino nel Giurassico (Fig. 3).

L'esistenza di un acquiclude basale (Evaporiti del Burano), non affiorante nell'area di studio è stata dimostrata attraverso la perforazione per ricerche petrolifere del pozzo Agip, ubicato a poche centinaia di metri dal pozzo perforato.

a - Complesso idrogeologico Massiccio/Corniola

L'acquifero presente in tale complesso costituisce il livello di base della dorsale carbonatica ed in esso si ha il flusso omogeneo di fondo [BONI et alii, 1986].

Nelle zone a serie completa è costituito dalla Corniola e dal Calcare Massiccio ed è limitato al tetto dalle litofacies a permeabilità da bassa a molto bassa della Formazione del Bosso e dai Calcari diasprini. La permeabilità del Calcare Massiccio è molto elevata, sia per porosità primaria sindeposizionale, intergranulare e strutturale, sia per porosità secondaria; la porosità primaria varia sensibilmente a seconda delle diverse litofacies del Calcare Massiccio (alto strutturale, basso strutturale); in tutta la formazione è poi quasi sempre presente un'intensa fratturazione che accentua la permeabilità.

La permeabilità primaria dei calcari della Corniola è pressoché nulla, mentre quella secondaria è da alta a molto alta, an-

che se nell'area indagata essa sembra presentare valori inferiori rispetto a quelli desumibili dalla bibliografia [DEIANA G., DRAMIS F., MORETTI A., 1970], per le intercalazioni marnoso-argillose che interessano soprattutto il top della formazione. Le principali manifestazioni sorgentizie del complesso sono rappresentate da sorgenti in quota (dovute all'affioramento della falda in condizioni freatiche nelle zone di alto morfologico) e da sorgenti lineari lungo le incisioni fluviali (legate all'emergenza di acque, lungo fratture tettoniche, in condizioni di semiconfinamento).

b - Complesso idrogeologico della Maiolica

Gli affioramenti della Maiolica ricoprono vaste aree alla sommità dei rilievi, formando ampie "superfici strutturali".

Nella serie completa il contatto idraulico con il sottostante acquifero del Massiccio è impedito dalla presenza di livelli marnosi all'interno delle Formazioni del Bosso e dei Calcari diasprini umbro-marchigiani, mentre nella serie di alto strutturale, la Maiolica, è spesso in connessione idraulica con il sottostante Calcare Massiccio e si ha un unico acquifero che si estende dalle Anidriti di Burano fino alle Marne a fucoidi.

Anche in questo caso l'assorbimento è molto intenso a causa della forte permeabilità secondaria connessa con la grande purezza dei calcari e con la quasi totale assenza di interstratificazioni argillose.

Le manifestazioni sorgentizie più importanti sono quelle di versamento a contatto con l'acquiclude basale, ma anche di trabocco per sbarramento su fianco di anticlinale al contatto con l'acquiclude di tetto; numerose risultano le sorgenti carsiche.

c - Complesso idrogeologico della Scaglia

Tale complesso, formato dai calcari e calcari marnosi della Scaglia Rossa, Scaglia Bianca e del membro superiore delle Marne a fucoidi è caratterizzato da litofacies con permeabilità se-

SCHEMA DEI RAPPORTI STRATIGRAFICO-STRUTTURALI

VALUTAZIONE DELLA PERMEABILITA'

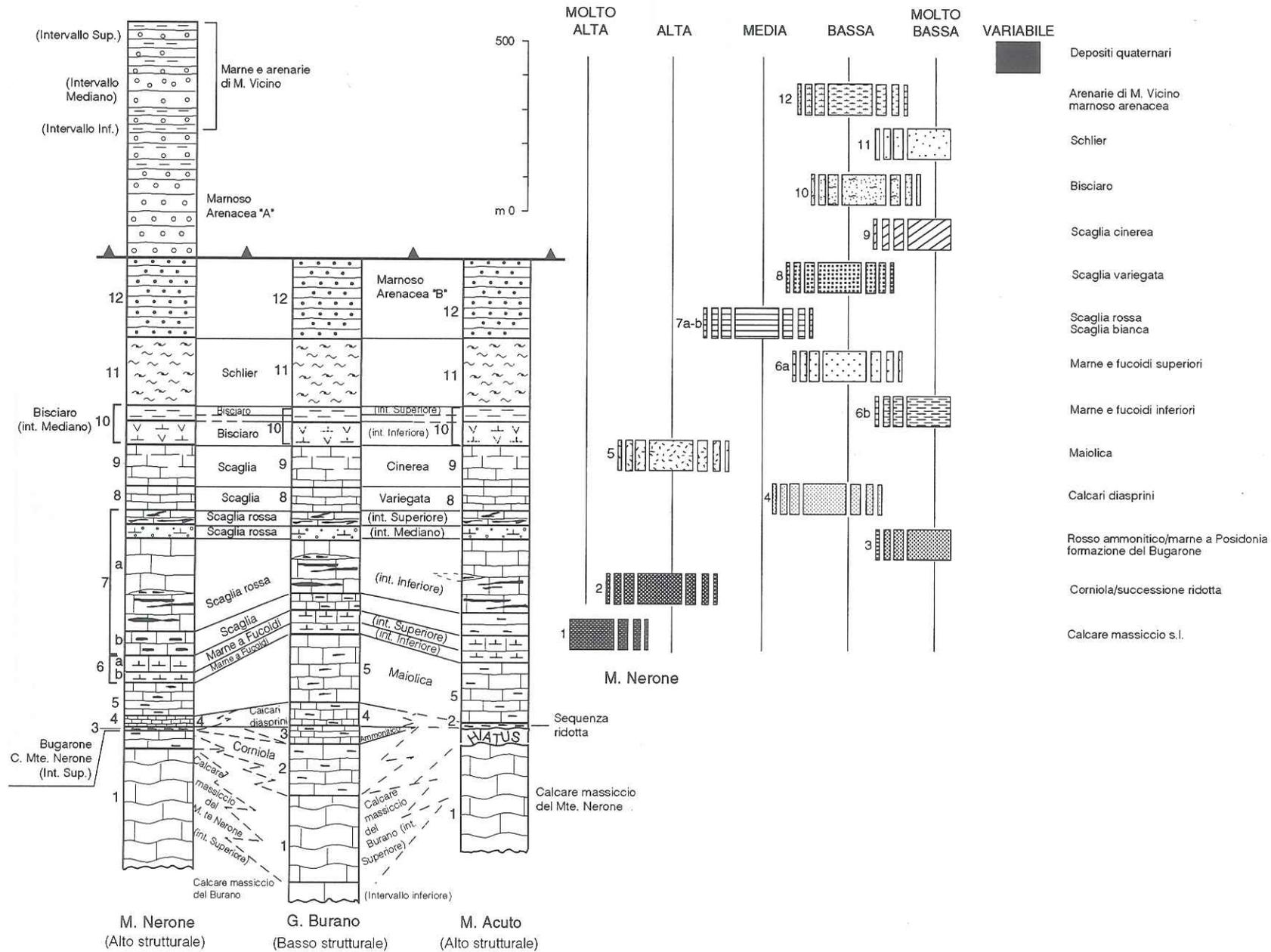


FIGURA 3

condaria dovuta a fratturazione e in parte a fenomeni di natura carsica. Rappresenta l'acquifero arealmente più esteso della zona studiata; esso è compreso tra due acquicludi stratigraficamente continui, di cui l'inferiore (Marne a Fucoidi) affiora frequentemente per erosione e quello superiore (Scaglia cinerea) chiude praticamente tutta la serie carbonatica della dorsale.

A tale unità è legato, perciò, il maggior numero di sorgenti; le più importanti sono quelle di trabocco per sbarramento su fianco di anticlinale al contatto con la Scaglia Cinerea, ma numerose risultano le sorgenti la cui genesi è legata ad altri fattori non strettamente stratigrafici o tettonici, ma dipendenti dalla locale morfologia.

3.1 Carsismo

Il Calcere Massiccio, soprattutto per la sua purezza e per l'intensa e minuta fratturazione, rappresenta una delle rocce maggiormente interessate dai processi carsici ed in esso si sono sviluppate le cavità ipogee più importanti della zona.

Nei calcari stratificati (Maiolica e Scaglia), e con frequenti intercalazioni marnose, l'instaurarsi dei fenomeni carsici è marcatamente legato alla fratturazione della roccia. In entrambi i massicci del Catria e Nerone sono state individuate ed esplorate numerose cavità carsiche con dimensioni che vanno da poche decine di metri a qualche chilometro di sviluppo e alcune centinaia di metri di profondità.

Nome Cavità	Litologia	Ubicazione
Tassare 1°-2°	Calc. Massiccio	M. Nerone
Grotta 5 Laghi	Calc. Massiccio	M. Nerone
Buca d. Diavolo	Corniola	M. Tenetra
Buca Grande	Scaglia Rossa	M. Nerone

Tali cavità, che risultano essere più numerose e significative sul M. Nerone, fanno parte di un carsismo secondario o periferico, rispetto a quello che potrebbe essere il cuore del sistema potenzialmente presente, e che si manifesta a luoghi con fenomeni carsici rilevanti (risorgenza del T. Giordano).

La caratteristica degli ambienti è data dalla presenza di gallerie impostate su fratture e faglie del sistema NO-SE ed in misura minore sui sistemi N-S ed E-O, mentre mancano ambienti di grosse dimensioni.

La circolazione idrica sotterranea rinvenuta nelle varie cavità risulta essere poco significativa, legata direttamente ai fenomeni meteorologici esterni, e si evolve nel tempo parallelamente all'evoluzione geomorfologica subaerea; i piccoli bacini idrici presenti a varie profondità all'interno delle cavità esplorate, possono essere considerati come falde sospese, essendo originati dall'impermeabilizzazione del fondo delle gallerie operata da sedimenti fini, tipo argilla, costituiti dai residui insolubili presenti nelle rocce incassanti.

Solo la Buca del Diavolo permette di raggiungere una falda freatica a quota del F. Burano, sostenuta da livelli a minore permeabilità.

3.2 Monitoraggio idrogeologico ed idrochimico

Il censimento effettuato nella fase preliminare del Progetto ha individuato circa 200 punti d'acqua (174 sorgenti, 8 pozzi e 14 sezioni fluviali), ubicati nei vari complessi precedentemente descritti.

In 30 sorgenti, selezionate con criteri atti a caratterizzare i diversi acquiferi, è stato compiuto un monitoraggio mensile della portata e dei principali parametri chimico-fisici (temperatura, conducibilità elettrica specifica e pH), protrattosi per un intero anno idrologico (Gennaio '91-Febbraio '92).

È stato inoltre eseguito un monitoraggio idrochimico che ha previsto:

- Campagne idrochimiche (con analisi dei fondamentali elementi: Ca, Mg, Na, K, Cl, SO₄, HCO₃, CO₃, NO₃) su 50 punti d'acqua nei periodi di morbida (Maggio '91) e di magra (Ottobre '91).
- 4 Campagne idrochimiche su 5 punti d'acqua ubicati nelle cavità carsiche precedentemente descritte.
- 1 Campagna idrochimica su 4 sorgenti inaccessibili senza mezzi speciali ed individuate tramite ispezione aerea.
- 2 Campionamenti per analisi isotopiche su 25 punti della rete di monitoraggio idrochimico e campionamenti per analisi isotopiche mensili su 5 stazioni di rilevamento termopluviometrico.

I risultati ottenuti, dall'analisi delle portate delle sorgenti e dalle misurazioni dei principali parametri chimico-fisici, hanno permesso di completare il quadro di informazioni necessarie alla caratterizzazione dello schema idrogeologico della dorsale in studio.

Per quanto riguarda le acque dei complessi idrogeologici di Scaglia e Maiolica si possono trarre le seguenti considerazioni:

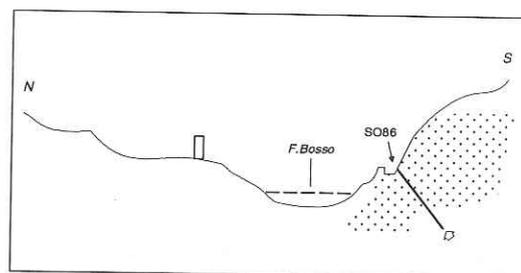
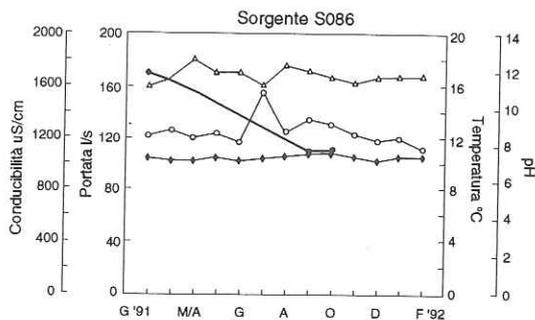
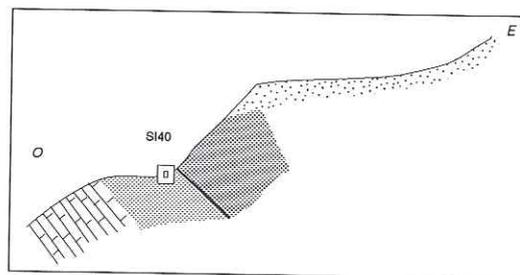
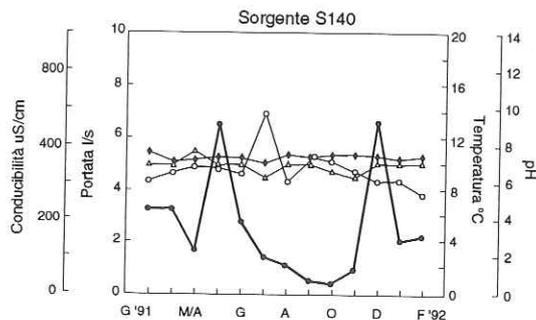
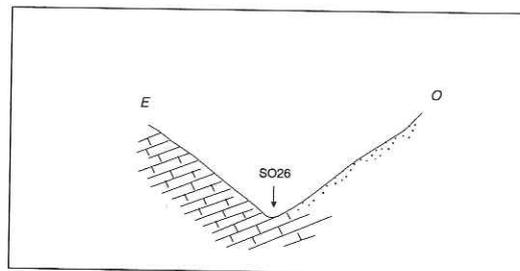
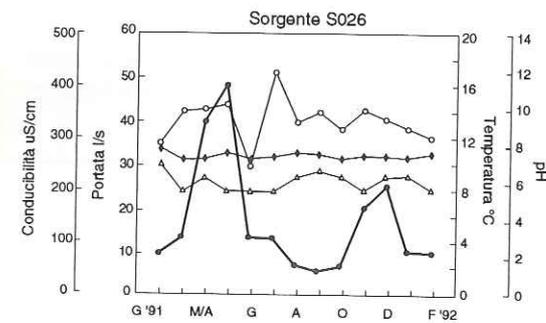
1. Le acque della Scaglia e della Maiolica presentano caratteristiche molto simili, differenziandosi nettamente, dal punto di vista idraulico ed idrochimico, da quelle del Complesso del Massiccio/Corniola.
- 2. L'andamento delle portate ha evidenziato un tipo di regime caratterizzato da due massimi e due minimi, con un classico andamento bimodale (Fig. 4) che rimarca, con sfasamenti più o meno evidenti nel tempo, quello delle precipitazioni. Le portate, generalmente perenni, mostrano una forte variabilità con valori minimi inferiori a 10 l/s e massimi di circa 40-50 l/s; le sorgenti della Maiolica monitorate presentano valori minimi in genere superiori a quelli registrati nelle sorgenti della Scaglia.
- 3. Le curve di esaurimento teoriche hanno fornito valori del coefficiente di esaurimento di Maillet variabile da 10⁻³ a 10⁻², permettendo di caratterizzare per le varie emergenze i quantitativi di acqua di immagazzinamento dinamico e la capacità di svuotamento in periodo di esaurimento.
- 4. La variazione stagionale dei parametri misurati è presente in tutte le emergenze, ma è notevolmente attenuata in quelle con bacini di alimentazione più estesi e, quindi, volumi d'acqua d'immagazzinamento sufficienti ad attenuare gli effetti dovuti ad una rapida circolazione.
- 5. La facies idrochimica delle acque dei due complessi è praticamente indistinguibile, caratterizzandosi come bicarbonato-calcica (diagramma di Piper, Fig. 5); alla stessa

famiglia appartengono le acque delle cavità carsiche e quelle delle sorgenti emergenti dal Massiccio, ma legate ad una circolazione rapida (zone di alto morfologico).

Da quanto esposto risulta evidente che il tipo di circolazione idrica nei Complessi della Scaglia e della Maiolica è caratterizzato da acque a limitata percorrenza e a breve permanenza nel sottosuolo, anche se dagli idrogrammi di magra è possibile in realtà distinguere due tipi di circolazione, una legata al rapido svuotamento del serbatoio contenente la falda (esaurimento rapido - tratto più acclive della curva) ed un'altra caratterizzata da un flusso di fondo (esaurimento lento - tratto meno acclive della curva), dovuto ad uno svuotamento delle microfessure e dei meati di piccole dimensioni.

Per quanto riguarda l'acquifero profondo del complesso idrogeologico Massiccio/Corniola si possono schematizzare i seguenti risultati:

1. L'acquifero in oggetto, caratterizzato da una elevatissima ricettività idrica, è alimentato direttamente dalle precipitazioni meteoriche che si verificano in corrispondenza dei suoi affioramenti situati nelle zone di alto morfologico (M. Nerone, M. Catria e M. Acuto).
2. In virtù della variabilità dell'assetto morfo-strutturale, tale acquifero si presenta in condizioni di falda libera in corrispondenza delle aree di alimentazione, passando poi a condizioni di falda in pressione per la presenza dell'acquicludde stratigraficamente soprastante.
3. Le sorgenti emergenti nelle aree di alto morfologico, presentano, caratteristiche idrodinamiche e idrochimiche del tutto analoghe a quelle dei complessi superiori. Generalmente le maggiori manifestazioni sorgentizie del Complesso sono ubicate a quote relativamente basse, emergendo direttamente negli alvei fluviali ed originando sorgenti lineari distribuite



● Portata ○ Conducibilità elettrica
 ▲ Temperatura ◆ pH

[Pattern] Detrito [Pattern] Marne e Fucoidi [Pattern] Corniola
 [Pattern] Scaglia rossa [Pattern] Maiolica

FIGURA 4

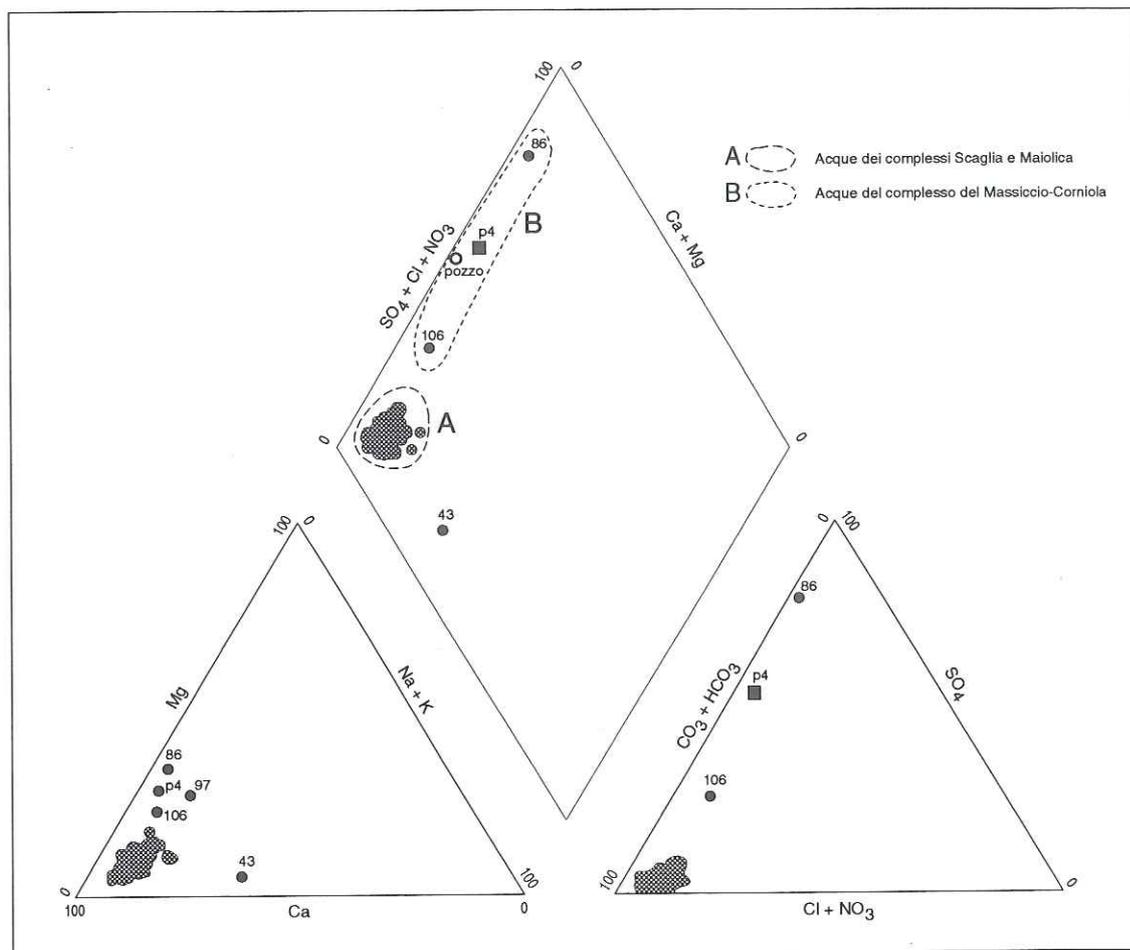


FIG. 5 - Diagramma di Piper

- lungo i tratti di fiume che tagliano la dorsale carbonatica. Classico esempio è la sorgente S. Nicolò (S86), ubicata lungo il F. Bosso ed affiorante per motivi tettonici dai calcari della Corniola, la cui portata di magra è superiore a 100 l/s; tale emergenza rappresenta il termine di circolazione più profonda, con temperature delle acque variabili da 16 a 18 °C e valori di conducibilità medi superiori a 1200 uS/cm.
4. Le acque di questa emergenza si caratterizzano per gli alti valori di solfati e magnesio (famiglia di appartenenza la bicarbonato - solfato - calcica), superiori a tutti i valori misurati; questi parametri sono indicativi di una circolazione profonda e liscivazione delle Anidriti di Burano, e di una rapida risalita delle acque.
 5. L'acqua del pozzo Cagli 1 (perforato da Aquater), rappresentativa della falda in pressione del Massiccio, presenta una composizione compresa fra quella della sorgente S86 e quella della sorgente S106, ed è caratteristica di un circuito lungo e profondo e con flusso in pressione.
 6. La variazione stagionale dei parametri misurati nelle acque appartenenti ai circuiti più profondi, è molto attenuata, a dimostrazione di un tipo di circolazione lenta e a maggior tempi di contatto acque/roccia serbatoio.
 7. Le acque del Complesso del Massiccio/Corniola danno ori-

gine, perciò, a due tipi di circolazione:

- una a causa della fratturazione e dei fenomeni carsici riemerge in superficie dopo un breve circuito poco mineralizzata (S75), ed in particolare quasi priva di SO_4 , perciò indistinguibile da acque con analoghi circuiti, ma appartenenti a complessi idrogeologici superiori;
- un'altra compie un circuito più lungo e profondo e perciò risulta più mineralizzata in Mg e SO_4 (maggior tempo di contatto fra acqua e roccia serbatoio); valori estremi si hanno nel caso di acque che abbiano subito un contatto con le Anidriti di Burano (S86).

Il regime di deflusso più profondo del Massiccio è caratteristico, perciò, di acque a lunga percorrenza e prolungata permanenza nel sottosuolo.

Logicamente si osservano sovrapposizioni dei due regimi (dovuti ad una miscelazione delle acque dei due cicli), che si possono considerare come casi estremi (S106).

3.3 Analisi isotopiche

Le analisi isotopiche eseguite sulle acque sotterranee e su quelle meteoriche, si riferiscono al contenuto in Deuterio (D), Ossigeno 18 e Tritio.

- sono stati prelevati mensilmente 25 campioni di acque meteoriche da 5 stazioni della rete pluviometrica, ubicate a quote crescenti tra 275 m e 1085 m s.l.m.;
- sono state eseguite inoltre due campagne di campionamento per le acque sotterranee (Maggio '91 e Ottobre '91) su 25 punti d'acqua, per un totale di 50 campionamenti;
- il contenuto in Tritio è stato analizzato su tutti i campioni di acqua meteorica, mentre nelle acque sotterranee è stata eseguita l'analisi su 5 campioni per ogni campagna isotopica.

Ossigeno 18 e Deuterio

Dai dati ottenuti dall'analisi delle acque di precipitazione si ottiene un gradiente medio di $-0.106 \delta \text{‰}$ per 100 m.

Alla luce di questo dato il pozzo P4 (Acquedotto di Cagli) e il pozzo Cagli I (Aquater), ubicati lungo l'incisione valliva del T. Burano risultano avere una quota media di ricarica di 1400 m sul livello del mare. Tale quota limita l'area di alimentazione dell'acquifero profondo alle aree più elevate, corrispondenti agli affioramenti del Calcere Massiccio negli alti morfologici del Catria e Nerone.

Un analogo calcolo effettuato con il Deuterio, ha indicato invece una quota media di ricarica di 1000 m; questa seconda possibilità estenderebbe in modo significativo l'area disponibile per la ricarica del sistema acquifero profondo.

Tritio

La sua determinazione risulta utile per la valutazione del tempo di residenza delle acque in acquiferi caratterizzati da una ricarica attuale/recente o subrecente.

Nelle acque meteoriche campionate sulle 5 stazioni meteo dell'area sono stati rilevati valori variabili da 4.5 a 9 U.T., mentre i campioni di acqua sotterranea presentano valori compresi tra 10 e 20 U.T.. L'età media delle acque sotterranee risulta di circa 15 anni (complesso Corniola-Massiccio), a conferma dell'appartenenza di queste acque a circuiti lunghi e profondi. Per alcune sorgenti appartenenti ai complessi superiori (Scaglia e Maiolica), questo crono-indicatore ha fornito un'età di circa 10 anni.

4. IDROLOGIA

4.1 Analisi climatologica

Sono stati elaborati i dati di 8 stazioni termopluviometriche, ricercando le relazioni esistenti tra la temperatura ed i principali parametri geografici. Vista la limitata estensione dell'area in esame, le variazioni in funzione della latitudine, della longitudine e della distanza dal mare risultano ininfluenti. Decisamente più significativa è la variazione in funzione della quota che può essere espressa dalla relazione:

$$\Delta T = aH + C'$$

dove $a = \frac{\Delta T}{\Delta H}$ è il gradiente termico verticale pari a $0.43(0.01 \pm 0.01) \text{ °C/m}$.

Per ciò che concerne le precipitazioni, studi a scala locale hanno evidenziato che le precipitazioni sono maggiori nel versante interno (Scheggia, Cantiano), che in quello adriatico (Frontone, Fonte Avellana), nella stagione invernale e primaverile, mentre non vi sono differenze significative nella stagione estiva ed autunnale. È stata effettuata un'analisi statistica per verificare l'omogeneità dell'area dal punto di vista pluviometrico, utilizzando il metodo del coefficiente di variazione della precipitazione annua (C.V.), pari al rapporto tra lo scarto quadratico medio e la media dei valori annui delle altezze di precipitazione. Tale metodologia [ROSSI F., VERSACE P. 1982] è basata sull'ipotesi che le altezze di pioggia annua che si verificano in un punto siano strettamente correlate con quelle che si verificano in un'area più o meno estesa all'intorno di esso, per cui si può ritenere che quelle che si verificano nei singoli punti della regione varino da anno ad anno, raggiungendo in ogni singolo anno valori che nel passare da punto a punto rappresentano sempre la stessa percentuale della piovosità media annua. Tale ipotesi è stata quindi verificata controllando che, nel 95% dei casi, il valore del coefficiente di variazione calcolato per ogni singola stazione ricadesse all'interno della fascia di confidenza stimata.

È stata calcolata la seguente relazione altitudine-precipitazione:

$$P = 1039 + 0.655 h$$

P = precipitazione media annua (m)

h = quota (m s.l.m.).

4.2 Calcolo del coefficiente di deflusso

Il coefficiente di deflusso (Cd) è stato valutato utilizzando il metodo di Kennessey su basi climatico fisiografiche, vista l'inapplicabilità del metodo di Thonhwaite dovuta alla presenza di acquiferi carbonatici. Il suo valore è determinato dalla somma di tre contributi legati alla permeabilità del terreno, all'acclività, alla copertura vegetale e variabili in funzione dell'Indice di aridità di De Martonne. È evidente che essendo stimato in funzione di fattori fisiografici "superficiali" non può in alcun modo tener conto dell'azione svolta dalla struttura idrogeologica sotterranea, che invece gioca un ruolo fondamentale, soprattutto nel caso di bacini carbonatici permeabili.

Da studi condotti sull'applicazione del metodo di Kennessey in questo tipo di bacini [TARDI A., VITTORINI S., 1977] e verificati attraverso misure idrometriche, risulta una buona corrispondenza tra i valori dei coefficienti di deflusso misurati e quelli determinati con il metodo stesso. Ne viene invece messa in discussione l'applicabilità per la determinazione dell'infiltrazione efficace, risultando una forte sottostima di tale parametro rispetto alla discarica sorgiva effettivamente misurata. Il coefficiente di deflusso calcolato con tale metodo deve essere inteso come deflusso totale. Esso risulterebbe uguale a quello misurato solo nel caso di bacini chiusi, ossia ove si verifici una totale restituzione dell'afflusso efficace al deflusso. Nei sistemi aperti il metodo tende a sovrastimare il coefficiente di deflusso ed a sottostimare la ricarica media delle falde.

Per superare tali problematiche si è adottato il modello pro-

posto da Farina [FARINA D.] che rianalizza il fenomeno dell'infiltrazione nelle aree di alimentazione, come risultato di due componenti: una diretta, derivante dalla infiltrazione efficace delle acque meteoriche, ed una indiretta dovuta all'infiltrazione delle acque di ruscellamento in corrivazione. Esso conduce ad un uguale valore del deflusso superficiale totale e del coefficiente di deflusso, ma il deflusso viene ripartito in maniera diversa tra infiltrazione efficace e ruscellamento superficiale, con un notevole aumento della prima.

L'area di progetto è stata scissa in due zone, interna e costiera, ognuna ulteriormente suddivisa in fasce altimetriche. Per ogni area è stato valutato il coefficiente di deflusso sommando i contributi legati alla permeabilità del terreno, all'acclività, alla copertura vegetale.

Per esprimere il processo di corrivazione e di infiltrazione nelle aree di alimentazione è sufficiente un sistema di quattro equazioni:

$$\begin{aligned} I_i &= I_{dir} \\ R_i &= P_e - I_{dir} \\ I_{i+1} &= I_i + \alpha R_i \\ R_{i+1} &= R_i + (1-\alpha) R_i \end{aligned}$$

Le prime due equazioni esprimono le condizioni iniziali che caratterizzano le aree a quote più elevate, I_{dir} rappresenta l'infiltrazione efficace nella sola componente diretta, R_i il ruscellamento "proprio" dato dalla differenza tra la precipitazione efficace P_e e l'infiltrazione diretta I_{dir} .

La terza equazione esprime l'infiltrazione efficace totale come somma della componente diretta I_{dir} ed indiretta αR_i nelle successive aree i -esime poste a valle; α è appunto il coefficiente sperimentale che stabilisce la percentuale del ruscellamento proveniente dall'area a monte che si filtra nell'area a valle $i+1$; il suo valore varia tra 0 e 1. La quarta equazione stabilisce la somma del ruscellamento proprio e di quello residuo, da monte, che si registra nell'area $i+1$.

4.3 Bilancio idrologico

Per il calcolo del bilancio idrologico è stata utilizzata la procedura proposta da Thornthwaite-Mather. Il territorio in esame è stato suddiviso in due zone (Zona A e Zona B) caratterizzati rispettivamente il settore orientale ed occidentale della dorsale e in fasce altimetriche, per ciascuna delle quali è stato calcolato il valore delle precipitazioni, delle temperature medie mensili e dell'evapotraspirazione potenziale e reale.

Applicando i parametri ottenuti alla formula:

$$P = E_r + D_p$$

dove ($D_p = I_p + R_p$) rappresenta il deflusso idrico globale, è possibile quantificare le varie grandezze in esame.

Per ottenere i due parametri (I_p e R_p) sono state utilizzate due diverse metodologie.

Una prima metodologia, applicata a tutta l'area (250 km²), è basata sul metodo di Kennessey.

Questo metodo ha permesso di calcolare il deflusso idrico su-

perficiale tenendo conto dei parametri naturali che lo condizionano: clima, permeabilità dei terreni, acclività e copertura vegetale.

Una seconda metodologia si è basata sull'utilizzo dei valori del c.i.p. (coefficiente d'infiltrazione potenziale) espresso in % per ogni formazione litologica; tale dato rappresenta la percentuale di deflusso che si filtra nel sottosuolo.

Attraverso diversi passaggi, che hanno portato a calcolare il c.i.p. relativo ad ogni fascia altimetrica, in base alla percentuale di litologia affiorante, si è giunti ad ottenere il bilancio idrologico dell'intera area in esame (250 km²).

Data l'uniformità dei dati ottenuti con i due metodi, si è effettuato il bilancio sia per la struttura carbonatica M. Catria - M. Nerone, sia quello relativo alle sole zone ritenute fonte di alimentazione diretta dell'acquifero profondo.

I risultati ottenuti per la sola struttura carbonatica del Catria-Nerone (115 km²), hanno fornito valori dell'infiltrazione efficace di 666.7 mm/a pari al 42% delle precipitazioni; tale valore corrisponde ad una portata di circa 2.43 m³/s, per un'alimentazione specifica pari a circa 21 l/s km².

Il bilancio idrologico relativo invece alle sole zone di affioramento del Calcere Massiccio, nell'area del M. Catria, M. Acuto, M. Nerone (totale 15.3 km²), dove si è ipotizzato si abbia la ricarica dell'acquifero profondo, ha dato valori di infiltrazione efficace pari al 60% delle precipitazioni; per tale zona è stata calcolata una portata di 0.513 m³/s, pari ad un'alimentazione specifica di 33.5 l/s km² che ben si accorda con i valori d'infiltrazione efficace forniti da BONI per le aree di piattaforma carbonatica (25-38 l/s km²).

Per avere una stima di larga massima delle risorse effettivamente disponibili riferite alla struttura M. Catria-M. Nerone (area di 115 km²), alle portate sopra descritte devono essere sottratte le quantità effettivamente in uscita che sono:

1. Le rese in alveo e le sorgenti direttamente insistenti sui corsi d'acqua interni (Biscubio, Bosso, Burano, Cinisco, Sentino), che da misure eseguite su sezioni in ingresso ed in uscita della serie e dai dati rilevati in corrispondenza degli strumenti misuratori di livello ad ultrasuoni, ammontano a circa 1.1 m³/s.
2. Le sorgenti che, presenti nell'area di 115 km² vengono captate per usi diversi, per una portata complessiva stimata di circa 0.3 m³/s. Sommando i due valori si ottiene un totale di circa 1.4 m³/s che, sottratto ai 2.43 m³/s che costituiscono la portata di infiltrazione, indica per l'area in oggetto una potenzialità residua di circa 1.03 m³/s.

Secondo la convenzione indicata dal mondo accademico e da Enti di Controllo è possibile emungere il 30/40 % della risorsa potenzialmente disponibile senza creare squilibri e ciò, per l'area in oggetto, determina una portata di circa 0.34 m³/s disponibile per l'emungimento.

Considerando che tali calcoli si basano in realtà su dati aventi serie temporali diverse (pluriennali per le precipitazioni ed annuali per le misure di portata su sezioni fluviali e sorgenti), i valori espressi debbono essere considerati come puramente estimativi e da confermare con osservazioni sul lungo periodo. Da quanto sopra esposto si evince comunque che nell'area indagata le risorse idriche sotterranee sono senza dubbio notevoli, sia quantitativamente che qualitativamente, e che i pro-

grammati $0.03 \text{ m}^3/\text{s}$ necessari per il ripristino qualitativo dell'approvvigionamento idropotabile di alcuni centri urbani ubicati nella zona, possono essere senza dubbio allontanati dal pozzo Cagli 1 senza timori di creare squilibri idrogeologici.

Per prelievi di maggiore entità si ritiene invece necessario prolungare nel tempo (di norma per almeno 3-5 anni), le attività di monitoraggio ed osservazione idrologica ed idrogeologica per poter avere, anche con ulteriori prove di emungimento sul lungo periodo dal pozzo Cagli 1, dati reali sulle capacità produttive dell'acquifero.

5. PERFORAZIONE POZZO "CAGLI 1"

Il programma di studio prevedeva, al compimento della campagna geofisica e previa definizione preliminare dello schema idrogeologico, la realizzazione di un pozzo sperimentale, eseguito a rotazione con distruzione di nucleo.

Il pozzo, spinto fino ad una profondità di 262.5 m, ha dimostrato, caratteri propri che hanno superato le previsioni iniziali (basate su precedenti perforazioni AGIP), avendo rinvenuto portate ben superiori a quanto noto e a profondità molto minori di quelle conosciute. La perforazione ha messo in evidenza l'esistenza di un acquifero di tipo artesianico in cui la portata d'acqua nel pozzo aumenta proporzionalmente alla profondità; tali aumenti si sono manifestati sia in maniera costante, lenta e progressiva, sia con incrementi istantanei cospicui e puntuali verificatisi a quote ben precise, con l'intersezione di fratture del Massiccio.

A tale incremento ha corrisposto un aumento delle pressioni, misurate a bocca pozzo, che mostrano chiaramente valori bassi (3-6 atm.) fino a circa 86 m di profondità (fratture completamente chiuse), valori intorno a 10 atm. da 86 m fino a 124 m (fratture in parte ricementate) e valori di 22 atm. da 124 m fino a fondo pozzo (fratture beanti, completamente aperte). La ricementazione delle fratture, evidenziata anche dai cutting di perforazione che mostrano incrostazioni e concrescimenti di minerali secondari, è caratteristica di un chiaro processo di precipitazione dei carbonati, di cui sono ricche le acque circolanti in formazioni calcaree; i fenomeni di ricementazione risultano evidenti fino a 120-130 m di profondità, mentre risultano assenti da tale profondità fino a fondo pozzo.

Questo è legato al fatto che la minore pressione, provoca la progressiva chiusura delle fratture, riducendo la luce utile al passaggio dell'acqua (fenomeno di self sealing). La temperatura delle acque si è mantenuta costantemente intorno a valori di $11 \text{ }^\circ\text{C}$. L'acquifero in questione è caratterizzato da un tipo di circolazione idrica in pressione, che avviene attraverso fratture e canali; la permeabilità del sistema aumenta progressivamente con la profondità (è possibile distinguere 3 diverse stratificazioni idrauliche), dove i meati entro cui si muove l'acqua risultano sufficientemente grandi da non indurre forti perdite di carico.

5.1 Prove di portata

In aggiunta alle prove di portata eseguite durante tutto il periodo della perforazione, mirate a misurare in tempo reale l'in-

cremento delle venute d'acqua, sono state eseguite due prove di portata a gradini, che hanno permesso di determinare le caratteristiche idrauliche del pozzo e del suo intorno.

1° prova di portata

È stata eseguita una prova a gradini crescenti di portata (da 50 l/s fino a 400 l/s) che si è protratta dall'08/04/92 al 16/04/92; durante la prova sono stati tenuti sotto osservazione tutti i punti della rete di monitoraggio strumentale automatico, ed altri punti d'acqua significativi, compreso il pozzo dell'acquedotto di Cagli (P4) ubicato a circa 300 m dal pozzo in esame e funzionante come piezometro di osservazione. Il controllo della rete strumentale nel corso dello svolgimento della prova ha permesso di escludere qualsiasi influenza, in fase di emungimento del pozzo e sul breve e medio termine, sia sulle portate delle sorgenti, sia a livello di osservazione microsismica.

Sulla base delle elaborazioni eseguite utilizzando appositi programmi di elaborazione e formule classiche dell'idrogeologia (Jacob, Theis), è stata ricavata per l'acquifero una trasmissività (T) pari a $1.7 \times 10^{-2} \text{ m}^2/\text{s}$.

2° prova di portata

Dopo circa 1 mese dalla prima è stata eseguita una seconda prova di portata a gradini, per un totale di 8 gradini e portate comprese tra 66 e 415 l/s , i cui dati elaborati permettono di assegnare al pozzo una portata critica di 450 l/s ed una portata ottimale di 415 l/s .

6. MONITORAGGIO STRUMENTALE

Nel corso dell'esecuzione dello studio, è stata installata una rete di monitoraggio strumentale, automatica e con teletrasmissione dei dati, finalizzata al controllo dei principali parametri idrologici-idrogeologici della zona.

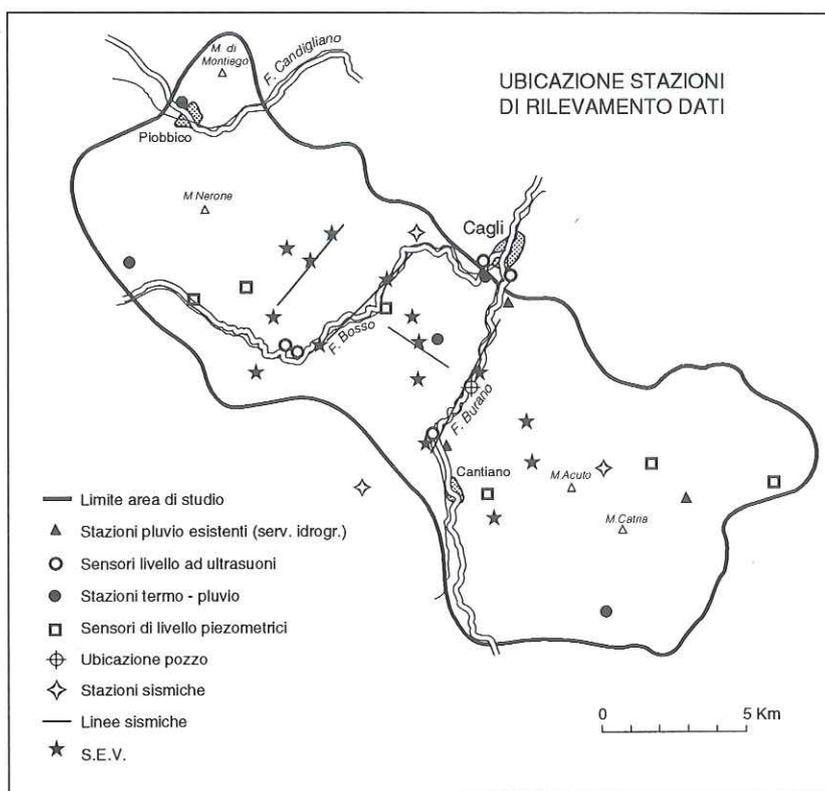
La rete risulta composta quindi da 19 stazioni di misura, così schematizzabili (Fig. 6):

- 5 stazioni termo-pluviometriche per la misura di piogge e temperature e per il campionamento delle acque meteoriche;
- 5 stazioni ad ultrasuoni per la misura dei livelli dei fiumi Bosso, Burano e del Torrente Giordano, in sezioni fluviali opportunamente tarate;
- 6 stazioni piezometriche sulle sorgenti principali scelte nell'area, per la misura dei livelli e delle portate, attrezzate con misuratori automatici e taratura delle sezioni;
- 3 stazioni microsismiche installate su punti aventi come baricentro il pozzo, per rilevare sia in fase di perforazione che durante l'esercizio dello stesso, eventuali interferenze con la struttura geologica dell'area.

Ogni stazione misura in continuo i valori assegnati e trasmette i dati, direttamente ad una centrale di elaborazione ubicata nel Comune di Cagli, mediante linea telefonica commutata.

Le tre stazioni microsismiche, non potendo essere collegate direttamente nella rete automatica, acquisiscono in continuo i dati relativi all'attività sismica e microsismica della zona e questi vengono quindi opportunamente trasferiti su computer porta-

FIG. 6 - Ubicazione stazioni di rilevamento dati



tile appositamente dedicato, in cui Aquater ha sviluppato un sofisticato programma di gestione e visualizzazione dati. Mediante un secondo calcolatore tutti i dati raccolti vengono elaborati ed inseriti nella Banca Dati di Progetto, sviluppata mediante software originale Aquater.

Nella Banca Dati sono informatizzate tutte le schede dei punti d'acqua censiti, le misure periodiche eseguite sui punti della rete di monitoraggio mensile e semestrale, i risultati analitici relativi alle campagne idrochimiche svolte e le schede degli strumenti installati.

Il modulo Data Base del Progetto è interattivo con un modulo grafico sul quale sono stati digitalizzati i caratteri distintivi dell'area oggetto di studio (Limiti provinciali, comunali, idrografia, quote, monti, centri abitati), ed in cui sono riportati tutti i punti di monitoraggio, di censimento, strumenti e sezioni fluviali di misura.

La struttura della rete di monitoraggio strumentale installata, la sua configurazione e caratteristiche e le capacità di acquisizione ed elaborazione dei dati via software predisposto, permettono il controllo continuo del territorio con particolare riferimento ai caratteri idrologici, idrogeologici e sismici e costituisce quindi un sofisticato e moderno mezzo di gestione del territorio, valutandone in tempo pressoché reale eventuali squilibri o situazioni critiche (livelli minimi di sorgenti captate ad uso potabile, piene fluviali, attività sismica).

7. CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

L'articolazione dell'intero studio ha permesso di valutare con

buona approssimazione, sia in termini di qualità che di quantità, le risorse idriche presenti nella dorsale carbonatica M. Catria-M. Nerone.

L'attendibilità dei risultati ottenuti è stata assicurata dal concorso di diversi fattori positivi:

approfondito esame della situazione geologica-idrogeologica dell'area;

— buona qualità dei dati acquisiti dal monitoraggio strumentale continuo e dalle misure di campo;

— accurata analisi idrochimica ed isotopica che ha consentito di caratterizzare qualitativamente le acque sotterranee e di chiarire i legami fra chimica delle acque e contesto idrogeologico;

— misura delle portate fluviali in sezioni significative che ha permesso di quantificare i quantitativi di acqua superficiale in entrata ed in uscita dalla dorsale carbonatica;

— perforazione del pozzo che ha permesso di definire i caratteri della circolazione idrica profonda dell'acquifero di base.

L'aver coperto praticamente tutti gli aspetti geologici ed idrogeologici della struttura carbonatica del M. Catria-M. Nerone consente di avere per l'area in oggetto una fotografia aggiornata, di estremo dettaglio e completa che permette di caratterizzare le risorse idriche sotterranee.

La dorsale carbonatica rappresenta una struttura idrogeologica geometricamente ben definita, risultando idraulicamente tamponata nel settore orientale da un fronte di sovrascorrimento continuo, nel settore occidentale da terreni a permeabilità ridotta, nel settore settentrionale dalla depressione assiale della struttura e nel settore meridionale da linee tettoniche trasversali e dall'incisione del F. Sentino. Tale compartimentazione

idraulica fa presupporre, a livello di circolazione idrica profonda, una direzione principale di deflusso idrico in senso longitudinale alla dorsale (direzione appenninica), con aree di ricarica (come dimostrato anche dalle analisi isotopiche) nelle zone di alto morfologico del M. Nerone, M. Acuto e M. Catria (aree di culminazione assiale) e zone di scarica lungo le principali incisioni fluviali (depressione assiale), che rappresentano, anche, il livello di base degli acquiferi carbonatici. Logicamente non possono escludersi eventuali drenaggi verso strutture limitrofe, soprattutto nel settore meridionale della dorsale studiata. È risultata evidente, al contrario, la netta separazione fra acquifero di base (Massiccio/Corniola) ed acquiferi superiori (Scaglia e Maiolica), dimostrato oltre che dalla stratigrafia delle litofacies affioranti, da differenze idrochimiche ed idrodinamiche delle acque delle sorgenti monitorate. Solo nelle aree di alto morfologico, caratterizzate da successioni stratigrafiche condensate o lacunose, è possibile avere una continuità idraulica fra acquifero basale ed acquifero della Maiolica. Tale separazione idraulica è ben evidenziabile, anche, dai risultati ottenuti nel corso delle prove di portata sul pozzo perforato e dal contemporaneo controllo della rete di monitoraggio strumentale.

Infatti, tale controllo ha permesso di escludere, durante l'emungimento, qualsiasi influenza sia sulla portata delle sorgenti che a livello di osservazione microsismica; tale dato, atteso per le sorgenti dei complessi di Scaglia e Maiolica, è risultato valido anche per le sorgenti del complesso del Massiccio/Corniola monitorate in quota (S75), a dimostrazione di volumi d'acqua considerevoli presenti nell'acquifero basale.

In effetti, il bilancio idrologico ha permesso di quantizzare per la sola dorsale carbonatica (115 km²) M. Catria-M. Nerone, una risorsa idrica naturale pari a 76.6x10⁶ m³/a (2.3 m³/s), una potenzialità residua di circa 32x10⁶ m³/a ed una risorsa potenzialmente fruibile di 10.7x10⁶ m³/a (0.34 m³/s).

Tali volumi, senza dubbio considerevoli, permettono di affermare che i previsti 0.03 m³/s (0.9x10⁶ m³/a) necessari al ripristino qualitativo per l'approvvigionamento idrico di alcuni centri abitati della zona, possono essere allontanati dal pozzo, senza timore di creare squilibri idrogeologici nel sistema.

Ulteriori prove di portata sul pozzo e la continua acquisizione ed elaborazione dei dati provenienti dalla rete di monitoraggio installata permetteranno di verificare nel tempo l'evoluzione quantitativa delle risorse idriche sotterranee e di ottimizzarne la gestione, con la possibilità di coniugare al meglio il rispetto per l'ambiente e le esigenze idropotabili della dorsale in esame.

BIBLIOGRAFIA

- BONI C., BONO P., CAPELLI G. (1986): "Schema idrogeologico dell'Italia centrale", *Mem. Soc. Geol. It.*, 35, 991-1012, 2 Tavv., Roma.
- CENTAMORE E, VALLETTA (1976): IDROTECNECO spa (ENI), *Carta idrogeologica (1:50000) Foglio 291-Pergola*. Servizio Geologico d'Italia, Roma.
- DEIANA G., DRAMIS F., MORETTI A. (1970): "Condizioni idrogeologiche delle formazioni mesozoiche e paleogeniche dell'Appennino marchigiano". *Atti Conv. Int. Acque Sotterranee*, E.S.A., Palermo.
- FARINA D. (1990): "Indagini applicative del metodo di Kennessy per la determinazione del coefficiente di deflusso e della infiltrazione efficace nei massicci carbonatici". *7° Congresso Nazionale Ordine dei Geologi, Roma, 27 ottobre '90*
- FONTES J. Ch., ZUPPI G.M., (1976): "Isotopes and water chemistry in sulphide-bearing springs of Central Italy". *Interpretation of environmental and hydrochemical hydrology*, pp. 143-158, IAEA Vienna.
- NANNI T., (1991): "Caratteri idrogeologici delle Marche", *L'Ambiente fisico delle Marche*, Regione Marche.
- ROSSI F., VERSACE P. (1982). "Criteri e metodi per l'analisi statistica delle piene". *C.N.R., Pubblicazione n° 165, Valutazione delle piene*.
- TARDI A., VITTORINI S. (1977). "Il calcolo del coefficiente di deflusso su basi fisiografiche". *Boll. degli Ing. Firenze*, 4, 5-14.