

CARATTERIZZAZIONE IDROGEOLOGICA ED IDROCHIMICA DELLE ACQUE SUPERFICIALI E SOTTERRANEE DEI GESSI E DELLA CAVA DI MONTE TONDO: INFLUENZE DEI PROCESSI ESTRATTIVI SULLA QUALITÀ DELLE ACQUE

ROBERTO MARGUTTI¹, IRENE ZEMBO²

Riassunto

La comunità speleologica internazionale ha riconosciuto l'area di Monte Tondo e, in particolare, il sistema carsico di Re Tiberio, come una delle grotte di gesso più lunghe in Italia. Allo scopo di identificare i processi di interazione tra attività estrattiva e idroambiente, facendo particolare attenzione alla salvaguardia dei sistemi carsici e ai rischi di inquinamento delle acque superficiali e sotterranee, è stato intrapreso uno studio idrogeologico e idrochimico di dettaglio dell'area di cava. Rilievi sul campo hanno supportato la caratterizzazione geologico strutturale del soprasuolo e del sotterraneo, la caratterizzazione morfologica e ipogea di fenomeni carsici e la definizione di un nuovo modello idrogeologico e idrochimico di Monte Tondo. La realizzazione di indagini dirette in sito, attraverso l'esecuzione di 5 sondaggi a carotaggio continuo, e l'installazione di piezometri sia in area estrattiva che nel territorio limitrofo in ambiente gessifero, ha consentito di integrare le informazioni esistenti sulla soggiacenza e portata delle acque sotterranee e di monitorare mensilmente per un anno i parametri chimico fisici (pH, temperatura, conducibilità elettrica, potenziale redox) delle acque direttamente *in situ*. I sistemi carsici e le gallerie di cava, rappresentando una finestra naturale delle condizioni idriche ipogee, sono stati oggetto di attività di esplorazione speleologica. Questa fase del lavoro ha consentito di determinare il rapporto tra carsismo, idrografia superficiale, punti di drenaggio e zone di alimentazione dei sistemi carsici e, in generale, delle acque sotterranee. I parametri idraulici sono stati ottenuti attraverso l'esecuzione di prove idrauliche nei piezometri e lungo i principali percorsi idrici all'interno delle gallerie di cava. L'analisi idrochimica delle acque superficiali e sotterranee è stata realizzata nell'arco di quattro campagne di campionamento, eseguite sia in periodo di magra che in periodo di morbida. L'utilizzo di uno speciale freatimetro dotato di sonda multiparametrica ha consentito di rilevare la stratigrafia idrochimica dei pozzi lungo tutta la colonna d'acqua, permettendo inoltre di selezionare il punto di prelievo sulla base delle evidenti variazioni dei parametri misurati. In tal modo è stato possibile identificare differenti gruppi di acque. I campioni sono stati trattati al fine di determinare i principali analiti (Calcio, Solfati, Magnesio, K+Na, Cloruri, Nitrati, Ammoniaca, Bicarbonato) e verificare il contenuto in oli minerali. L'integrazione dei dati di campo e dei risultati delle analisi ha permesso di riconoscere le direttrici di deflusso naturale e/o di derivazione artificiale delle acque sotterranee, nonché la qualità delle stesse, definendo l'effettivo apporto delle acque di circolazione nei sistemi carsici al bilancio idrico dell'area in

¹ Saint-Gobain PPC Italia S.p.A – Attività GYPROC, Dip. "Exploration, Mining & Recycling", Via Ettore Romagnoli 6, 20146 Milano (MI) - roberto.margutti@saint-gobain.com

² Saint-Gobain PPC Italia S.p.A – Attività GYPROC, Dip. "Exploration, Mining & Recycling", Via Ettore Romagnoli 6, 20146 Milano (MI) - irene.zembo@libero.it

esame. È stato inoltre sviluppando un modello concettuale del corpo idrico, valutandone il livello di rischio in funzione dell'impatto dell'attività estrattiva locale.

Parole chiave: Idrostratigrafia, Modello idrogeologico, Idrochimica, Rischi ambientali, Qualità delle acque sotterranee.

Abstract

The international speleology community has recognised Mt. Tondo area (Romagna Apennines, "Vena del Gesso Romagnola"), and in detail Re Tiberio karst system, as one of the longest gypsum caves in Italy. In order to define the interaction process between the anthropogenic and the hydroenvironment, with particular attention to the gypsum karsts protection and to the surface and groundwater pollution risks, a detailed hydrogeological and hydrochemistry study has been carried out. Field characterization have being carried out to support geological, structural, karst-morphology and a new hydrochemistry and hydrogeological model interpretation of Mt. Tondo. Direct geological investigation, consisting in 5 drill cored boreholes, was done inside and outside the quarry area to implement geological data know-how. In all boreholes were installed piezometers (in addition to the 2 existing ones); water table and chemical-physical basic parameters (pH, temperature, electrical conductivity and redox) have been monitored on a monthly base for one year. Karst systems and mine tunnels, as a natural window on the underground, were used for hypogean geological survey, as valid tool to rebuild the structural setting, integrating new data with existing surface information. Groundwater hydraulic data were obtained through slug tests in piezometers and drainage flow capacity measurements was carried out in mine tunnels. Water chemistry characterisation was done, including surface and groundwater, during four field campaigns distributed during wet and dry seasons, over two years. Characteristic water level to be sampled was decided after a preliminary physical parameters logging probe of the well water column; this approach was useful to identify different water groups. All water samples were analysed in laboratory for major cations and anions; in some cases, isotopic determination and hydrocarbon contents (mineral oil) were investigated as well. Field data and analytical results were correlated and represented in a whole elements map and a new hydrology conceptual model was proposed to support environment issues and mining engineering developments.

Keywords: Hydrostratigraphy, Hydrogeological Model, Hydrochemistry, Environment Risks, Groundwater Quality.

Introduzione

Lo studio idrogeologico e idrochimico delle acque superficiali e sotterranee appartenenti al settore di cava Monte Tondo è stato intrapreso nel triennio 2007-2009, attraverso la collaborazione tra GYPROC Saint-Gobain (promotore della ricerca) e il Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università degli Studi di Pavia, al fine di approfondire le conoscenze scientifiche sulla circolazione e sulla qualità delle acque della Vena del Gesso romagnola.

In particolare, ci si è proposti di aggiornare il quadro delle conoscenze maturate fino ad oggi, individuando le possibili relazioni intercorrenti tra attività estrattiva ed acque superficiali e sotterranee, in un'area

limitrofa ad una zona fortemente sfruttata per la qualità terapeutica delle sue acque e delle sorgenti termali.

In generale, laddove la gestione di un'attività estrattiva non venga condotta a regola d'arte, la presenza di vuoti minerari può accelerare i processi d'infiltrazione e percolazione, portando ad un eventuale inquinamento delle falde acquifere, poiché il possibile rilascio di sostanze pericolose (ad esempio nitrati ed idrocarburi) potrebbe avvenire in profondità, all'interno dell'ammasso roccioso stesso. Inoltre, la conoscenza dell'interazione tra attività mineraria e circolazione delle acque costituisce un aspetto ambientale di primaria importanza per la comunità e le autorità locali preposte alla tutela e alla gestione delle risorse idriche.

Idrologia e idrogeologia: studi precedenti

Le caratteristiche morfologiche dell'area, contraddistinta da un'elevata pendenza dei versanti e immersione degli strati gessosi verso N-NE con inclinazione 20°-50°, favoriscono un rapido deflusso delle acque sul versante Nord e Sud della Vena del Gesso. La presenza di doline, inghiottitoi e cavità consente alle acque meteoriche di infiltrarsi rapidamente nel sottosuolo; inoltre, la stessa morfologia "a imbuto" dell'area estrattiva favorisce l'infiltrazione sotterranea attraverso sistemi di faglie e fratture. L'area è pertanto priva di rilevanti condizioni di saturazione superficiale, mentre si caratterizza per una circolazione idrica sotterranea e profonda che dà luogo a diffuse forme carsiche.

Un primo modello di circolazione idrica è stato proposto da ARPA Emilia-Romagna nel 2001, con lo scopo di stabilire i limiti dello sviluppo futuro della cava di Monte Tondo, compatibilmente e nella salvaguardia degli ecosistemi locali (BALLARDINI *et alii* 2001). Questo studio prevedeva l'esistenza di un'unica zona satura, entro la quale avviene la circolazione idrica. Secondo questo modello l'area di alimentazione dell'acquifero si trova incentrata su Monte Tondo e il deflusso sotterraneo sarebbe impostato principalmente lungo fratture che si estendono in profondità, fino ad interessare il substrato afferente la Formazione Marnoso-arenacea.

Altri studi sulla circolazione idrica in ambiente carsico (FORTI *et alii* 1997; GARAVINI 1997; ERCOLANI *et alii* 2003; SPELEO GAM MEZZANO 2011) hanno individuato nel massiccio di Monte Tondo (Formazione Gesso-solfifera) due sistemi carsici indipendenti. Un sistema carsico, di cui fa parte la Buca Romagna, drena le acque verso la risorgente di Ca' Boschetti posta a quota 100 m s.l.m. Il secondo sistema è composto da numerose grotte, tra cui la Grotta del Re Tiberio, che ne costituisce la parte terminale, l'Abisso Cinquanta e l'Abisso Mezzano. Infine GARAVINI (1997) indica la presenza di una risorgente nell'alveo del

Senio, quasi in corrispondenza del piazzale di cava, che viene messa in relazione con l'originale risorgente della Grotta del Re Tiberio.

Implementazione dei modelli idrogeologici esistenti con nuovi dati

Fino ai primi anni 2000 l'esatta dinamica delle acque circolanti all'interno di Monte Tondo e lo stesso ruolo della cava non erano ancora del tutto chiari. Da qui è nata l'esigenza di integrare i modelli esistenti con nuovi dati. Nel biennio 2008-2009 sono state quindi condotte nuove indagini da BORGHI (2008), GHISELLI *et alii* (2008; 2011) e MARGUTTI (2009), al fine di migliorare la conoscenza idrogeologica dell'area e la caratterizzazione ambientale dell'unico polo estrattivo oggi attivo della Vena del Gesso romagnola.

In particolare, lo studio idrogeologico ed idrochimico della cava di Monte Tondo ha comportato:

- un rilevamento geomorfologico, geologico strutturale e idrogeologico di terreno;
- la definizione delle unità idrostratigrafiche ed un raffronto tra i bacini idrografici storici con i bacini attuali;
- l'esecuzione di sondaggi geognostici e l'installazione di n. 5 piezometri;
- il monitoraggio periodico delle soggiacenze e dei parametri chimico-fisici delle acque;
- l'esecuzione di prove idrauliche in sito;
- l'elaborazione di una carta idrogeologica in scala 1:2500, attraverso l'integrazione dei dati di terreno con i dati telerilevati;
- l'elaborazione di un nuovo modello idrogeologico concettuale.

Unità Idrostratigrafiche dell'area afferente la cava Monte Tondo

Nel territorio indagato l'Unità idrostratigrafica predominante è costituita dalla

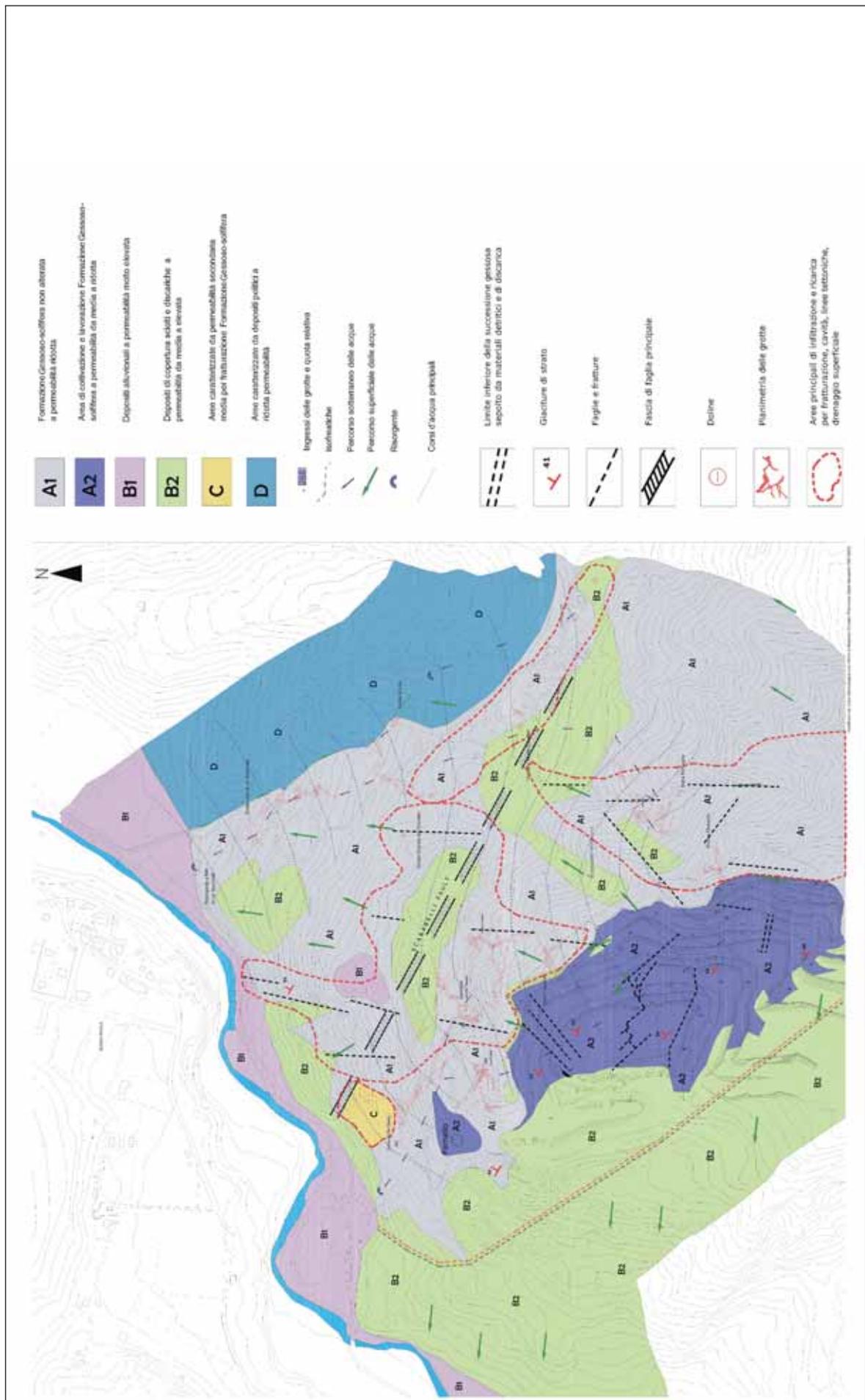


Fig. 1 – Carta idrogeologica di cava Monte Tondo e dei suoi dintorni (modificato da FANTI et alii 2008; scala originale 1:2500). Nella carta sono evidenziate le litologie dell'area in esame ed il rispettivo valore di permeabilità. Si noti che i deflussi delle acque superficiali di entrambi i versanti della Vena del Gesso (NE e SW) si riversano nel Torrente Senio.

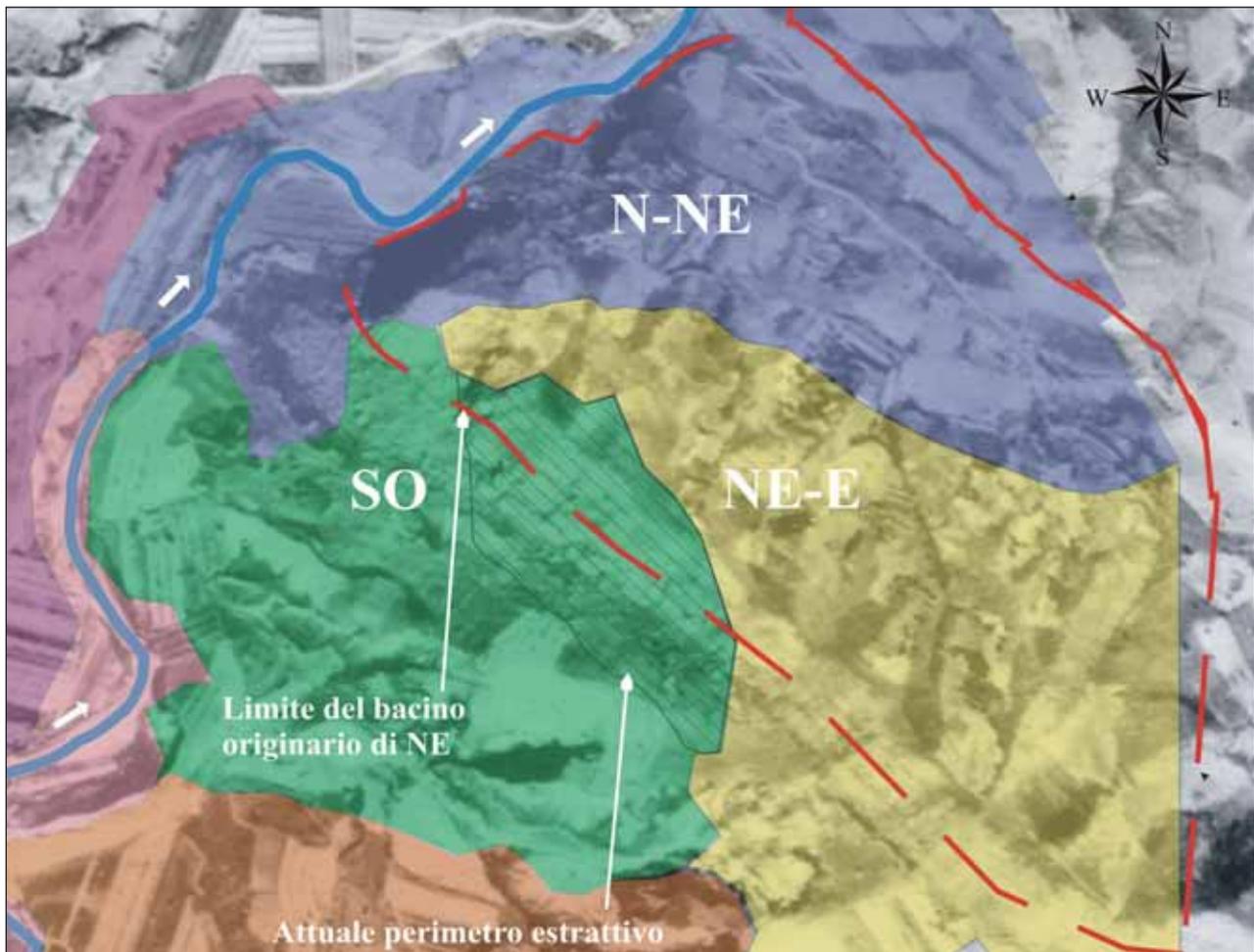


Fig. 2 – Carta dell'evoluzione morfologica dei bacini idrografici in relazione all'avanzamento dell'attività estrattiva nella cava di Monte Tondo (foto aerea IGM 1954, modificata da MARGUTTI 2009).

Formazione Gessoso-solfifera, caratterizzata dall'alternanza di gessi selenitici, in banchi generalmente plurimetri, con intercalazioni marnose, argillose e bituminose. La permeabilità che caratterizza tali ammassi gessosi è essenzialmente di tipo carsico.

La Formazione Gessosa-solfifera poggia stratigraficamente sulla Formazione Marnosa-arenacea; quest'ultima, non visibile in affioramento nell'area di cava, costituisce tuttavia un substrato impermeabile e non carsificabile in cui l'acqua può circolare solo per fratturazione. Esternamente all'ammasso gessifero gli acquiferi sono costituiti dai corpi ghiaiosi e sabbiosi plio-quadernari.

Le Unità idrogeologiche, identificate nella fig. 1 sono così distinte:

- o Formazione Gessoso-solfifera non alterata, **(A1)**;
- o Formazione Gessoso-solfifera alterata

(A2) dalla coltivazione mineraria:

- o Depositi alluvionali di fondovalle **(B1)**;
- o Coperture detritiche e discariche minerarie **(B2)**;
- o Formazione Gessoso-solfifera fortemente fratturata **(C)**;
- o Formazione a Colombacci e Argille Azzurre **(D)**.

I depositi evaporitici affioranti in area di cava (A2) sono caratterizzati da una maggiore permeabilità rispetto ai gessi inalterati per le seguenti ragioni:

- 1) presenza di strutture primarie ed acquisite, e successivo sviluppo della carsificazione;
- 2) presenza di fratturazione indotta dallo sparo delle mine;
- 3) assenza di vegetazione e coperture pelitiche.

Analisi pluviometrica dell'area di Monte Tondo

La cava di Monte Tondo ricade nella fascia submediterranea calda (*Carta Fito-climatica dell'Emilia-Romagna: UBALDI et alii 1996*), localizzata tra la fascia delle precipitazioni di pianura e di collina e la fascia di transizione tra collina e montagna (www.arpa.emr.it/sim/).

I dati storici delle piovosità su base mensile, relativi al periodo compreso tra gennaio 2005 e dicembre 2008, vengono rappresentati in fig. 4 come media cumulativa (in

mm). Da una prima analisi si osserva che i dati acquisiti nelle stazioni pluviometriche di Brisighella e Casola Valsenio sono maggiormente correlabili tra loro, rispetto ai dati derivanti dalla stazione di Riolo Terme. I dati pluviometrici medi relativi alle stazioni di Casola Valsenio e Brisighella, raccolti nei quattro anni, e distinti per mese, mostrano come l'andamento delle precipitazioni lungo la dorsale della Vena del Gesso evidenzia un'omogeneità, sia nei minimi che nei massimi eventi piovosi, ed una progressiva diminuzione dal 2005 al 2008.

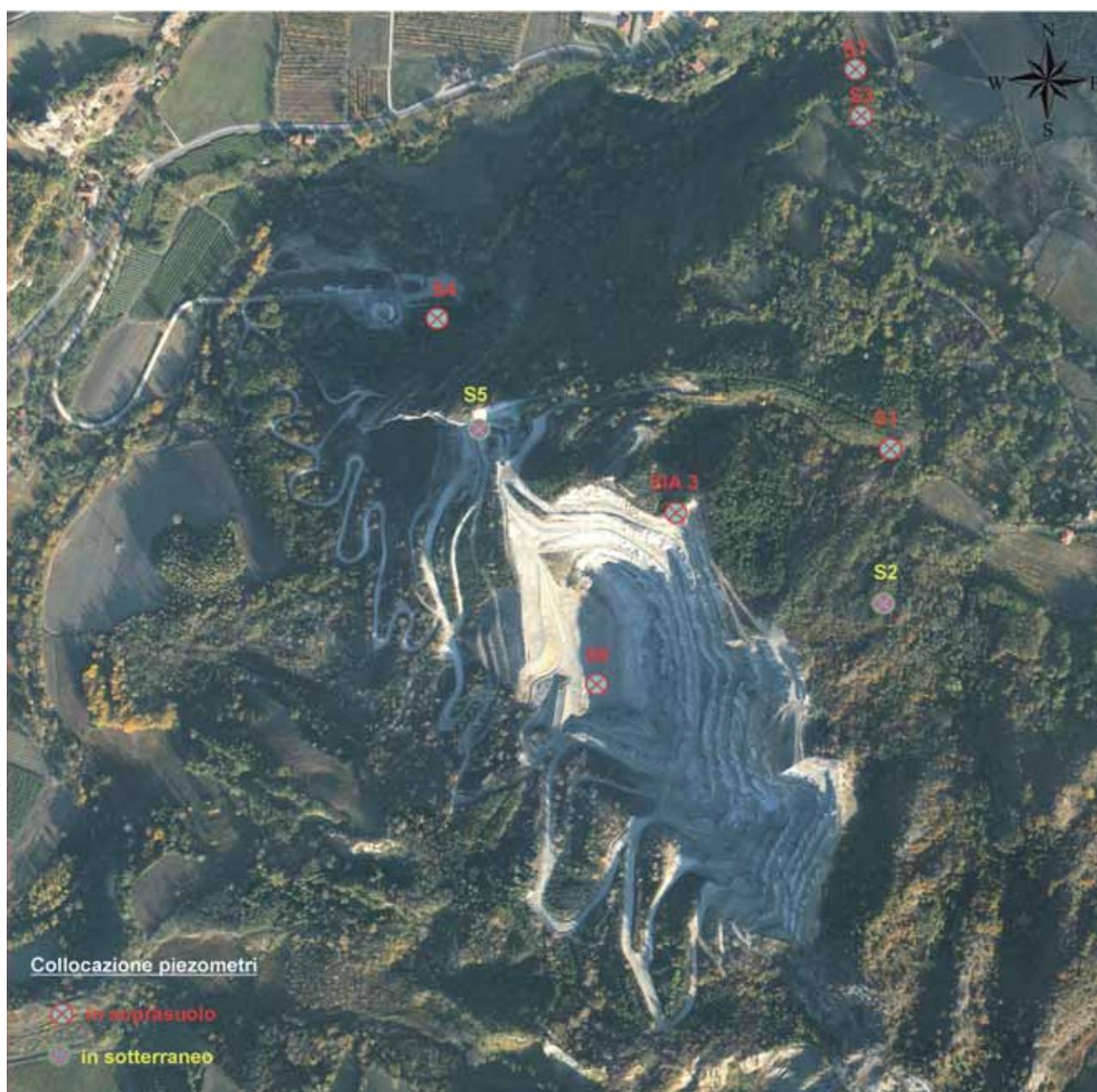


Fig. 3 – Ubicazione dei pozzi di monitoraggio nell'area di cava. I pozzi da S3 a S7 sono di nuova realizzazione (MARGUTTI 2009). Allo stato attuale sono presenti otto piezometri sui quali sono state eseguite misurazioni di livello e misurazioni chimico-fisiche con sonda multiparametrica.

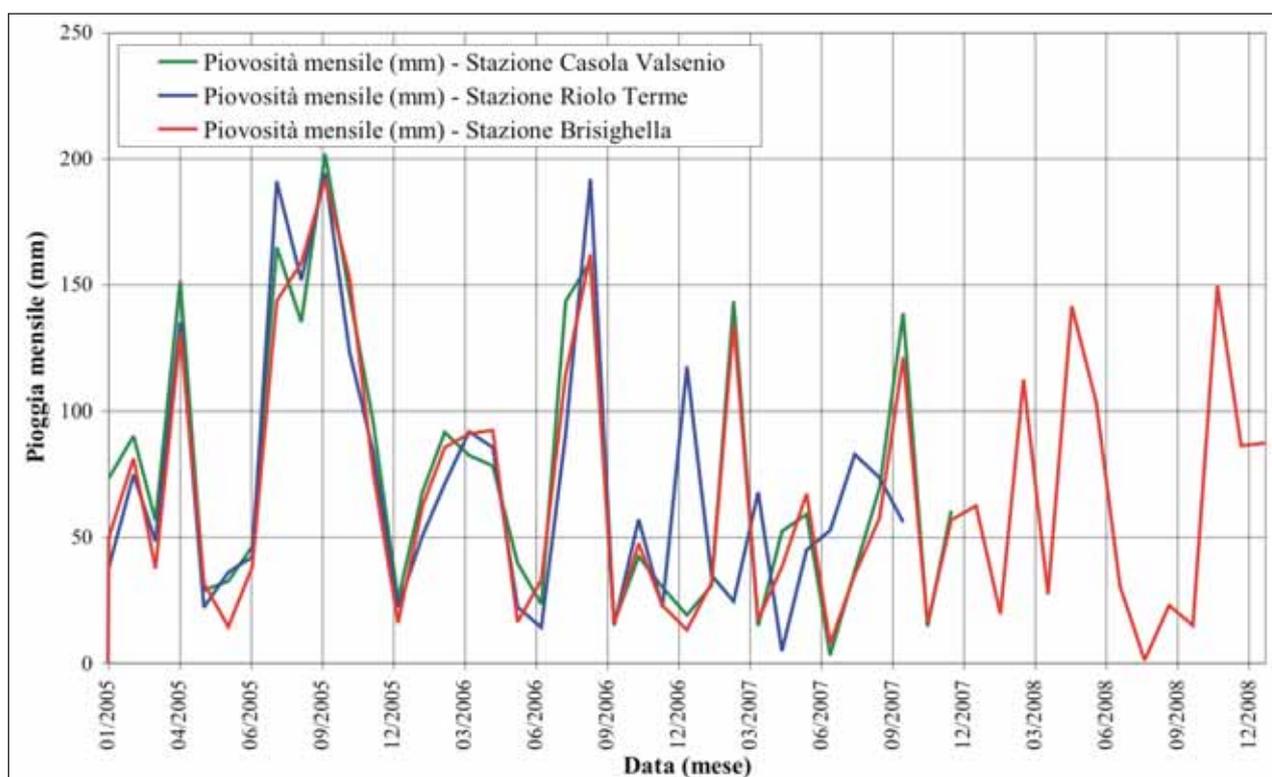


Fig. 4 – Grafico storico delle piovosità mensili (in mm) dal 2005 al 2008 (Stazione di Casola Valsenio, Brisighella e Riolo Terme).

I dati termo-pluviometrici della stazione di Brisighella (fig. 5), rappresentano con buona approssimazione le condizioni meteorologiche del polo estrattivo di Monte Tondo. Nel grafico sono ben visibili le condizioni di forte piovosità nel periodo primaverile ed autunnale del 2008, rispettivamente durante i mesi di maggio-giugno (con piogge rispettivamente di 141-103 mm/mese) e novembre (con piogge di 137 mm/mese). Viceversa, i mesi di agosto, settembre e ottobre 2008, si differenziano per una condizione limite di *deficit* idrico da 1.2 a 23 mm/mese. L'anno 2009 risulta anomalo rispetto allo storico pluviometrico disponibile; il periodo compreso tra gennaio e settembre è infatti caratterizzato da scarse precipitazioni.

Ricostruzione dei bacini idrografici originari

La ricostruzione dei bacini idrografici originari della zona indagata è stata eseguita sulla cartografia IGM 1:25.000 e basata sulle osservazioni qualitative condotte a mezzo delle riprese aeree RAF ed IGM

fino al 1954.

Il Torrente Senio, nel quale i bacini imbriferi dell'area di cava e di Borgo Rivola riversano le acque piovane, è un affluente di destra del Fiume Reno. Si possono identificare due aste principali del torrente, una a monte della confluenza con il Torrente Sintra ed una a valle della stessa. Il tratto di torrente che interessa l'area di Monte Tondo si trova a monte di tale confluenza. L'attività del Torrente Senio in quest'area è di tipo prevalentemente erosionale. Lo studio elaborato dall'ARPA Emilia Romagna, Sezione Provinciale di Ravenna (GIAQUINTA s.d.), individua in due punti di misura a monte e a valle di Borgo Rivola (Ponte Peccatrice in Casola Valsenio e Ponte Riolo Terme a monte di Riolo), una qualità delle acque da buona a sufficiente, secondo il Decreto Legislativo 152/99. Il lieve deterioramento viene attribuito proprio alla presenza di una maggiore torbidità legata all'azione erosionale dei fondali e agli scarichi puntiformi localizzati lungo il corso del torrente.

L'area di Monte Tondo è interessata dalla presenza di due bacini idrologici netta-

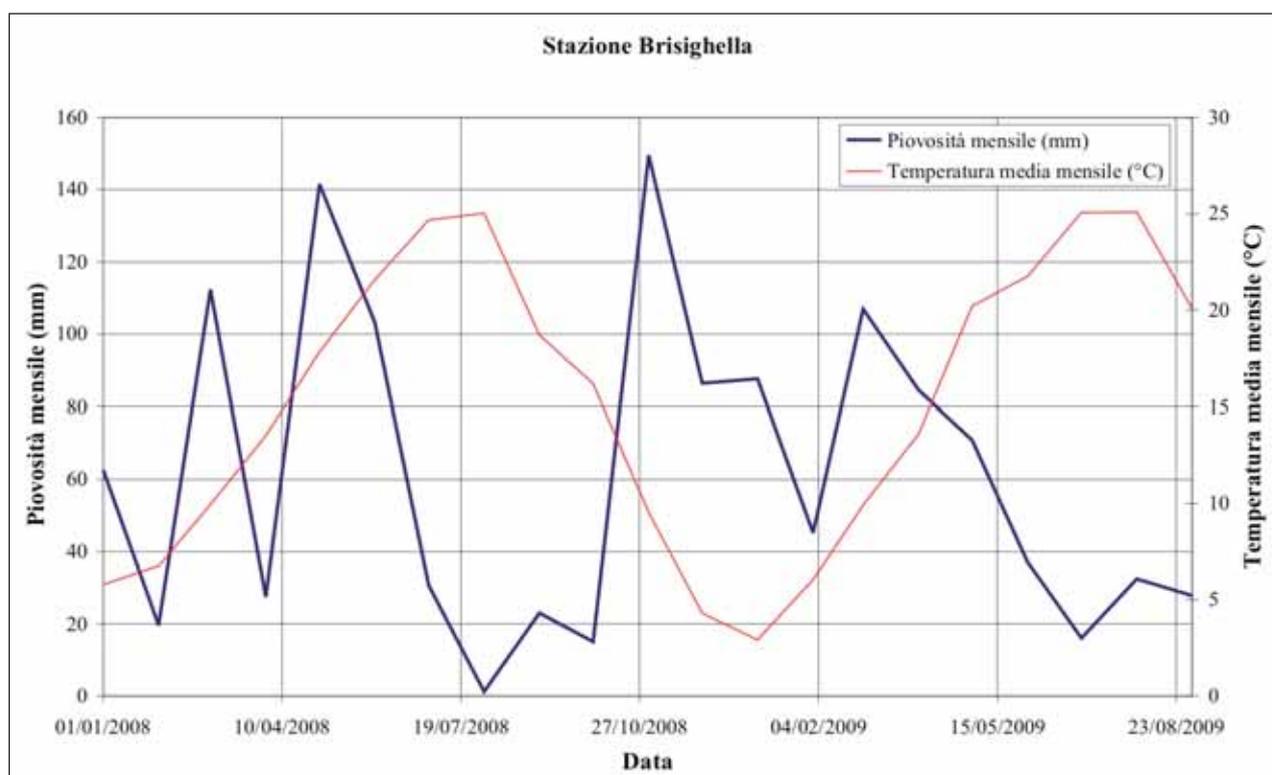


Fig. 5 – Grafico termo-pluviometrico del periodo gennaio 2008 e settembre 2009 (Stazione di Brisighella).

mente separati dalla Vena del Gesso, che costituisce una linea spartiacque a livello regionale. La sella tra Monte Tondo e Monte della Volpe a Sud e il corso del Torrente Senio a Nord chiudono i due bacini. In base alla cartografia IGM 1:25.000 sono identificabili due bacini principali:

- il *Bacino Sud-Ovest*, posizionato tra il crinale di Monte Tondo – Monte della Volpe ed il corso del Torrente Senio in direzione Casola Valsenio;
- il *Bacino Nord-Est* posizionato tra il crinale di Monto Tondo – Monte della Volpe e il corso del Torrente Senio in direzione Riolo Terme.

I sottobacini del bacino Sud-Ovest (SO in

	Area originaria (m ²)	Area attuale (m ²)	Differenza (in %)
Macrobacino NE	747.000	602.000	81%
Macrobacino SO	774.500	919.500	119%

Tab. 1 – Confronto areale tra i macrobacini originari ed attuali.

fig. 2), impostati su unità geologiche di tipo pelitico o arenaceo-pelitico (Formazione Marnoso-arenacea–Membro di Borgo Tossignano), sono caratterizzati da forme tondeggianti legate a deflussi superficiali su substrati impermeabili, a volte massivi, con erosioni di tipo calanchivo. Sono presenti frequenti diversioni delle aste d'impluvio probabilmente legate alla giustapposizione tettonica o stratigrafica di rocce più resistenti (arenarie) e rocce marnose maggiormente soggette ad erosione.

I sottobacini del bacino Nord-Est (NE in fig. 2), invece, impostati sul dorso e sulle testate dell'ammasso gessoso, hanno morfologie allungate e si presentano in un assetto sub parallelo regolare praticamente indisturbato. Anche all'altezza della località Crivellari, ove dovrebbe manifestarsi il lineamento tettonico regionale denominato "Faglia Scarabelli" non sono evincibili particolari diversioni, a testimonianza che il substrato si presenta, nei confronti delle acque superficiali, omogeneo in comportamento e risposta erosionale.

In tutti i bacini (NE e SO) gli impluvi sono costituiti essenzialmente da aste inatti-

ve, che si attivano solo in occasione degli eventi meteorici.

La lunghezza media delle aste principali nel macrobacino Nord-Est è di circa 500-700 m, mentre il macrobacino di Sud-Ovest presenta, per la vicinanza al corso del Torrente Senio e per la diversa morfologia dei sottobacini, aste scarsamente sviluppate con lunghezze medie di circa 300-500 m.

Effetto della morfologia di cava sull'idrografia locale: differenze tra bacini originali e bacini attuali

L'attività di escavazione ha causato l'arretramento del crinale della Vena del Gesso a Monte Tondo che, nel massimo punto di scostamento, arriva ora a circa 100-150 m dall'originale spartiacque; per-

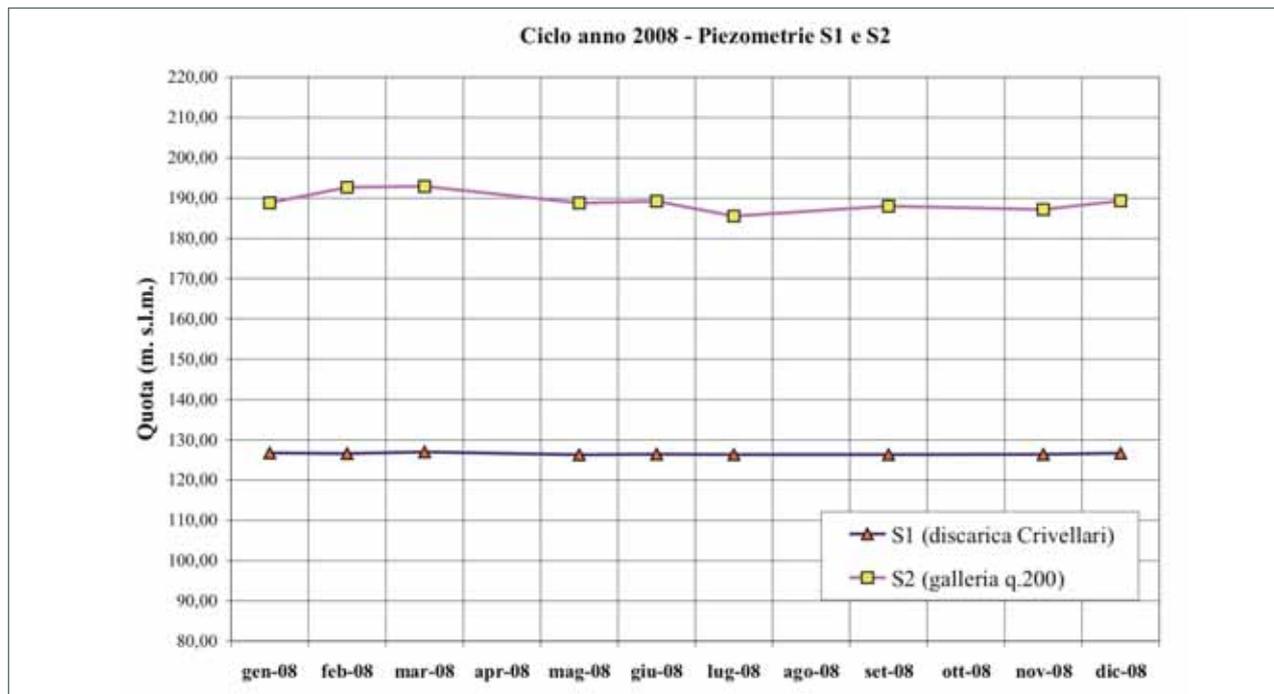


Fig. 6 – Ciclo di monitoraggio piezometrico da gennaio a dicembre 2008; soggiacenze mensili (o bimensili) dei piezometri S1 e S2.

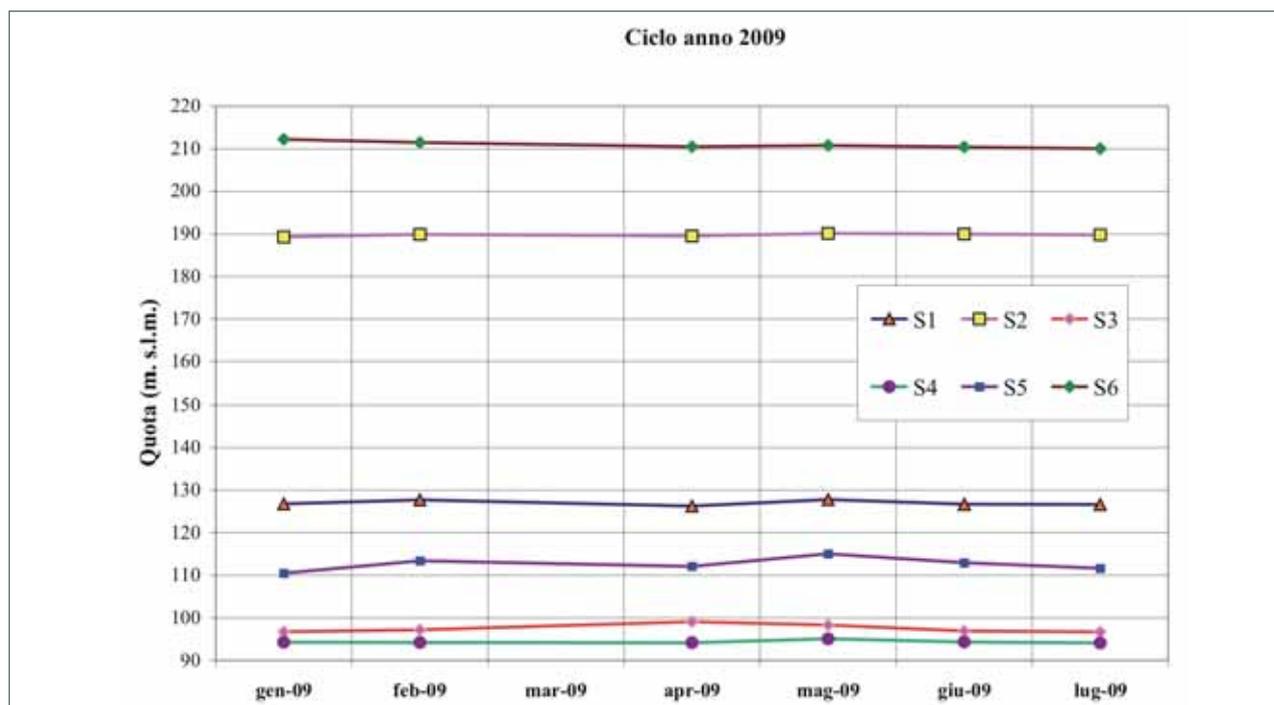


Fig. 7 – Ciclo monitoraggio piezometrico anno 2009 (da gennaio a luglio); soggiacenze mensili (o bimensili) dei piezometri storici (S1 e S2) e di recente realizzazione (da S3 a S6).

tanto 145.000 m² circa (in pianta) di area originariamente competente il macrobacino Nord-Est sono ora di competenza del macrobacino Sud-Ovest (SO in fig. 2).

L'elaborazione cartografica proposta in fig. 2 è stata ottenuta sovrapponendo i limiti attuali dei bacini idrografici, con la foto aerea IGM del 1954.

La tab. 1 evidenzia la modificazione morfologica dei macrobacini risultante dall'attività di coltivazione della cava.

La riduzione geometrica del macrobacino di alimentazione NE non sembra aver apportato una drastica variazione quantitativa dell'alimentazione alla circolazione idrica sotterranea (già affetta da una pio-

vosità estremamente variabile) mentre, in relazione alla circolazione idrica superficiale, si nota che comunque il recettore finale delle acque rimane l'asta principale del Torrente Senio. A valle della sezione di Borgo Rivola, quindi, la presenza o l'assenza della cava di Monte Tondo non ha provocato alcuna variazione effettiva al regime del corso d'acqua alimentato dai macrobacini originari.

Con particolare riferimento alle attività superficiali, è stato osservato e computato che l'arretramento del crinale spartiacque ha sottratto circa 145.000 m² (in pianta) al bacino originariamente collocato a Nord-Est dell'attuale cava.

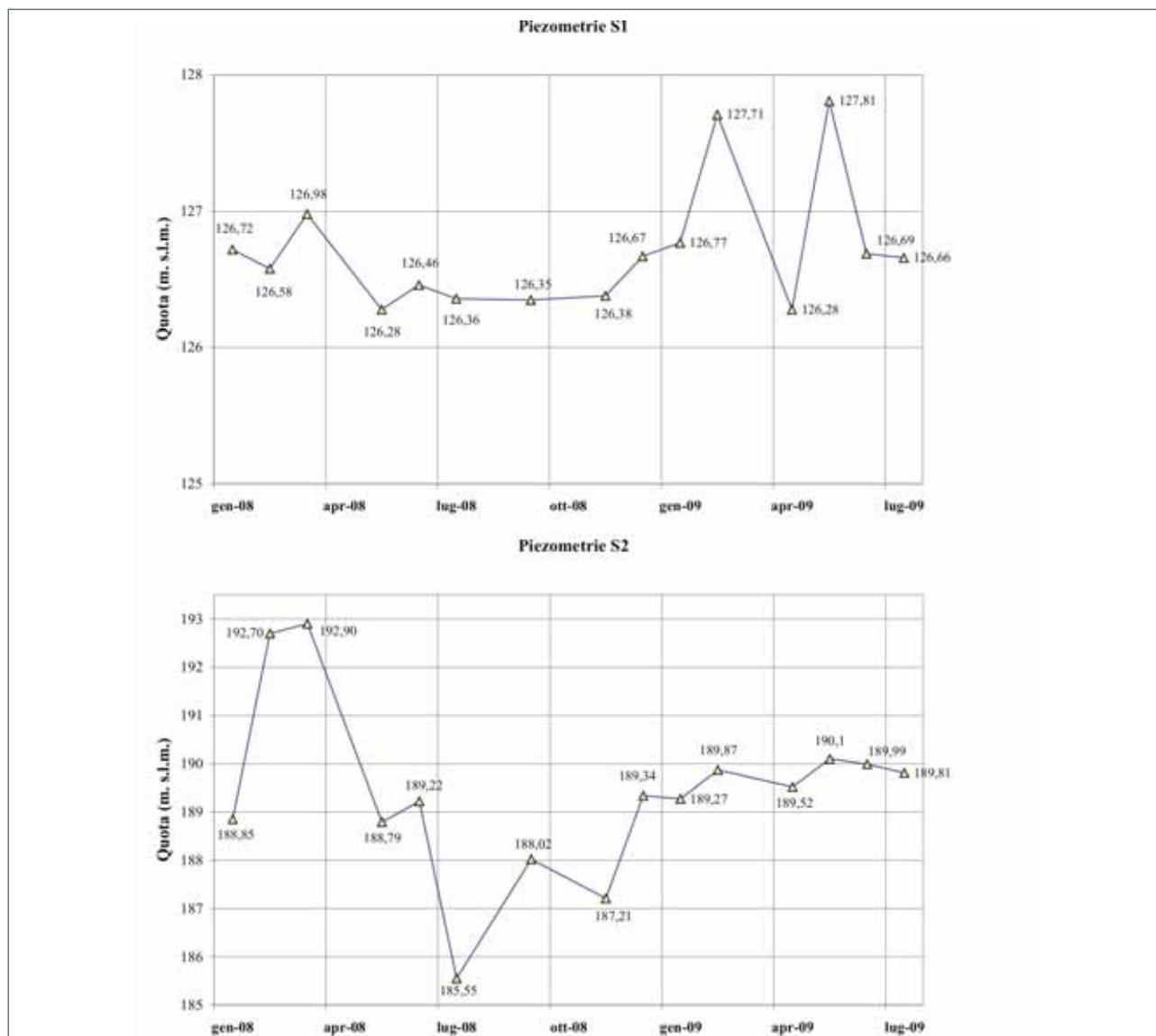


Fig. 8 – Soggiacenze mensili (o bimensili) dei piezometro S1 e S2 da gennaio 2008 a luglio 2009.

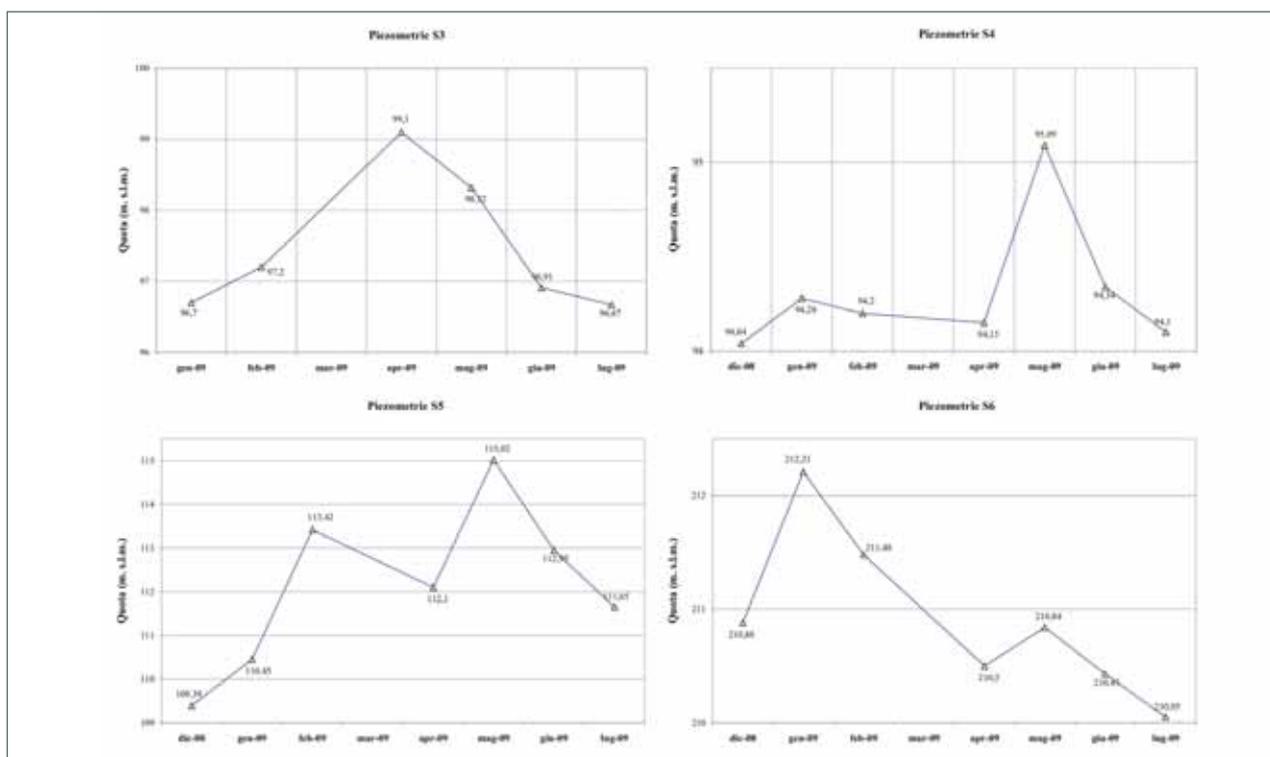


Fig. 9 –Soggiacenze mensili (o bimensili) dei nuovi piezometri (da S3 a S6) da gennaio a luglio 2009.

Monitoraggio piezometrico: il livello di soggiacenza degli acquiferi sotterranei

Nell'areale di cava e nei suoi dintorni sono presenti 8 piezometri, 5 dei quali sono stati installati al termine di sondaggi a carotaggio continuo eseguiti nell'ambito di due distinte campagne geognostiche (fig. 3). Tali piezometri sono serviti per effettuare periodicamente il monitoraggio del livello freatico delle acque sotterranee, conoscerne le caratteristiche chimico-fisiche, prelevare dei campioni per le analisi di laboratorio e, laddove tecnicamente possibile, eseguire delle prove idrauliche in sito. Nelle figg. 6-7 vengono riportati i dati relativi alle quote di soggiacenza dei pozzi S1 ed S2 rilevate nel biennio 2008-2009 su base mensile. Dai rilievi freaticometrici dell'anno 2008 (fig. 6), gli acquiferi sottesi alle quote di soggiacenza in S1 e S2 denotano un comportamento distinto: mentre S2 ha un livello pressoché costante e non risente delle oscillazioni stagionali, in S1 si apprezza un massimo livello piezometrico nel periodo primaverile ed un minimo in estate.

Dalla visione d'insieme dei piezometri

storici (S1 e S2) e di recente realizzazione (da S3 a S6) non si apprezzano particolari oscillazioni delle soggiacenze alla scala in esame (fig. 7).

Il piezometro in S1 (fig. 8), unitamente ai piezometri S4 e S6 (fig. 9), mostrano un *range* di oscillazione stagionale inferiori ai due metri. Viceversa, i piezometri S2, S3 e S5 (fig. 9), mostrano una maggiore mobilità delle soggiacenze in funzione dei periodi di magra e morbida.

Il differente comportamento delle soggiacenze rilevate (fig. 9) è del tutto incompatibile con l'ipotesi della presenza di un unico acquifero confinato per il quale, al contrario, una variazione di carico localizzata nell'area di alimentazione, indurreb-

Sondaggio / Piezometro	Quota (m s.l.m.)	Metodo	K (m/s)
S6	212.5-205.5	Slug test	6.8×10^{-7}
S4	93-82	Slug test	3.0×10^{-6}
S2	147-142	Lugeon	1.1×10^{-6}
S2	120-115	Lugeon	1.2×10^{-6}

Tab. 2 – Riepilogo delle conducibilità idrauliche rilevate in S2 (BALLARDINI *et alii* 2001) e in S6-S4.

Legenda

Pz 1-7



Ubicazione e traccia dei piezometri



Vettori del gradiente di flusso idrico

Traccia della linea di dislivello
dei flussi idrici

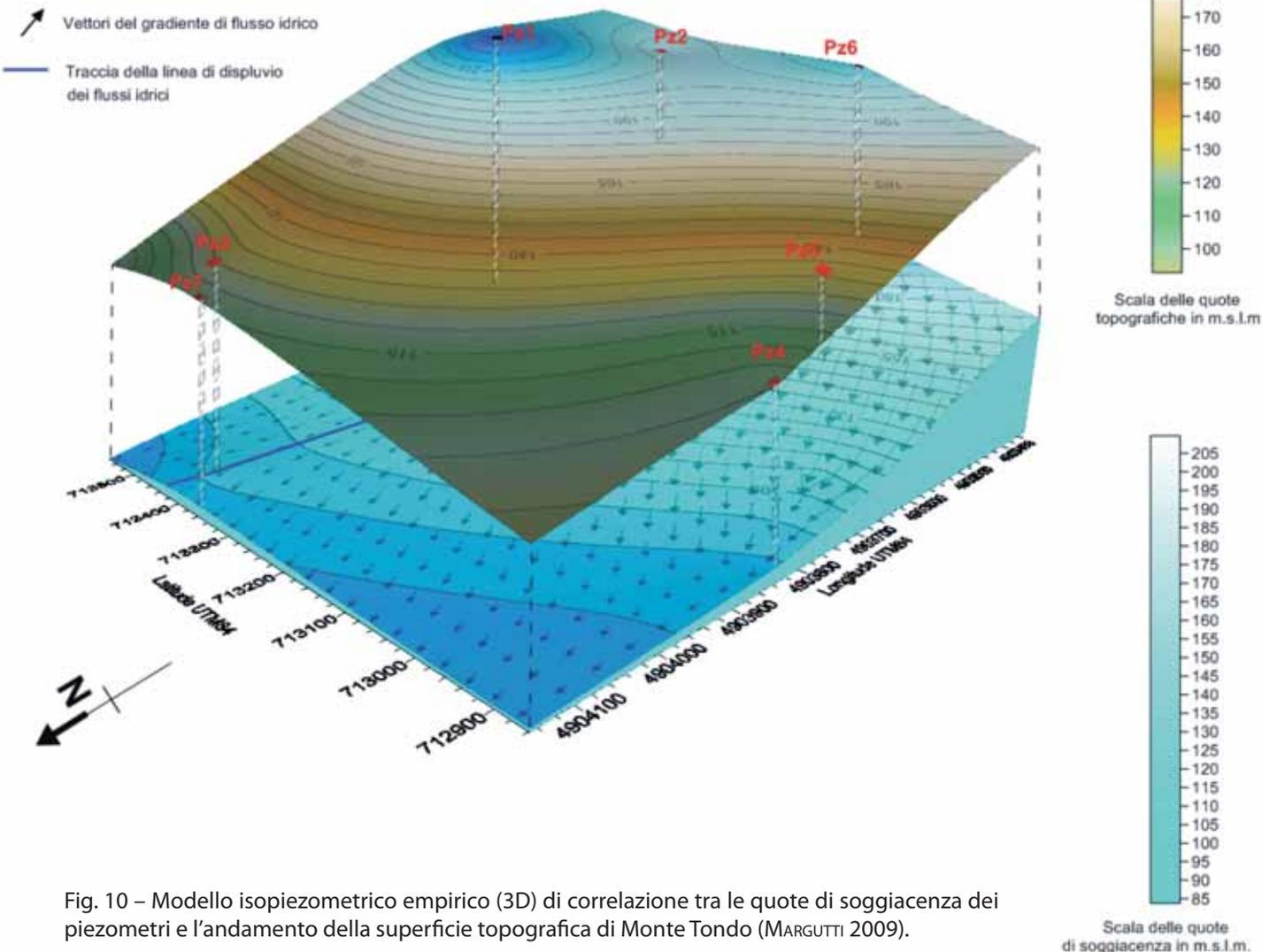


Fig. 10 – Modello isopiezometrico empirico (3D) di correlazione tra le quote di soggiacenza dei piezometri e l'andamento della superficie topografica di Monte Tondo (MARGUTTI 2009).

be in modo quasi istantaneo un aumento di carico piezometrico (quindi di quota piezometrica) in tutto il sistema acquifero.

Prove idrauliche nei pozzi

Nella tab. 2 sono riassunti i dati di conducibilità idraulica ricavati sia dalla documentazione esaminata (BALLARDINI *et alii* 2001) che nel corso delle prove eseguite sui piezometri di nuova realizzazione.

Dinamica e morfologia degli acquiferi

In base ai rilievi freaticometrici del periodo di magra e di morbida del 2009 è sta-

to ricostruito un modello isopiezometrico dell'area (fig. 10) mediante semplice interpolazione di tutti i dati di livello rilevati con misurazioni dirette. Dal modello proposto (comunque valido solamente per acquiferi omogenei) risulta un deflusso delle acque sotterranee avente direzione S-N e divergenza dei flussi verso NNE e NNO in corrispondenza del piezometro S3 (PZ3 in fig. 10).

È evidente che questo modello è poco realistico. Sono presenti, infatti, gradienti di falda con valori di circa 20%, del tutto improbabili per qualsiasi acquifero naturale. In aggiunta, se così fosse, il sistema di gallerie di cava da quota 200 m s.l.m. dovrebbe essere pressoché allagato. Tale situazione è smentita nei fatti dalla realtà

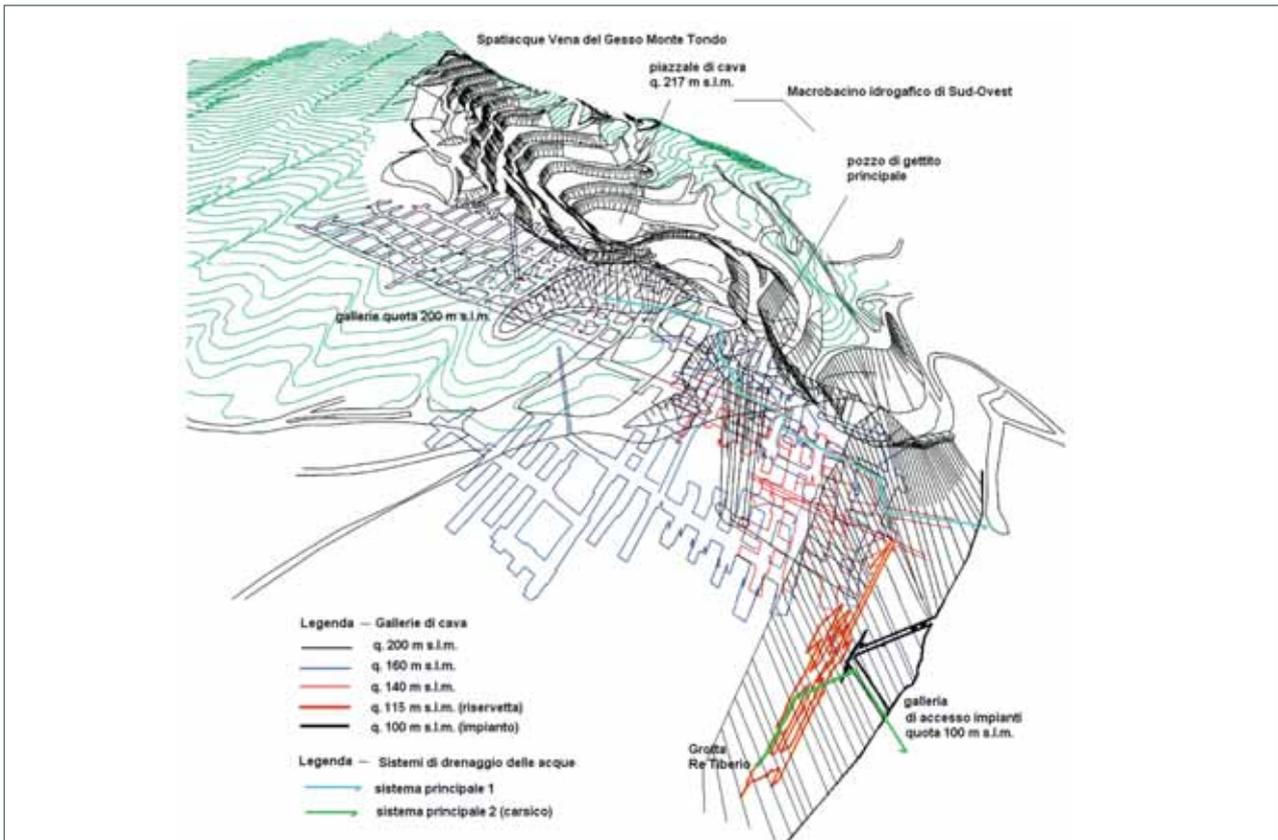


Fig. 11 – DEM di cava Monte Tondo e dei vuoti minerari alle diverse quote, con rappresentazione dei sistemi di circolazione idrica sotterranea (il percorso principale del sistema di drenaggio 1 è indicato dalla linea azzurra; mentre il sistema di drenaggio 2 è indicato dalla linea verde). Vista dell'area verso Sud dalle coordinate 13100E/4200N (MARGUTTI 2009).

estrattiva confermando così l'impossibilità di applicare un modello idrogeologico che non tenga conto dell'esistenza di un reticolo carsico di drenaggio sotterraneo.

Quadro idrologico e idrodinamico delle gallerie di cava: i sistemi di drenaggio

L'area di Monte Tondo è caratterizzata da importanti vuoti minerari che, inevitabilmente, determinano un'alterazione ri-

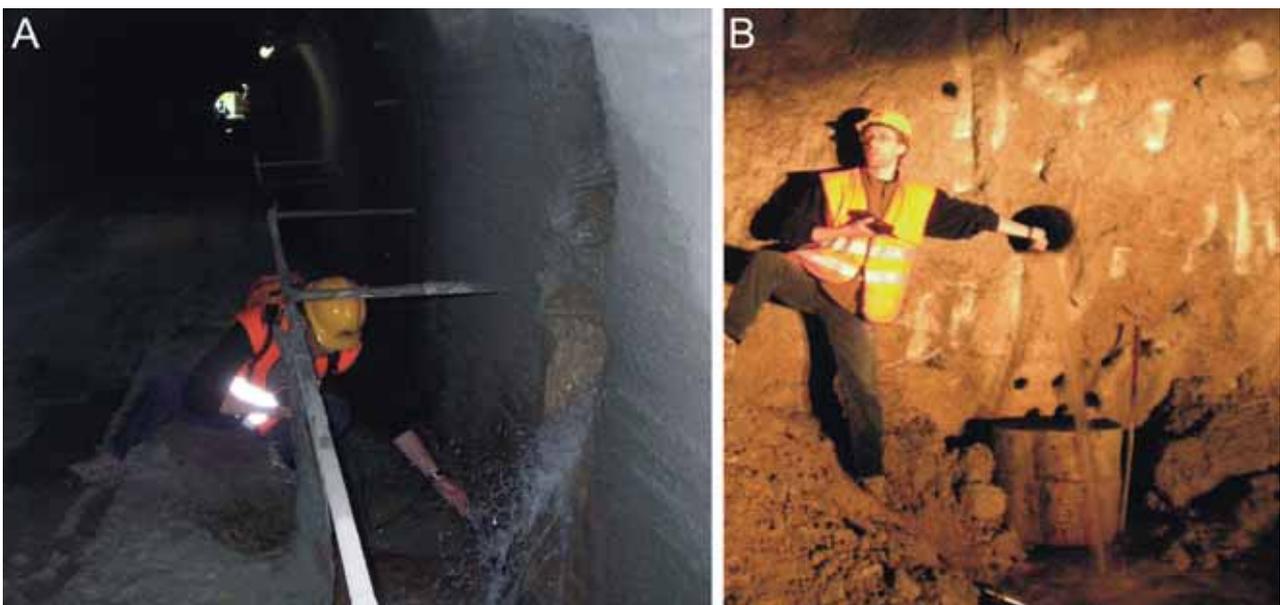


Fig. 12 – Fotografie delle principali venute d'acqua corrispondenti al sistema di drenaggio 2. A) venuta d'acqua in galleria di quota 100 m s.l.m. e B) venuta d'acqua "sorgente riservetta" in gallerie di quota 115 m s.l.m (foto R. Margutti).

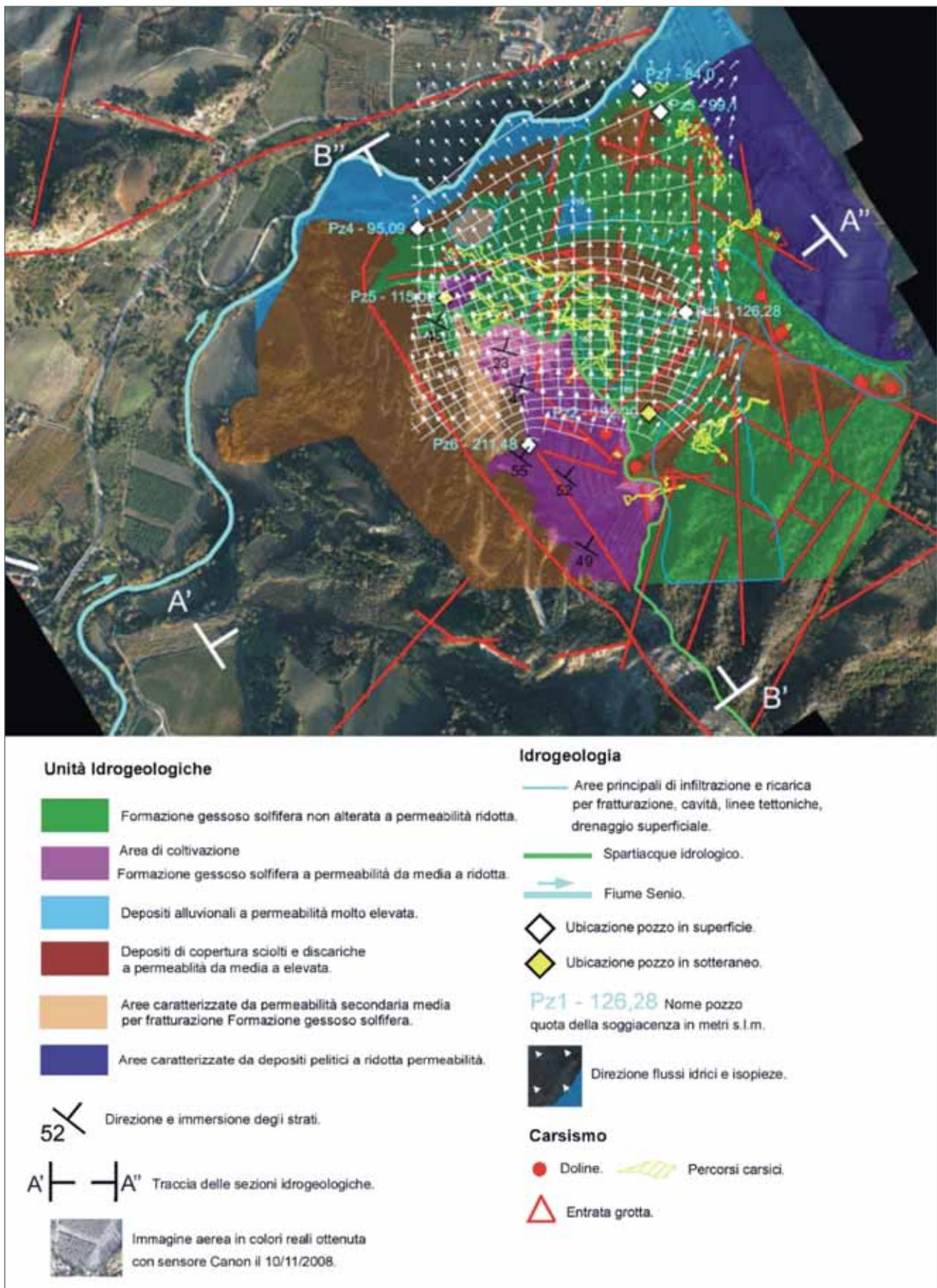


Fig. 13 – Carta d’insieme di correlazione degli elementi geologici, carsici, strutturali ed idrogeologici, integrata con i dati derivanti dal rilievo sul terreno, dei dintorni della cava di gesso di Monte Tondo (MARGUTTI 2009).

spetto al naturale deflusso delle acque. Le gallerie di cava si sviluppano su 5 livelli principali comunicanti attraverso: fornelli, fori di drenaggio, gallerie o vie di accesso sotterranee ed inoltre, una galleria d'ispezione che si apre nelle gallerie di accesso alla riservetta e comunica con la galleria del nastro trasportatore (vedi l'intervento di MARGUTTI *et alii* in questo stesso volume). La circolazione idrica all'interno delle gallerie di cava è pertanto condizionata sia dalla presenza di connessioni tra le diverse quote delle gallerie, che soprattutto dall'intercettazione dei condotti carsici attivi.

Si possono pertanto riconoscere due sistemi di drenaggio principali (fig. 11), che collegano quote differenti presentando un emissario visibile verso l'esterno delle gallerie, ed altri otto sistemi minori che non hanno sbocchi apparenti o la cui connessione con i due sistemi principali non è chiara o è solo parziale e saltuaria. Il passaggio di acqua da una quota all'altra può avvenire anche attraverso condotti carsici,

fratture, faglie, filtrazione, sfornellamenti o scorrimento, quest'ultimo controllato dai livelli pelitici che di fatto possono intersecare le gallerie a quote differenti (vedi l'intervento di MARGUTTI *et alii* in questo stesso volume).

Il *primo sistema di drenaggio* ("sistema principale 1" in fig. 11) prende origine prevalentemente dalle acque raccolte dall'anfiteatro di cava ed in misura minore dalle venute d'acqua da fratture, in parte carsificate, riconducibili al carsismo. Il suo percorso ha inizio dalle gallerie di quota 200 m s.l.m., dove le acque si raccolgono per transitare poi a quota 160 m s.l.m. ed uscire dalla galleria di quota 140 m s.l.m.. Da qui poi si riversano a quota 95 m s.l.m. fino a confluire nel Torrente Senio. Il *secondo sistema di drenaggio* ("sistema principale 2" in fig. 11), al contrario, è di origine chiaramente carsica ed ha inizio in corrispondenza dell'intersezione tra i condotti carsici con le gallerie della riservetta di quota 115 m s.l.m. Da qui le acque sboccano all'uscita della galleria di accesso al

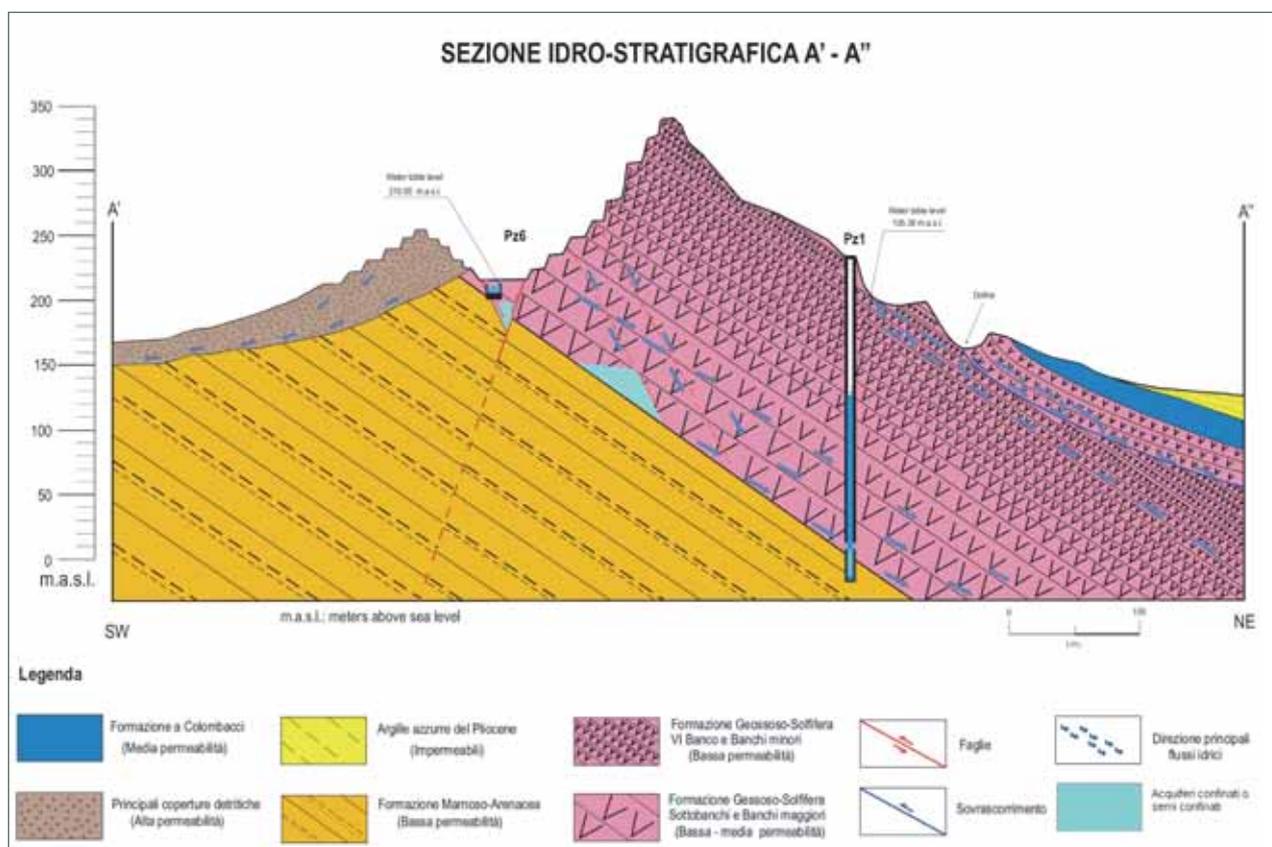


Fig. 14 – Modello concettuale idrogeologico - Sezione idrostratigrafica A'-A'' (SW-NE) dell'area di cava di Monte Tondo e del versante Nord Orientale della Vena del Gesso (MARGUTTI 2009). La traccia della sezione è riportata in figura 13.

frantoio posto a quota 100 m s.l.m. e si riversano anch'esse nel Torrente Senio.

Le venute d'acqua nelle gallerie di cava sono abbastanza disperse; spesso provengono da fornelli, stillicidi o fratture ed il fronte di caduta è ampio, tanto da rendere difficoltoso se non impossibile effettuare prove di portata vere e proprie.

Nel periodo di magra del 2009 sono state eseguite delle prove di portata nei punti con sorgenti il più possibile puntiformi; le misure effettuate, pur non consentendo di formulare un bilancio idrologico completo, tuttavia mostrano alcuni risultati interessanti. La portata maggiore è senza dubbio quella proveniente dalla Grotta del Re Tiberio (fig. 11), corrispondente al *sistema di drenaggio 2* dove è stata misurata (al suo ingresso a quota 100 m s.l.m.) una portata minima di 42 l/min. La portata reale, non misurabile, può essere considerata circa doppia. Le altre grotte, pur costituendo importanti venute d'acqua per i sistemi che si originano alle quote di 200 e 220 m s.l.m., hanno portate che variano tra 0,29 e 0,58 l/min. Tra queste, le maggiori sono

quelle provenienti dall'Abisso Mezzano, la cui acqua si raccoglie in un lago temporaneo, e quella della Buca Romagna che si perde parzialmente nel detrito ed in parte si immette in una canalina.

Oltre alle misure di ingresso dell'acqua nelle gallerie di cava, è stata misurata la portata del torrente che da quota 200 m s.l.m. drena i laghi occidentali ed esce a quota 140 m s.l.m. (*sistema di drenaggio 1*). Anche in condizioni di magra questo torrente aveva una portata (misurata in corrispondenza dei fori di quota 140 m s.l.m. e quindi paragonabile a quella in uscita dai laghi) pari a 9 l/min. Nei laghi occidentali di quota 200 m s.l.m., interessati dal *sistema di drenaggio 1*, è stato valutato un abbassamento giornaliero complessivo, nel periodo di magra, che si aggira intorno ai 7 mm/giorno. Tale risultato implicherebbe, durante periodi di magra e in assenza di apporti, che i laghi appartenenti al *sistema di drenaggio 1*, potrebbero seccarsi completamente nel giro di poche settimane.

Come punto di deflusso delle acque sot-

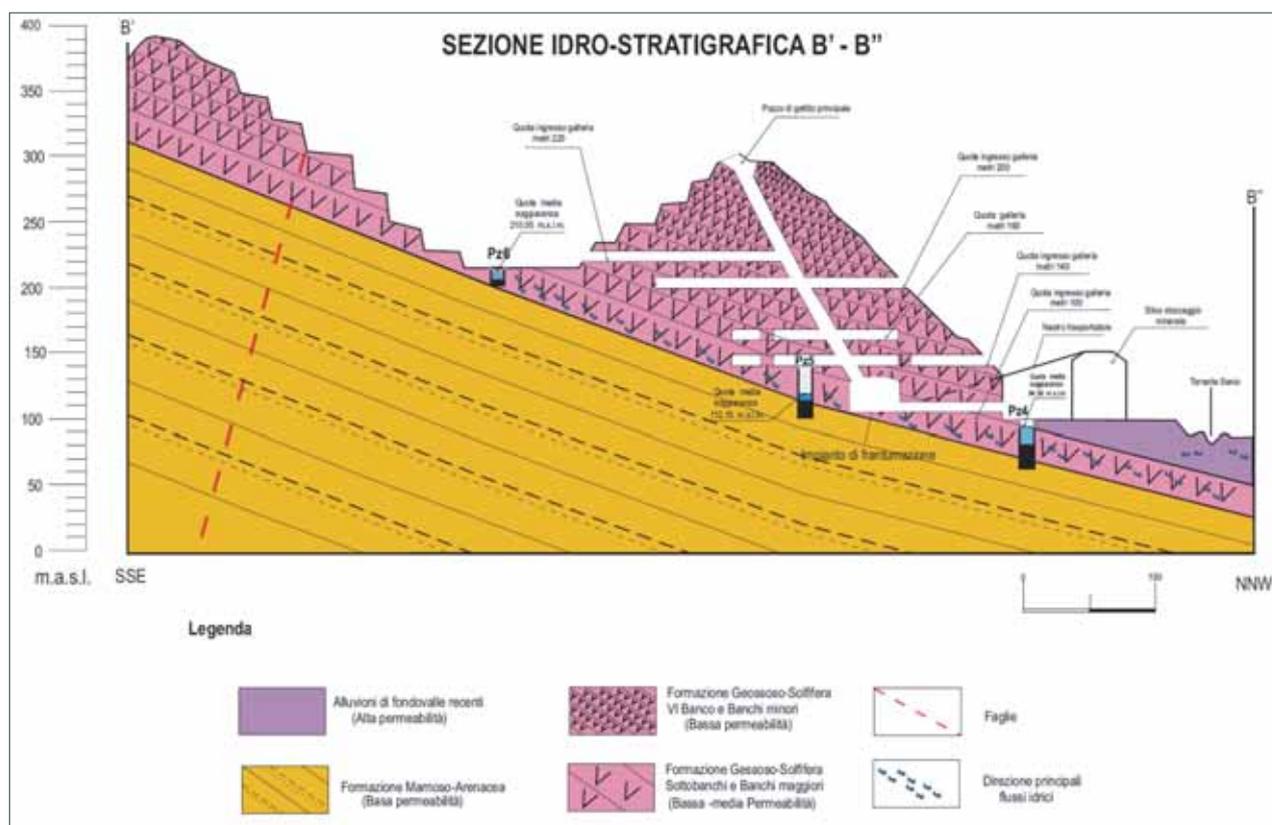


Fig. 15 – Modello concettuale idrogeologico - Sezione idrostratigrafica B'-B'' (SSE-NNW) dell'area di pertinenza della cava di Monte Tondo (MARGUTTI 2009). La traccia della sezione è riportata in figura 13.

terranee all'interno delle gallerie di cava è stata considerata la principale venuta d'acqua riscontrata (denominata "sorgente riservetta", fig. 11), posta a quota 115 m. s.l.m. Oltre ad avere una portata significativa, la venuta ha la caratteristica di non essere diffusa, bensì di avere un deflusso concentrato in corrispondenza di un foro e pertanto con valori facilmente quantificabili. La sorgente è pressoché perenne ed avendo registrato valori di portata di deflusso da 1,5 l/s a 3 l/s è possibile dedurre che allo stato attuale delle conoscenze, il travaso d'acqua dal sistema carsico alle gallerie di cava avvenga per lo più a livello di tale sorgente.

Elaborazione di un nuovo modello idrogeologico

I nuovi dati raccolti nelle campagne 2008-2009 (fig. 16) consentono di definire un nuovo schema idrogeologico (figg. 14-15), caratterizzato dalla circolazione idrica (essenzialmente carsica) che avviene nel II e III ciclo sedimentario evaporitico. Al contrario, le acque più profonde, allocate in strati ascrivibili alla fase deposizionale evaporitica I, sono fossili (o alimentate episodicamente) e sono caratterizzate da

una mobilità ridotta o inesistente. Pertanto, il modello idrogeologico concettuale più realisticamente ipotizzabile per i flussi sotterranei è quello di un multiacquifero nel quale la giustapposizione stratigrafica degli orizzonti semipermeabili (gessi carsificati) e impermeabili (gessi non carsicati e talune superfici di faglie) crea un sistema complesso e difficilmente rapportabile ad un'omogeneità di comportamento (figg. 14-15). La giacitura generale degli strati di gesso e del substrato marnoso (Formazione Marnoso-arenacea) fa sì che gli acquiferi si dispongano "a gradinata", con acquiferi progressivamente più profondi muovendosi verso Nord-Est (fig. 14).

Per quanto riguarda la circolazione idrica nelle gallerie di cava di Monte Tondo sono stati riconosciuti due sistemi di drenaggio principali che collegano le gallerie ubicate a quote differenti.

I due sistemi raccolgono la maggior parte dell'acqua circolante all'interno delle gallerie di cava, hanno alimentazione e recipiti diversi, e i loro percorsi non si incontrano (v. paragrafo precedente). Entrambi i sistemi di drenaggio vengono convogliati all'esterno del sottoterraneo di cava (il primo esce a quota 140 m s.l.m. ed il secondo a quota 100 m s.l.m.), ove attraverso sistemi di canalette artificiali vengono riversa-

ANALISI SUL CAMPO		RILIEVI SUL CAMPO	
Conducibilità elettrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$; fig. 21) pH (fig. 22) Temperatura ($^{\circ}\text{C}$) Potenziale redox (MV) Ossigeno disciolto (mg/l)		Misure freaticometriche nei pozzi (livello di soggiacenza)	
ANALISI IN LABORATORIO			
Costituenti principali e in traccia		Metalli in tracce	Composizione isotopica
Calcio	Bicarbonato	Stronzio	Deuterio
Magnesio	Solfato	^{18}O Ossigeno	
Sodio	Nitrato	Composti organici	
Potassio		Olii minerali	
Cloruro			

Tab. 3 – Schema sinottico delle analisi in sito e di laboratorio eseguite sulla fase liquida.

NUM.	LUOGO (QUOTA)	CAMPAGNA 2008		CAMPAGNA 2009	
		1° CICLO	2° CICLO	1° CICLO	2° CICLO
BM-1	Risorgiva Ca' Boschetti (92 m s.l.m.)	22/05/2008		04/05/2009	
BM-2	Galleria (100 m s.l.m.)	22/05/2008	03/09/2008		
BM-3	Piazzale impianti (100 m s.l.m.)	22/05/2008	03/09/2008		
BM-4	Discenderia riservetta (140 m s.l.m.)	22/05/2008	03/09/2008		
BM-5	Ingresso gallerie (140 m s.l.m.)	22/05/2008	03/09/2008		
BM-6	Grotta Re Tiberio	22/05/2008			
BM-7	Piazzale cava - bacino di raccolta acque (217 m s.l.m.)	22/05/2008			
BM-8	Piezometro in S2 (-15 m da p.c.)	19/06/2008	02/09/2008		
BM-9	Piezometro in S2 (-85 m da p.c.)	19/06/2008	02/09/2008		
BM-10	Piezometro in S2 (-135 m da p.c.)	19/06/2008	02/09/2008		
BM-11	Piezometro superficiale in SIA 3	19/06/2008	03/09/2008		
BM-12	Piezometro in S1 (fondo)	19/06/2008	02/09/2008		
BM-13	Torrente Senio a monte del piazzale impianti	20/06/2008	03/09/2008		03/07/2009
BM-14	Torrente Senio a valle del piazzale impianti	20/06/2008	03/09/2008		
BM-15	Scarico acque drenate dalla galleria 100	20/06/2008	03/09/2008		
BM-16	Torrente Senio a valle dell'area di ricerca (loc. Borgo Rivola)	20/06/2008	03/09/2008		
BM-17	Salse o vulcanetti di fango (loc. Bergullo)	20/06/2008	02/09/2008		
BM-18	Venuta d'acqua galleria 200 m s.l.m. - sotto officine	19/06/2008			
BM-19	Ingresso gallerie (140 m s.l.m.)		03/09/2008		
BM-20	Sorgente solforosa (a monte della cava)		03/09/2008		
BM-21	Piezometro in S3 (-35 m da p.c.)			04/05/2009	
BM-22	Piezometro in S3 (-95 m da p.c.)			04/05/2009	
BM-23	Piezometro in S3 (-160 m da p.c.)			04/05/2009	
BM-23BIS	Piezometro in S3 (-150 m da p.c.)				03/07/2009
BM-24	Piezometro in S4 (-20 m da p.c.)			04/05/2009	03/07/2009
BM-25	Piezometro in S5 (-35 m da p.c.)			04/05/2009	
BM-25BIS	Piezometro in S5 (-25 m da p.c.)				03/07/2009
BM-26	Piezometro in S6 (-10 m da p.c.)			04/05/2009	03/07/2009
BM-27	Piezometro in S7 (-14 m da p.c.)			04/05/2009	03/07/2009
BM-28	Torrente Senio (abitato Casola Valsenio)			04/05/2009	

Tab. 4 – Tabella di riepilogo dei punti di prelievo e delle date relative alle quattro sessioni di campionamento (fig. 18A).

ti nel Torrente Senio. I vuoti minerari di cava Monte Tondo hanno in parte inevitabilmente condizionato l'idrodinamica originaria delle acque sotterranee dell'area carsica in esame; l'intersezione tra gallerie di cava e grotte ha generato la disattivazione di diversi tratti di ca-

vità o reso attivi tratti "fossili", complicando e modificando l'originaria circolazione idrica. A causa della suddetta interazione, la situazione idrica nei sotterranei risulta molto più complessa di quanto evidenziato nei precedenti lavori (FORTI *et alii* 1997; GARAVINI 1997; ERCOLANI *et alii* 2003).

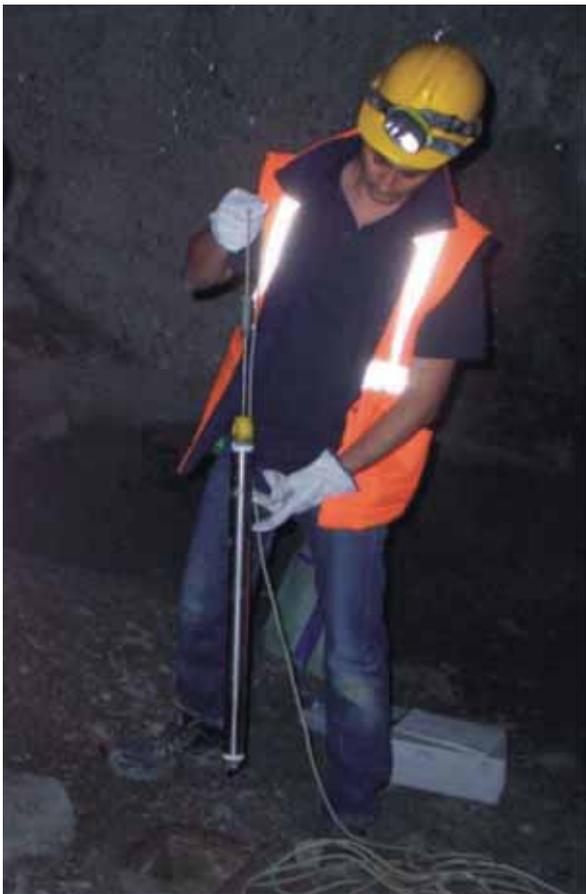


Fig. 16 – Fasi di campionamento con bailer in acciaio (*well sampler*) nel piezometro S2 ubicato nella galleria di quota 200 m s.l.m. (foto Archivio GYPROC Saint-Gobain).



Fig. 17 – Misura dei parametri chimico-fisici mediante immersione in acqua corrente. Punto di misura M42 (emissario del sistema di drenaggio 1 a quota 200 m s.l.m.) (foto Archivio GYPROC Saint-Gobain; GHISELLI *et alii* 2008).

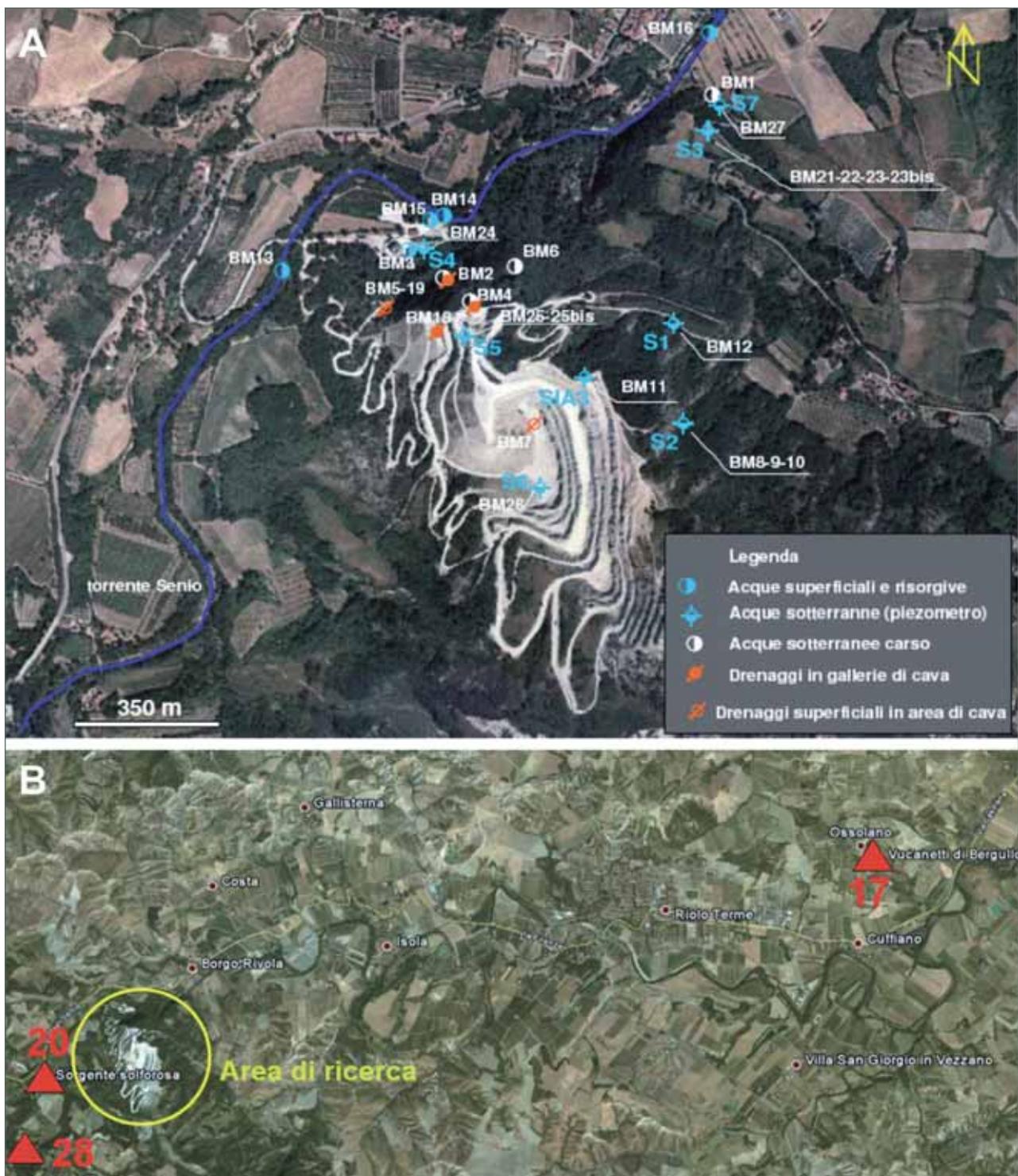


Fig. 18 – A) Ubicazione dei punti di prelievo (BM) delle acque superficiali e sotterranee nell’area di cava di Monte Tondo e della Vena del Gesso - campagne di campionamento 2008 e 2009 (foto aerea “VoloItalia 2001”, modificata da MARGUTTI 2009). B) Ubicazione dei punti di prelievo (BM) di sorgenti e acque superficiali esterne all’area di ricerca - campagne di campionamento 2008 e 2009 (modificato da GoogleEarth).

Ai fini ingegneristici minerari e di pianificazione delle attività estrattive, gli acquiferi profondi non dovrebbero generare particolari problemi alle attività di scavo svolte agli attuali livelli produttivi. Secondo il modello proposto, l’attività a cielo aperto (sopra i 250 m s.l.m.), spostandosi

in direzione Nord-Est, non potrà intercettare acquiferi di una certa consistenza e, al contrario, potrebbe favorire l’alimentazione degli acquiferi intermedi e superficiali per effetto del disboscamento e della riduzione della copertura. Le attività in galleria invece, se estese verso Est e Sud-Est

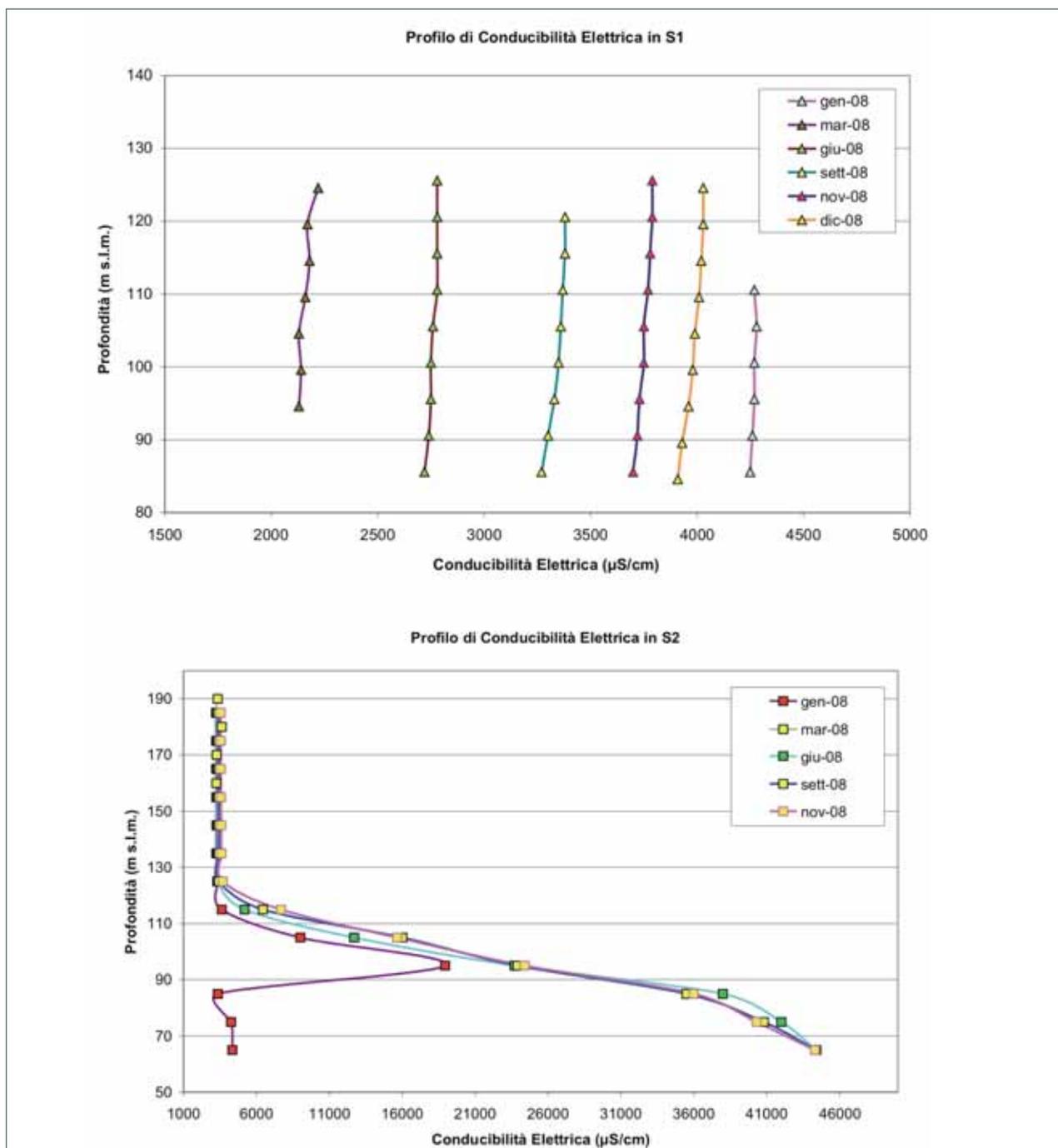


Fig. 19 – Profilo di conducibilità elettrica dei pozzi S1-S2 (da gennaio a dicembre 2008). Nel pozzo S1 il parametro di conducibilità elettrica è omogeneo con l'aumentare della profondità della colonna d'acqua, mentre le variazioni sono verosimilmente imputabili ai periodi stagionali; difatti si passa da un minimo di 2.200 $\mu\text{S}/\text{cm}$ in primavera, ad un massimo valore di 4250 $\mu\text{S}/\text{cm}$ nella stagione invernale. Viceversa, il pozzo S2 ha registrato per tutto l'anno 2008 valori di conducibilità elettrica variabili ed estremamente elevati al di sotto della profondità di 110 m s.l.m. (sino a circa 47.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$), mentre i valori sono rimasti costanti in relazione ai periodi stagionali (da MARGUTTI 2009).

potrebbero impattare con la circolazione idrica intersecando, presumibilmente ad una quota compresa tra 190 e 200 m s.l.m., il sistema acquifero dell'Abisso Mezzano. L'abbassamento del crinale della Vena del Gesso, seppure gravoso dal punto di vista paesaggistico e dell'impatto visivo, non ha apportato un'effettiva variazione alla cir-

colazione idrica superficiale ed ipogea.

Caratterizzazione idrochimica delle acque superficiali e sotterranee: dati raccolti

La presenza di vuoti minerali può velocizzare i processi di infiltrazione e percola-

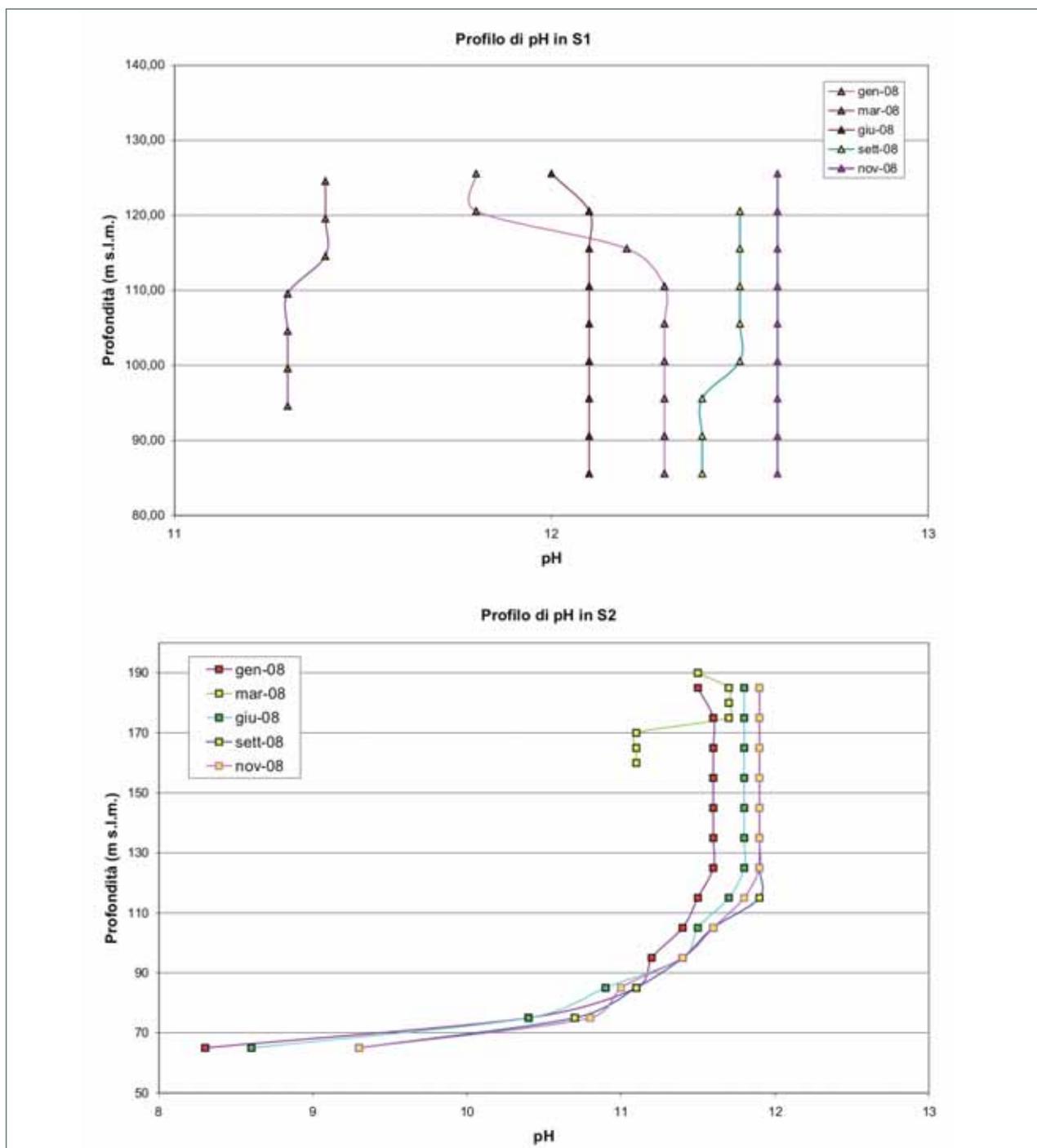


Fig. 20 – Profilo del pH dei pozzi S1-S2 (da gennaio a dicembre 2008). La colonna d’acqua del pozzo S1 mostra un pH variabile stagionalmente, con valori da 11.4 (in tarda primavera) a 12.6 (in inverno). Diversamente, nel pozzo S2, il pH non risente dell’effetto delle precipitazioni, rimanendo costante durante l’anno, mentre variano i parametri con la profondità; difatti, il pH diminuisce all’aumentare della profondità, passando da 12 a circa 8 (da MARGUTTI 2009).

zione, aumentando il rischio di un eventuale inquinamento delle falde acquifere, in quanto il possibile rilascio di sostanze pericolose (ad esempio nitrati ed idrocarburi) può avvenire in profondità, all’interno dell’ammasso roccioso stesso.

L’analisi idrochimica delle acque superficiali e sotterranee rappresenta quindi un utile strumento per comprendere quanto

l’attività estrattiva incida sull’ambiente circostante e, soprattutto, sull’idrologia e sull’idrogeologia di una zona e fortemente sfruttata per la qualità terapeutica delle sue acque e delle sorgenti termali.

La caratterizzazione geochemica delle acque superficiali (tab. 3) e sotterranee è stata condotta attraverso due campagne di campionamento nel biennio 2008-2009,

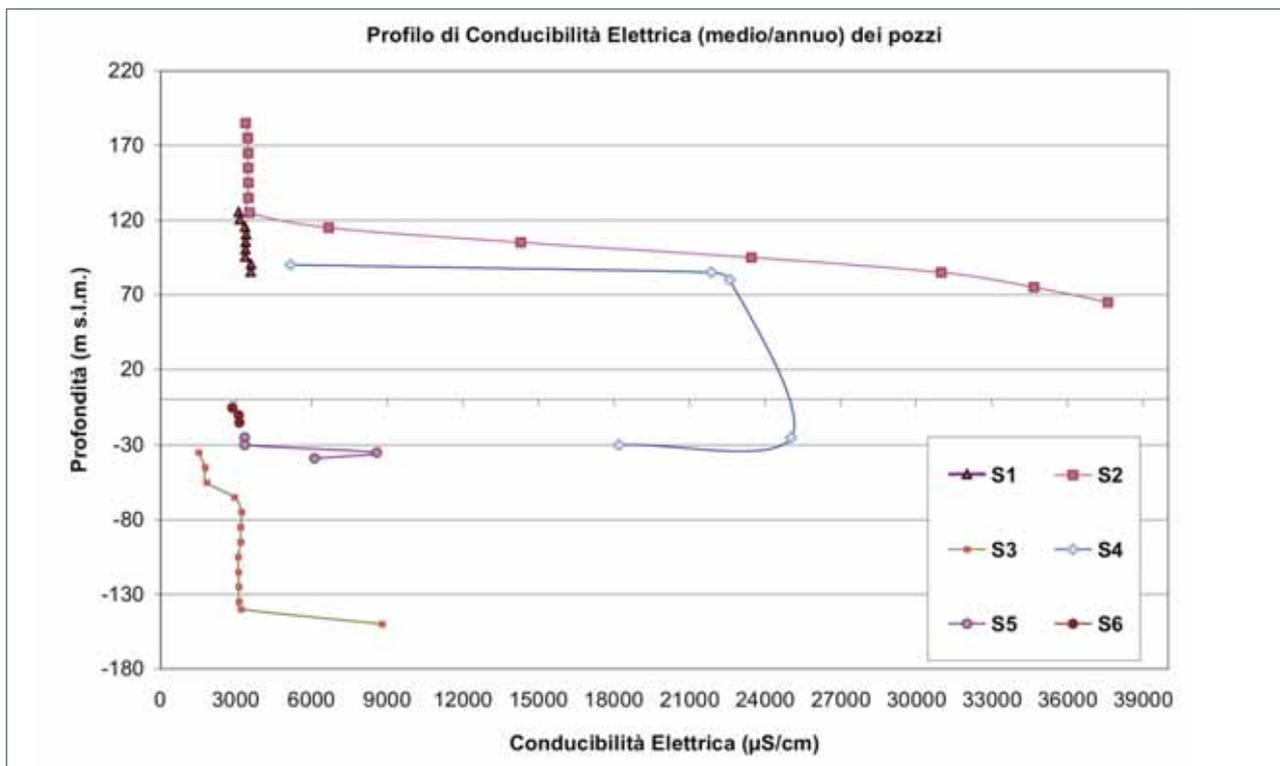


Fig. 21 – Profilo medio di conducibilità elettrica dei pozzi S1 e S2 (su base media/annua 2008) e dei pozzi S3, S4, S5 e S6 (su base media/primo semestre 2009; da MARGUTTI 2009).

entrambe eseguite con due cicli di prelievo, uno in periodo di magra ed uno in periodo di morbida (tab. 4).

All'atto del campionamento, al fine di ottenere dati idrochimici accurati, sono stati misurati sul terreno i parametri chimico-fisici riportati in tab. 3. I piezometri profondi, visto il ridotto diametro dei tubi e l'elevata profondità di campionamento, hanno reso necessario l'uso di un freatimetro da 150 m con sonda multiparametrica *SEBA Hydrometrie KLL-Q*. Attraversi questi strumenti è stato possibile rilevare la stratigrafia idrochimica dei pozzi lungo tutta la colonna d'acqua, consentendo inoltre di selezionare il punto di prelievo sulla base delle evidenti variazioni dei parametri misurati.

Nei paragrafi successivi saranno discussi solo alcuni dei risultati ottenuti in questa fase del lavoro di ricerca.

Al fine di eseguire le analisi di laboratorio su fasi liquide rappresentative dell'area di prelievo, durante le attività di campionamento è stato necessario recuperare un adeguato quantitativo di acqua; per tale ragione, per il campionamento di pozzi

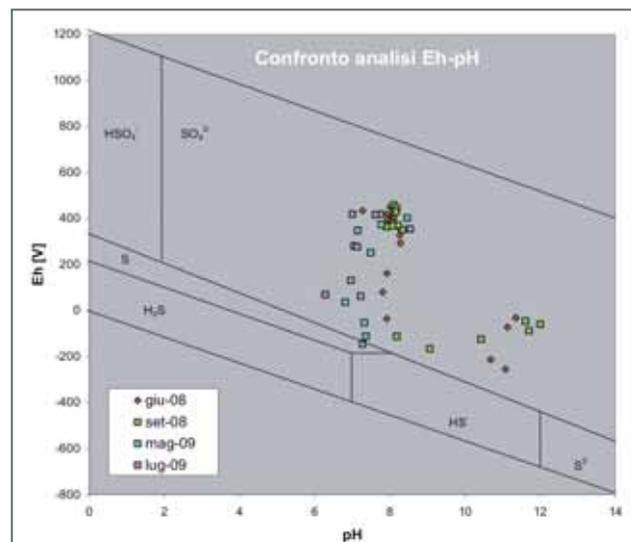


Fig. 22 – Diagramma Eh-pH - confronto tra le campagne di campionamento 2008 e 2009 (da MARGUTTI 2009).

profondi è stato impiegato un *well sampler*, come mostrato in fig. 16. Tale strumentazione di campionamento ha consentito inoltre di effettuare un prelievo selettivo delle acque alla profondità prescelta. Le acque prelevate nello studio in oggetto si dividono nelle seguenti tipologie (tab. 4):

- acque superficiali (Torrente Senio);
- drenaggi superficiali in area estratti-

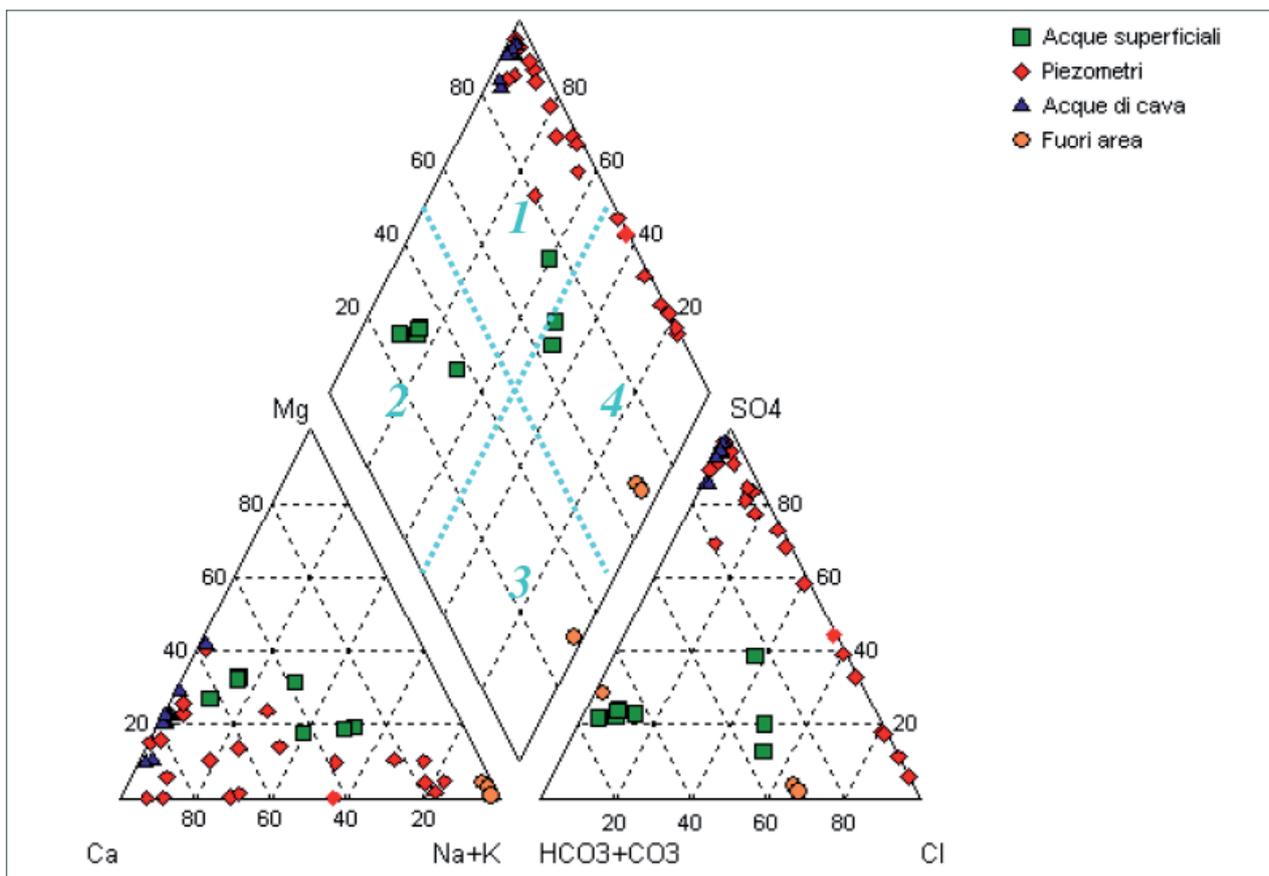


Fig. 23 – Diagramma di classificazione delle acque di Piper (dati campagne 2008 e 2009 a confronto). Separate dalle linee tratteggiate color ciano vengono individuate le quattro tipologie di acque: 1 = Acque Solfato-clorurate Calcio-magnesiache; 2 = Acque Bicarbonato Calciomagnesiache; 3 = Acque Bicarbonato Sodiche; 4 = Solfato-clorurato Sodiche (da MARGUTTI 2009).

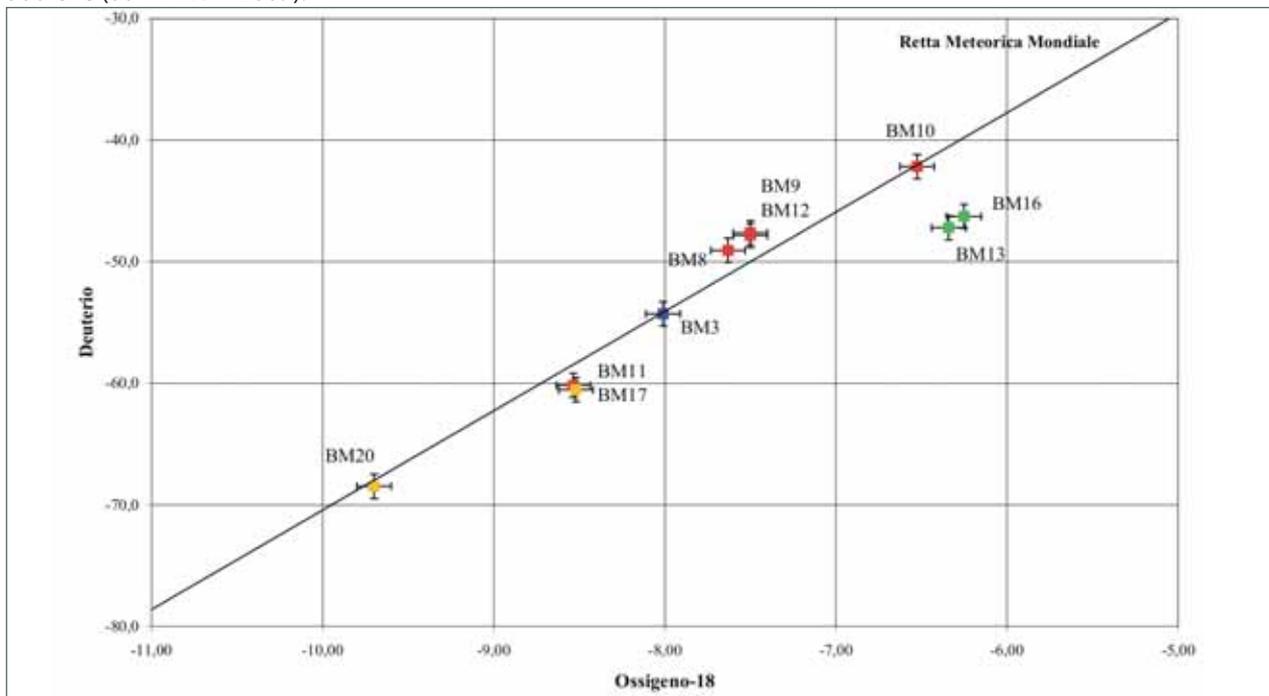


Fig. 24 – Diagramma di Craig con evidenziata la retta delle acque meteoriche mondiali (RMM). I campioni studiati sono rappresentati con due linee a croce che rappresentano le barre di errore del deuterio e dell'¹⁸O. In termini teorici, Craig aveva scoperto che plottando i rapporti isotopici tra deuterio e ¹⁸O in un diagramma, tutti i campioni di acque meteoriche (acque piovane ed acque dolci superficiali), si dispongono su una retta (la Retta Meteorica Mondiale) ed il posizionamento delle stesse, all'interno del grafico, permette di fare considerazioni sull'origine delle acque, individuandone la ricarica o l'eventuale evaporazione (da MARGUTTI 2009).

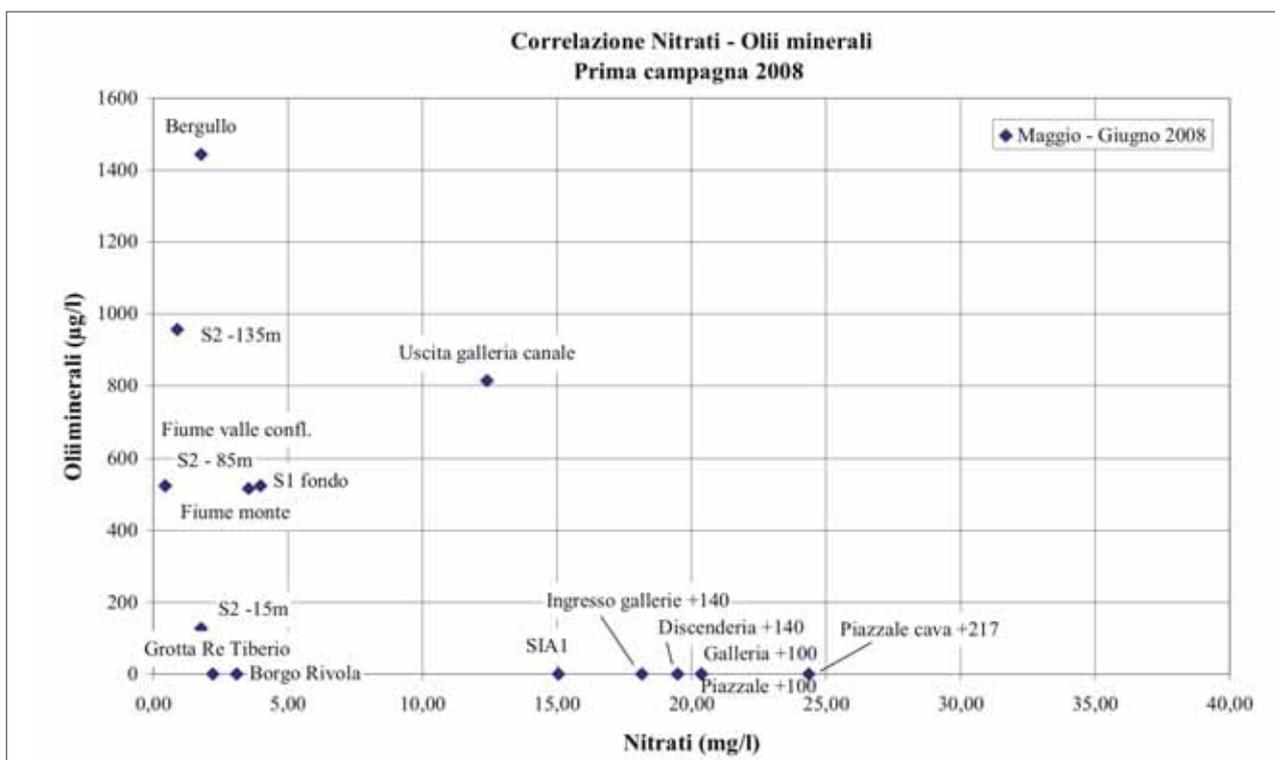


Fig. 25 – Diagramma Olii minerali-Nitrati (periodo di morbida 2008; da LabAnalysis di Pavia).

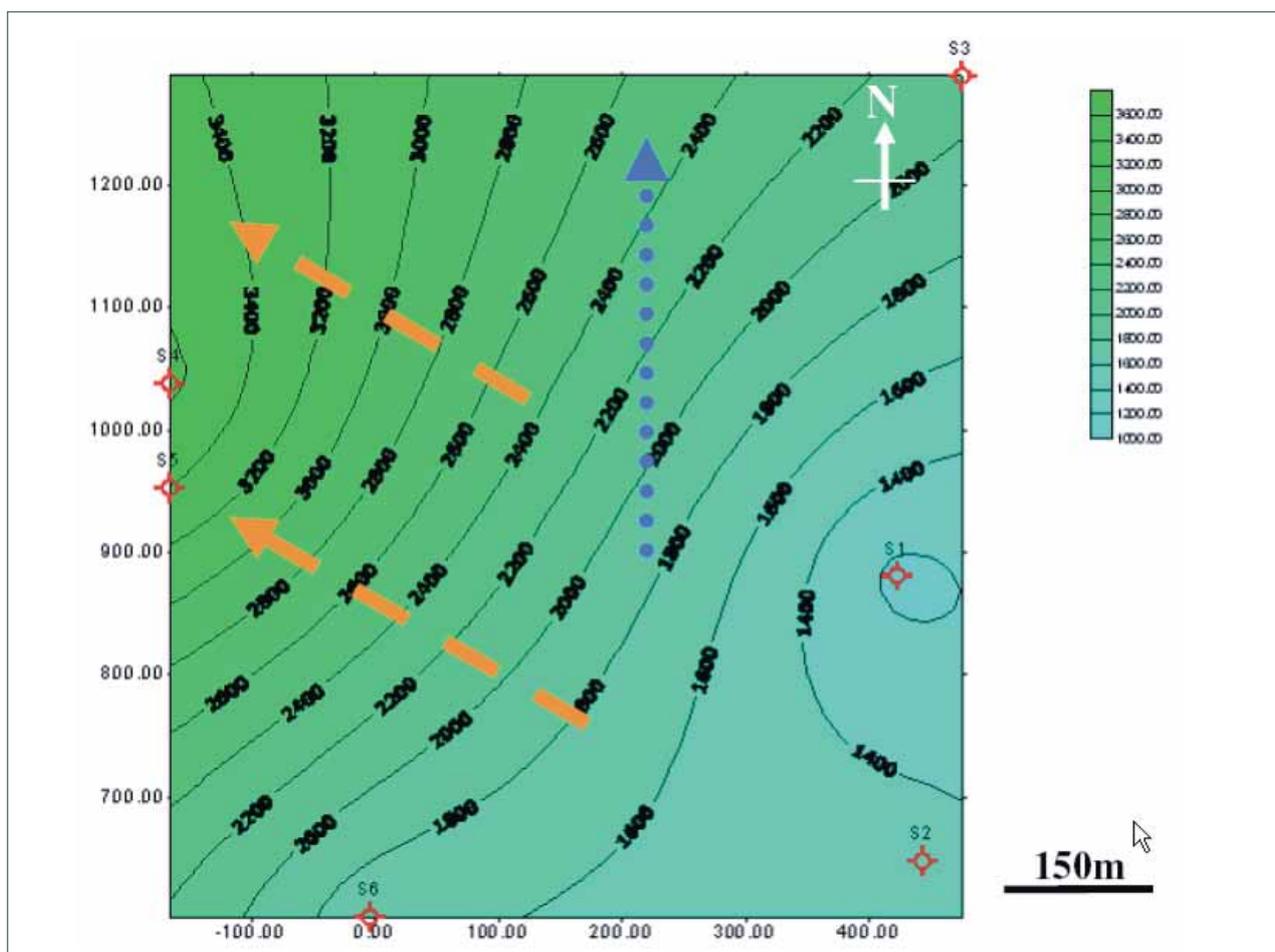


Fig. 26 – Mappa delle isocrone di concentrazione dello ione solfato in mg/l. Le frecce di colore arancione indicano la direzione di arricchimento delle acque in solfati, mentre la freccia blu indica la direzione di falda ipotizzata per un unico acquifero (da MARGUTTI 2009).

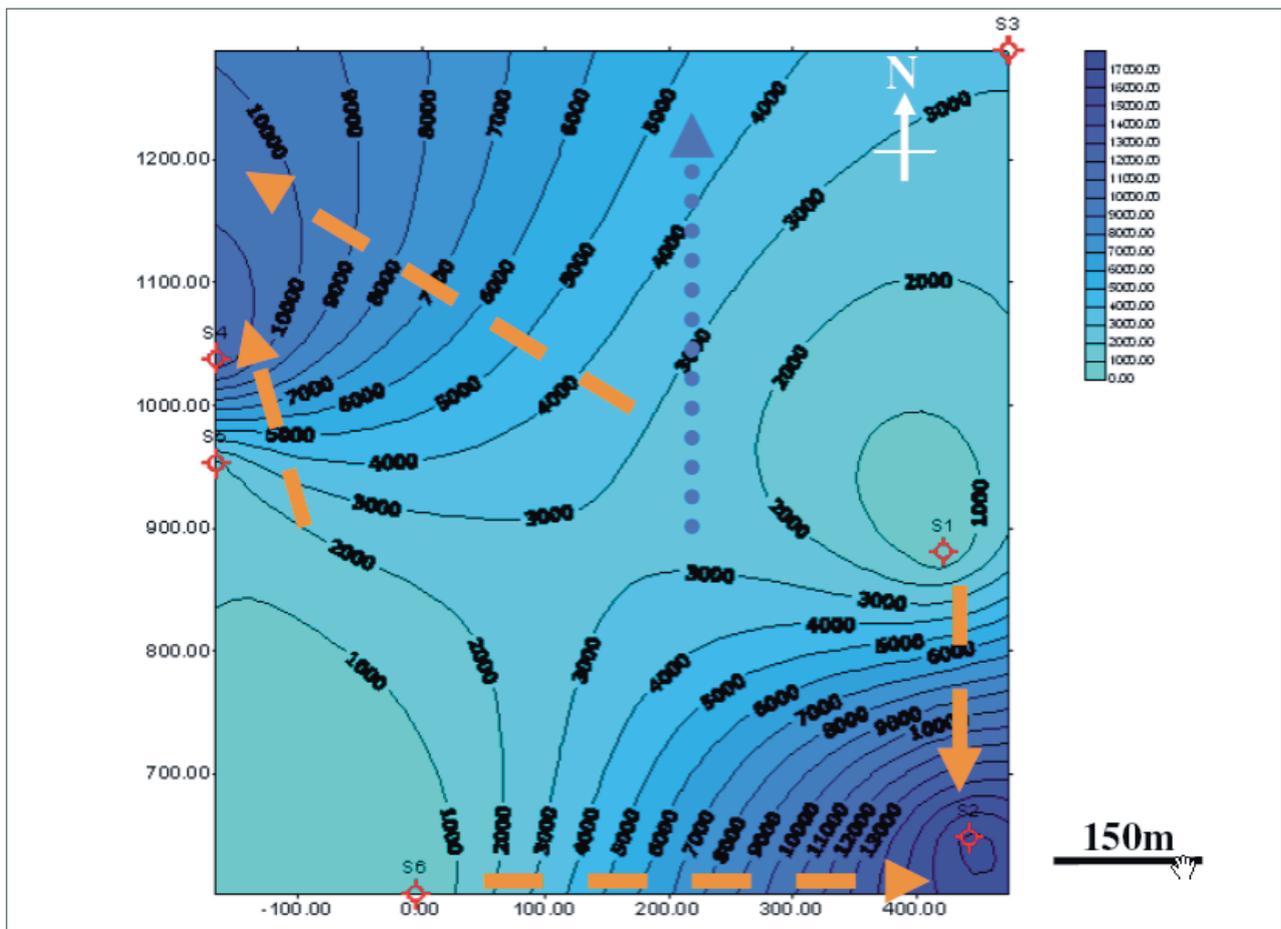


Fig. 27 – Mappa delle isocrone di concentrazione dello ione cloruro in mg/l. Le frecce di colore arancione indicano la direzione di arricchimento delle acque in cloruri, mentre la freccia blu indica la direzione di falda ipotizzata per un unico acquifero (da MARGUTTI 2009).

va (meteoriche e/o sotterranee drenate dalle gallerie di cava);

- acque sotterranee, intercettate dai vuoti minerali, di varia natura (carsiche, meteoriche raccolte in cava, da fratture e/o livelli pelitici-marnosi);
- acque sotterranee in piezometri profondi;
- acque carsiche in grotta (o da risorgenti carsiche);
- sorgenti solforose e salse (“vulcanetti di fango”).

Nell’ambito della caratterizzazione idrologica e idrodinamica delle gallerie di cava, descritta precedentemente, sono state inoltre eseguite numerose misurazione dei parametri fisici delle acque (GHISELLI *et alii* 2008). Le prove sono state effettuate in acqua corrente (canaline e scorimenti) (fig. 17), in acqua ferma (pozze e laghi) e in secchi; queste ultime allo scopo

di effettuare misure in acque provenienti da stillicidi e/o sorgenti non misurabili per immissione diretta della sonda. L’ubicazione dei punti di prelievo, interni all’area di ricerca, è riportata in fig. 18A.

Al fine di ottenere un inquadramento idrochimico il più completo ed esaustivo possibile, non ci si è limitati allo studio dei luoghi minerali, ma si è cercato di caratterizzare una zona più ampia, in relazione alla complessità geologica strutturale dell’area in esame. Per tale ragione, sono stati individuati alcuni punti di prelievo esterni all’area di ricerca, corrispondenti alla sorgente solforosa (BM 20), alle salse di Bergullo (BM17) ed alle acque del Torrente Senio, campionate a monte della cava (in località Casola Valsenio; fig. 18B). Per la metodologia di campionamento si rimanda a BORGHI (2008) e MARGUTTI (2009).

Profili idrochimici dei pozzi

I rilievi in pozzo con l'ausilio di sonda multiparametrica risultano d'interesse per l'individuazione di eventuali chimismi differenti ed indizi di fasi inquinanti nelle acque sotterranee (figg. 19-20).

I valori di conducibilità elettrica rilevati nei pozzi S1 e S2 (fig. 19) sono nettamente differenti, a dimostrazione di un chimismo delle acque sotterranee complesso e diversificato. Dal grafico di rappresentazione dei profili medi di conducibilità elettrica (fig. 19), misurati nell'arco del 2008 nei pozzi S1 e S2, e nei primi 7 mesi del 2009 nei pozzi di nuova realizzazione (da S3 a S6), si nota come il parametro della conducibilità possa costituire un importante indicatore idrochimico. Difatti, dalla visione d'insieme delle conducibilità misurata nei pozzi (fig. 21), si evince come le acque dei pozzi S2 e S4 si differenzino ad una profondità ben definita, per gli elevati valori di conducibilità rispetto agli altri pozzi, facendo ipotizzare la presenza di acque salate (fossili, confinate o semi-confinate). Diversamente, i valori di conducibilità elettrica misurati nelle acque dei pozzi S1, S3, S5 e S6 sono mediamente costanti (dell'ordine dei 3.000-4.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$). Laddove si apprezzano dei picchi localizzati (sino ad un massimo di 9.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$), non sono comunque paragonabili ai valori crescenti di S2 e S4 che, dalla profondità di circa 110-100 m s.l.m., passano nei successivi 10-20 metri di profondità da valori medi di conducibilità compresi tra 6.000-9.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ a valori compresi tra 26.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (in S4) e 39.000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (in S2), per poi decrescere, come ben evidente per le acque del pozzo S4, dalla profondità di circa - 30 m s.l.m.

Classificazione chimica delle acque

Il diagramma Eh-pH delle specie solforate in soluzione indica che le acque analizzate ricadono nelle specie SO_4^{2-} , campo dominante delle acque naturali (fig. 22).

Il diagramma di classificazione proposto

da Piper (fig. 23) indica che tutti i campioni di cava (sia per il prelievo di magra che di morbida) si posizionano nel campo delle acque solfato-clorurate calcio-magnesiache, poiché chiaramente risentono maggiormente dell'interazione con i gessi presenti. Al contrario, le acque superficiali mostrano una spiccata evoluzione tra giugno e settembre: infatti, nel periodo di morbida possono essere identificate come acque bicarbonato calcio-magnesiache, mentre nel periodo di magra possono essere classificate, almeno per due di esse, al limite fra le solfato-clorurate calcio-magnesiache e le solfato clorurato-sodiche.

Questo comportamento suggerisce che le acque superficiali possano essere alimentate da circuiti idrici sotterranei.

Nell'area oggetto di studio, considerati gli aspetti geologico-sedimentari e tettonici peculiari della Vena del Gesso, le acque clorurato-sodiche sono considerate come acque di fondo ("acque fossili") di bacini sedimentari, intrappolate nel sottosuolo al di sotto di spesse coperture di sedimenti poco permeabili o impermeabili (come le argille plioceniche), che riescono a salire e fuoriuscire attraverso sistemi di fratture e di faglie (MARTINELLI *et alii* 1999; CONTI *et alii* 2000).

Un'analisi isotopica è stata condotta sui campioni più rappresentativi, scelti tra quelli del periodo di magra. Il diagramma di Craig (fig. 24), che mette in relazione la composizione in deuterio e in ^{18}O , evidenzia come i dati siano prossimi alla retta meteorica mondiale, sia per i campioni esterni all'area di cava, che per quelli dei piezometri. Al contrario, i campioni delle acque superficiali, visto il chiaro scostamento dalla retta hanno probabilmente un'origine locale, da mettere probabilmente in relazione ai depositi evaporitici.

Analisi degli idrocarburi e dei nitrati

La determinazione degli idrocarburi (e delle loro variazioni stagionali) è di grande importanza in quanto queste analisi

consentono di riconoscere eventuali fenomeni di inquinamento legati al ciclo produttivo di cava, oppure di individuare una loro origine naturale.

Le analisi degli idrocarburi sono state condotte sui campioni della prima campagna di campionamento (2008). Le concentrazioni dei campioni prelevati in cava presentano valori al di sotto dei 10 µg/l, mentre i campioni dei piezometri e delle acque superficiali presentano concentrazioni di idrocarburi costantemente al di sopra dei 100 µg/l (fig. 25).

Per meglio comprendere se la presenza degli idrocarburi nelle acque di cava sia di origine naturale piuttosto che di derivazione antropica, è stato importante confrontare i valori ottenuti con quelli della concentrazione di nitrati misurata nei medesimi campioni. Nel periodo di morbida (fig. 25), corrispondente al mese di giugno 2008, il contenuto di idrocarburi nelle acque sotterranee aumenta con la profondità di campionamento, mentre restano bassi e stabili le concentrazioni dei nitrati (< 5 mg/l). Le acque carsiche hanno bassi valori di oli minerali e di nitrati, mentre le acque meteoriche drenate in cava e nelle sue gallerie, pur avendo concentrazioni di nitrati crescenti man mano che ci si avvicina ai livelli produttivi (piazzale di cava), sono caratterizzate da valori di idrocarburi costanti, e comunque inferiori a 10 µg/l. La concentrazione dei nitrati nelle acque meteoriche potrebbe essere correlata ad un fenomeno di inquinamento ascrivibile ai residui solidi degli esplosivi in cava. Al contrario, i dati a disposizione per le diverse tipologie di acque analizzate sembrano confermare l'assenza di un apporto di idrocarburi proveniente dal ciclo produttivo di cava. Sembra più plausibile pensare che le concentrazioni riscontrate siano relative ad una qualche origine naturale. Questa considerazione è avvalorata dal fatto che la ridotta circolazione di acque nel periodo di magra non ha comportato aumenti nelle concentrazioni, ma al contrario ha determinato netti decrementi, probabilmente a causa di una minore interazione con

fluidi in circolazione nelle intercalazioni marnose e bituminose presenti tra un ciclo evaporitico e l'altro.

Mappatura geochimica: isocrone ione solfato e ione cloruro

L'analisi delle mappe di isoconcentrazione dello ione solfato (fig. 26) e dello ione cloruro (fig. 27) conferma la complessità della circolazione idrica sotterranea e il differente chimismo che caratterizza l'area. Nella mappa dello ione solfato (fig. 26) le isolinee si arricchiscono in direzione Nord-Ovest; infatti, le isolinee del solfato presentano concentrazioni di 1400 mg/l nel bacino idrologico di Nord-Est (a Est dello spartiacque della Vena del Gesso; figg. 3-4), ed aumentano ad Ovest dello spartiacque della Vena del Gesso (figg. 3-4), sino a concentrazioni prossime a 4.000 mg/l. La mappa dello ione cloruro (fig. 27) mostra una situazione più complessa, caratterizzata da due direttrici di arricchimento del contenuto in cloruro, di cui una in direzione Nord-Est (con isolinee sino a 10-15.000 mg/l), coincidente con la direzione di arricchimento delle isolinee del solfato, ed una seconda in direzione Sud-Est (con isolinee sino a 17.500 mg/l).

Considerazioni finali sulla qualità delle acque

I risultati delle analisi geochimiche ed isotopiche indicano la presenza di diverse tipologie di acque con nette differenze sia in termini di conducibilità elettrica che di pH. L'utilizzo dei diagrammi Eh-pH e Piper confermano l'esistenza di vari gruppi di acque. In particolare, le acque circolanti in ambiente di cava e quelle campionate nei piezometri esterni all'area estrattiva derivano la loro composizione chimica interamente dalla dissoluzione dei gessi. Fa eccezione il piezometro S2 ubicato in galleria, il quale intercetta acque a elevata salinità (acque clorurato-sodiche), alle

quali sono associati idrocarburi. Queste sono verosimilmente legate alla presenza di strutture tettoniche che consentono la risalita di fluidi profondi (CHIESI *et alii* 2010) e/o il confinamento di acque salmastre. Le acque superficiali rappresentano l'area di recapito di queste due tipologie di acque e, soprattutto in periodo di magra, indicano un forte contributo delle acque a forte salinità. Una sorgente solforosa, campionata all'esterno dell'area di cava, mostra caratteristiche ulteriormente differenti, classificandosi come bicarbonato-sodica. Le analisi isotopiche confermano questa netta differenziazione tipologica che corrisponde dunque anche a origini e circolazioni idriche distinte.

Dal punto di vista dell'interazione fra i processi di cava e la qualità delle acque si deve infine rilevare che non sembrano esserci evidenze dirette d'inquinamento. Per quanto riguarda gli idrocarburi i risultati indicano una loro origine naturale. Le concentrazioni di nitrati presentano valori molto variabili (sempre inferiore al limite di 50 mg/l definito dalla normativa) ed è ipotizzabile che parte di questi possano essere correlati all'utilizzo degli esplosivi di cava e/o agli escrementi dei chiroterteri presenti in diffuse colonie all'interno delle cavità naturali e artificiali.

Fonti inedite (conservate presso Archivio Aziendale Saint-Gobain, Via Ettore Romagnoli, 6 20146 Milano).

M. BORGHI 2008, *Impatto delle attività estrattive sulla qualità delle acque: il polo unico di Monte Tondo (RA)*. Università degli Studi di Pavia, Dipartimento di Scienze della Terra. Msc Thesis in Applied Geological Sciences, Pavia, 118 pp.

A. GHISELLI, M. MERAZZI, A. STRINI 2008, *Studio di dettaglio della Grotta del Re Tiberio*. Relazione tecnica dello Studio Associato GSM – Geo and Speleo Mat-

ters consulting, 48 pp.

R. MARGUTTI 2009, *Il polo estrattivo della Vena del Gesso romagnola (cava di gesso Monte Tondo, loc. Borgo Rivola, Ravenna): impatto dell'attività mineraria e delle cavità artificiali sui sistemi ipogei naturali e sulla qualità delle acque sotterranee*, Università degli Studi di Pavia, Dipartimento di Scienze della Terra. Tesi di Dottorato, Pavia, 338 pp.

Bibliografia

D. BALLARDINI, D. BEVILACQUA, F. BONSIGNORE, L. BRANCHI, P. LUCIALLI, I. MONTANARI, F. MONTANARI, D. PEILA, S. PELIZZA, L. VENTURINI, B. VILLANI 2001, *Studio finalizzato alla verifica delle modalità di coltivazione ottimali applicabili al polo estrattivo del gesso in località Borgo Rivola in comune di Riolo Terme, al fine di salvaguardare il sistema paesaggistico e ambientale del polo unico regionale del gesso*, (ARPA, Ingegneria ambientale, Sezione di Ravenna), Bologna.

M. CHIESI, J. DE WAELE, P. FORTI 2010, *Origin and evolution of a salty gypsum/anhydrite karst spring: the case of Poiano (Northern Apennines, Italy)*, "Hydrogeology Journal" 18, pp. 1111-1124.

A. CONTI, E. SACCHI, M. CHIARLE, G. MARTINELLI, G.M. ZUPPI 2000, *Geochemistry of the Formation Waters in the Po Plain (Northern Italy): an Overview*, "Applied Geochemistry" 15, pp. 51-65.

M. ERCOLANI, P. LUCCI, B. SANSAVINI 2003, *Esplorazione dei sistemi carsici del Re Tiberio e dei Crivellari e salvaguardia dell'area di Monte Tondo (Vena del Gesso romagnola) interessata dall'attività di cava*, in P. FORTI (ed.), *Gypsum Karst Areas in the World: their protection and tourist development*, (Mem. Ist. It. Spel., s. II, vol. 16), Bologna, pp. 143-154.

P. FORTI, S. MARABINI, G.B. VAI 1997, *Convenzione con il comune di Riolo Terme sullo studio geologico, idrogeologico e carsico della porzione della Vena del*

- Gesso romagnola interessata dalla cava di gesso di Borgo Rivola*. Relazione preliminare, Bologna, 28 maggio 1997 (<http://www.venadelgesso.org/testi/cave/fortimarabinivai/cava5.htm>).
- D. GARAVINI 1997, *Un torsolo di monte*, "Speleologia Emiliana", s. 4, 23 (8), pp. 10-24.
- A. GHISELLI, M. MERAZZI, A. STRINI, R. MARGUTTI, M. MERCURIALI 2011, *Hypogeal geological survey in the "Grotta del Re Tiberio" natural cave (Apennines, Italy): a valid tool for reconstructing the structural setting*, "Central European Journal of Geosciences" 3 (2), pp. 155-168.
- S. GIAQUINTA (a cura di) s.d., *Qualità delle acque interne superficiali della Provincia di Ravenna: Report 2000*, Ravenna (http://www.arpa.emr.it/cms3/documenti/_cerca_doc/acqua/ra/ra_report2000acque_sup.pdf).
- G. MARTINELLI, A. MINISALE, C. VERRUCCHI 1999, *Geochimica delle acque sotterranee della pianura emiliano-romagnola*, in *Geologia delle Grandi Aree Urbane*, (Atti del Convegno), (C.N.R., Regione Emilia-Romagna), Bologna.
- SPELEO GAM MEZZANO 2011, *Sistema carsico del Re Tiberio*, in A. ROSSI, P. LUCCI (a cura di), *Speleologia e geositi carsici in Emilia-Romagna*, Bologna, pp. 362-365.
- D. UBALDI, G. PUPPI, A.L. ZANOTTI 1996, *Carta fitoclimatica dell'Emilia-Romagna 1:500.000*, (Regione Emilia-Romagna), Bologna.

Siti internet

www.arpa.emr.it/sim/

Ringraziamenti: Antonello Fanti (Studio di Ingegneria Ing. Antonello Fanti) per aver concesso la pubblicazione della fig. 1; Federico Cucco e Michele Mercuriali di Saint-Gobain PPC Italia S.p.A. per la loro collaborazione; i revisori Piero Lucci e Stefano Piastra per aver migliorato la prima bozza dell'articolo.