

Engineering  
Hydro  
Environmental

# Geology

Giornale di Geologia Applicata

Rivista dell'AIGA, Associazione Italiana di Geologia Applicata e Ambientale

Volume 14 Supplemento A - Anno 2011

RIASSUNTI PRESENTATI AL CONVEGNO

**ACQUA 2011**

Udine 24-25 febbraio 2011



Engineering  
Hydro  
Environmental

# Geology

Rivista dell'AIGA, Associazione Italiana di Geologia Applicata e Ambientale  
Volume 14 Supplemento A - Anno 2011

## Direttore

Cesare Roda, Università di Udine

## Comitato Editoriale

Il Consiglio Direttivo dell'AIGA

Cesare Roda, Presidente (Udine)  
Pietro Celico (Napoli)  
Corrado Cencetti (Perugia)  
Claudio Cherubini (Bari Politecnico)  
Gianfranco Ciancetti (Pavia)  
Pietro De Paola (Roma)  
Mario Del Prete (Potenza)  
Leonardo Disperati (Siena)  
Walter Dragoni (Perugia)  
Francesco Dramis (Roma Tre)  
Francesco Guadagno (Benevento)

Grazia Martelli (Udine)  
Maurizio Polemio (Bari)  
Alberto Prestininzi (Roma Sapienza)  
Gabriele Scarascia Mugnozza (Roma Sapienza)  
Nicola Sciarra (Chieti)  
Patrizio Signanini (Chieti)  
Vincenzo Simeone (Bari)  
Michele Spizzico (Bari Politecnico)  
Paolo Tacconi (Perugia)  
Mario Valletta (Viterbo)

## Segretaria di redazione

Grazia Martelli, Università di Udine

## Obiettivi di Engineering – Hydro – Environmental – Geology (EHE Geology)

EHE Geology, già Giornale di Geologia Applicata, ha lo scopo di pubblicare ricerche originali, descrizione di casi, rassegne sullo stato dell'arte nel campo della Geologia applicata, intesa nel senso più ampio del termine. Sono inclusi in questa espressione gli studi geologici che hanno rilevanza per l'Ingegneria civile, per la gestione del territorio, per lo sfruttamento delle risorse e per lo sviluppo della sicurezza ambientale. Sono considerati per la pubblicazione anche studi metodologici e rassegne sullo stato dell'arte su specifici problemi. L'obiettivo è quello di contribuire allo sviluppo della Geologia come professione.

© 2009 AIGA. Tutti i diritti sono riservati all'AIGA. Sono autorizzate fotocopie per uso individuale; è autorizzata la riproduzione di parti del volume per uso didattico o scientifico, purché sia citata la fonte. Per ogni altro uso è necessaria l'autorizzazione dell'AIGA.

EHE Geology è un periodico dell'AIGA, Associazione Italiana di Geologia Applicata e Ambientale, registrato presso il Tribunale di Udine in data 27.03.2006 al numero 10/2006.

Indirizzo della redazione: Prof. Grazia Martelli, Dipartimento di Georisorse e Territorio, Via Cottonificio, 114, 33100 Udine. e-mail: [giornale@geoitalia.org](mailto:giornale@geoitalia.org).

I singoli Autori sono responsabili delle opinioni espresse negli articoli. L'AIGA e gli Autori non si assumono nessuna responsabilità per eventuali danni a persone o cose derivanti dalla utilizzazione di idee, osservazioni o metodi riportati negli articoli del Giornale di Geologia Applicata.

**In copertina:** Risorgiva della roggia Fredda a Saciletto di Ruda. La sorgente è uno dei pochi fontanai rimasti allo stato naturale.

*Foto Alberto Bortolan Pirona*

ISSN 2038-0801

Engineering  
Hydro  
Environmental

# Geology

Giornale di Geologia Applicata

Volume 14, Supplemento A – Anno 2011

Riassunti presentati al convegno

**ACQUA 2011**

Udine 24 – 25 febbraio 2011



# ACQUA 2011

Il Consiglio d'Europa ha riconosciuto l'importanza dell'acqua promulgando, il 6 maggio 1968 a Strasburgo, la Carta Europea dell'Acqua. Il primo articolo della Carta afferma: "*Non c'è vita senza acqua. L'acqua è un bene prezioso indispensabile a tutte le attività umane*".

Ne consegue:

- l'importanza dell'acqua come fonte insostituibile di vita che costituisce quindi un diritto per le popolazioni;
- l'importanza dell'acqua come risorsa indispensabile per lo sviluppo sociale ed economico.

La Banca mondiale stima che nel 2035 tre miliardi di persone vivranno in Paesi con problemi idrici.

L'Italia è prima in Europa per il consumo d'acqua e terza nel mondo con 1.200 m<sup>3</sup>/anno pro capite.

L'acqua è uno strumento indispensabile per la crescita economica non solo dei paesi in via di sviluppo, ma anche dei paesi industrializzati. Basti pensare alla Pianura Padana il cui sviluppo industriale ed economico è stato favorito dall'abbondanza delle risorse idriche presenti sul suo territorio; è infatti il più grande serbatoio di acque sotterranee dell'Italia ed alimenta circa 10.000.000 di persone.

L'acqua è una risorsa naturale, variabile nel tempo e nello spazio in relazione agli eventi climatici. Il suo sfruttamento è strettamente sostenibile se il prelievo è in equilibrio con il ciclo idrologico. Le risorse idriche sotterranee, che rappresentano a scala globale oltre il 98% delle acque dolci disponibili, costituiscono pertanto una risorsa rinnovabile ma non inesauribile.

È quindi necessario mettere a punto strumenti, sviluppare metodologie e studi che, attraverso la conoscenza della quantità e della qualità delle risorse, favoriscano l'attuazione di politiche di tutela, gestione e pianificazione nel rispetto di un uso sostenibile.

Il convegno di Udine, organizzato dall'AIGA con la collaborazione del Comitato scientifico formato dai Professori Giovanni Barrocu, Pietro Celico, Gianfranco Ciancetti, Walter Dragoni, Vincenzo Francani, Grazia Martelli, Maurizio Polemio, Giovanni Maria Zuppi, vuole essere il primo di periodici convegni dedicati ai molteplici aspetti dell'utilizzo sostenibile della risorsa acqua

Grazia Martelli

### Relazioni ad invito

- 5 Infopozzi: applicativo web per l'organizzazione, la consultazione e l'analisi dei dati dei pozzi del Friuli Venezia Giulia  
*E. Peressini, Mauro Rainis, Grazia Martelli*
- 6 The geothermal potential of the carbonatic platform buried beneath the Veneto and Friuli coastal areas: results from the Grado-I borehole (NE Italy)  
*B. Della Vedova, A. Cimolino, R. Nicolich, E. Barison, G. Brancatelli*

### Valutazione delle risorse idriche. Le potenzialità degli acquiferi e i criteri di ottimale gestione dei prelievi

- 7 Considerazioni sullo stato dell'approvvigionamento idropotabile nel territorio italiano  
*S. Tersigli, G. Sappa, S. Ramberti, M. T. Coviello*
- 8 Caratteristiche e comportamento della falda acquifera presente nel sottosuolo della miniera di dolomia e dei bacini ipogei di accumulo d'acqua nella Valle di Non (Trento)  
*A. Fuganti, S. Odorizzi, A. Franzinelli*
- 9 Stima della disponibilità idrica di un serbatoio idrico sotterraneo in funzione delle caratteristiche geomorfologiche e di ricarica  
*Francesca Del Rosso, Tullia Bonomi, Letizia Fumagalli*
- 10 L'acquifero alluvionale della piana costiera del Fiume Roja a Ventimiglia: definizione del suo modello concettuale  
*P. Barazzuoli, F. Capacci, J. Migliorini, R. Rigati*
- 11 Impact of climatic change and anthropic pressure on Bracciano lake and its aquifer (Central Italy)  
*L. Di Matteo, W. Dragoni, C. Giontella, M. Melillo*
- 12 Le risorse idriche sotterranee dell'Alto Bacino del Fiume Aso (Parco Nazionale dei Monti Sibillini): studio idrogeologico e valutazione dello stato di utilizzazione  
*Lucia Mastrorillo, Torquato Nanni, Marco Petitta, Paola Vivalda, Francesca Banzato, Stefano Palpaceli*
- 14 Lo svuotamento degli acquiferi carsici attraverso l'analisi degli idrogrammi sorgivi  
*F. Fiorillo, F. M. Guadagno*
- 15 La gestione integrata delle risorse idriche e dei bacini idrogeologici  
*G. Barrocu*
- 16 Progetto di un modello tridimensionale del sottosuolo della Pianura Padana  
*T. Bonomi, G. Giuliano, B. Bertolo, A. Cavallin, F. Puma, G. M. Zuppi*

### Prospezioni geochemiche e geofisiche negli studi idrogeologici

- 17 Studio della composizione isotopica delle precipitazioni del Friuli-Venezia Giulia  
*M. Michellini, F. Cucchi, O. Flora, B. Stenni, F. Treu, L. Zini*
- 18 Caratterizzazione chimica e isotopica dell'acquifero del Carso Classico  
*F. Valentinuz, L. Zini, R. Petrini*
- 19 Hydrogeological and hydrogeochemical features of the peculiar aquifer of Pianosa Island (Tuscan Archipelago, Italy)  
*M. Doveri, R. Giannecchini, M. Mussi, I. Nicotra, A. Puccinelli*
- 20 Caratteristiche idrogeologiche, idrochimiche ed isotopiche degli acquiferi della Pianura Pavese (Lombardia Meridionale)  
*G. Pilla*
- 22 Hydrochemical changes induced by 2009 L'Aquila earthquake on the Gran Sasso aquifer  
*R. Adinolfi Falcone, V. Carucci, A. Falgiani, M. Manetta, M. Paolessi, B. Parisse, M. Petitta, S. Rusi, D. Sciannamblo, M. Spizzico, M. Tallini*
- 24 Caratterizzazione della risorsa termale di Bagni di Lusnizza (Udine) mediante indagini geofisiche integrate  
*I. Gervasio, B. Della Vedova, E. Dazzan, R. Deiana, G. Cassiani*
- 25 Caratterizzazione della risorsa termale di Bagni di Lusnizza (Udine) mediante indagini geochemiche  
*U. Aviani, R. Petrini, F. F. Slejko, M. Nichelini*
- 26 Metodologie innovative per la caratterizzazione degli acquiferi  
*Nieto Yaba', M. Giustiniani, F. Accaino, A. Affatato, L. Baradello, E. Marin, S. Picotti, G. Santarat, U. Tinivella, C. Vaccaro*
- 27 Caratterizzazione del sottosuolo mediante le onde sismiche P ed S  
*M. Giustiniani, U. Tinivella, F. Accaino*
- 27 La vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento antropico e alla degradazione qualitativa per intrusione marina o per altri fenomeni naturali
- 28 Considerazioni sulla vulnerabilità di sistemi sorgentiferi carsici complessi: il caso delle Sorgenti del Timavo nel Carso Classico.  
*L. Zini, L. Visintin, B. Grillo, F. Cucchi*
- 29 Sorgenti e ciclo del ferro nel Sito Inquinato di Interesse Nazionale "Laguna di Grado e Marano" (Regione FVG): una prospettiva isotopica  
*A. Galic, F. Castorina, A. Lutman, E. Pezzetta, R. Petrini*
- 31 Applicazione della sistematica isotopica del cromo allo studio delle sorgenti e ciclo del cromo esavalente in acquiferi contaminati: il caso di Pavia di Udine (Regione Friuli Venezia Giulia)  
*R. Petrini, A. Lutman, A. Felluga, E. Pezzetta, F.F. Slejko, G. Cavazzini, F. Marafatto*
- 32 Contaminazione naturale di un acquifero alluvionale continentale per la risalita di acque ad elevata mineralizzazione di origine profonda: il caso dell'Oltrepò Pavese (Lombardia meridionale)  
*G. Pilla, P. Torrese, M. Bersan*
- 34 Salinization processes in the delta Po aquifer system  
*D. Rapti-Caputo*

- 35 Processi chimico-fisici in acquiferi costieri: il caso studio della Pialassa della Baiona (Ravenna)  
*U. Aviani, R. Petrini, R. Cidu, L. Vittori Antisari, G. Vinello*
- 36 Ortofosfati nelle acque sotterranee derivanti dall'ossidazione di suoli torbosi: risultati preliminari dall'area del Lago di Massaciuccoli  
*R. Rossetto, R. Basile, P. Cavallaro, E. Menichetti, S. Pistocchi, C. Sabbatini, T. Silvestri, N. Bonari*
- 37 Il sito contaminato di interesse nazionale della Bassa Valle del Fiume Chienti: dal modello idrogeologico concettuale al modello numerico  
*E. Pacioni, M. Petitta, G. Corvatta, M. Fanelli, V. Carucci, V. Saladini, C. Sbarbati, R. Aravena*
- 39 I geo-indicatori nella redazione di carte del rischio di inquinamento da nitrati nelle acque sotterranee  
*D. Ducci*

#### **Modellistica idrogeologica**

- 41 L'utilizzo di interpolazioni geostatistiche tridimensionali nei modelli matematici di flusso  
*P. Canepa, T. Bonomi*
- 43 Modellazione della risposta degli acquiferi attraverso tecniche data driver: potenzialità e prospettive  
*A. Doglioni, A. Galeandro, V. Simeone*
- 44 Il flusso attraverso pozzi abbandonati  
*M. Cultrera, R. Antonelli*
- 45 Modellazione numerica di flusso per la progettazione di un sistema di emungimento con pozzi a raggiera  
*L. Piccinini, V. Vincenzi, A. Gargini*
- 47 Modellazione di un acquifero a porosità fissurale: il complesso vulcanico del M. Amiata (Toscana meridionale)  
*M. Nocchi, M. Salleolini*
- 48 Modellazione delle interazioni tra acque superficiali e la zona insatura/satura  
*I. Borsi, R. Rossetto, C. Schifani*

#### **Poster**

- 49 La vulnerabilità delle sorgenti del Ciane per cause naturali ed antropiche  
*A. Aureli, M. Di pasquale*
- 51 Exploration of groundwater reservoirs in the Tagliamento River basin (northern Italy)  
*D. Rapti-Caputo, G. Santarato*
51. Evoluzione dell'area urbana di Como: analisi stratigrafiche e idrogeologiche  
*F. Ferrario, F. Brunamonte, A. M. Michetti, L. Bonadeo*
- 53 Determinazione della velocità delle acque sotterranee in un sito della pianura vicentina con il metodo della diluizione in pozzo  
*M. Ortombina, P. Fabbri*
- 55 Risorse idriche sotterranee nel Promontorio di Portofino (Italia)  
*F. Faccini, A. Robbiano, A. Sacchini*
- 56 Modello concettuale dell'acquifero carbonatico della Montagnola Senese (Toscana, Italy)  
*P. Barazzuoli, J. Migliorini, F. Capaccin, R. Rigati*
- 57 Idrogeologia del sistema acquifero multifalda della pianura di Grosseto (Toscana meridionale)  
*M. Aldinucci, M. Leonini, M.R. Marchetti, M. Nocchi, M. Salleolini*
- 58 Schema idrogeologico della Conca di Acerno (Salerno)  
*A. Corniello, D. Ducci, G. M. Monti*
- 59 Caratterizzazione e modellazione idrogeochimica della sorgente termale di Monfalcone  
*U. Aviani, R. Petrini*
- 60 Caratterizzazione idrogeochimica delle acque prossime alla Miniera di Salgemma di Valle Neto (Crotone - Calabria)  
*F. Ietto, C. Apollaro*
- 61 L'impatto ambientale della zona mineraria di Cave di Predil (Regione FVG): dati geochimici ed isotopici preliminari su alcune acque di drenaggio e superficiali  
*R. Petrini, R. Cidu, F. F. Slejko, L. Zini*
- 62 Hydrodynamic and geochemical evolution of a multiaquifer alluvial system  
*D. Rapti-Caputo*
- 62 Approccio metodologico nell'analisi di fenomeni di contaminazione da Arsenico, Ferro e Manganese nelle falde superficiali: il caso del territorio di Cremona  
*T. Bonomi, L. Fumagalli, M. Rotiroti*
- 64 Impatto sulle risorse idriche e terreni dell'utilizzo dei fanghi di depurazione come ammendante in agricoltura  
*D. Rapti-Caputo, F. Campi*
- 65 Idrogeologia dell'isola di Ortigia, centro storico di Siracusa  
*A. Aureli, M. Dipasquale*
- 66 Studio e modellazione dell'acquifero carsico della Nurra settentrionale (Sassari, Sardegna)  
*G. Barbieri, M. Casu*
- 68 Numerical model of aquifer of chienti river: an example of groundwater modelling of fractured carbonate systems in orogenic area  
*C. Tarragoni*



ACQUA 2011

## Infopozzi: applicativo web per l'organizzazione, la consultazione e l'analisi dei dati dei pozzi del Friuli Venezia Giulia

*Erica Peressini, Mauro Rainis, Grazia Martelli*

*Dipartimento di Georisorse e Territorio, Università di Udine*

La Bassa Pianura Friulana è caratterizzata da numerose falde artesiane contenute nei livelli sabbiosi e ghiaiosi dei depositi quaternari. Le falde sono interessate da numerosi pozzi, la cui profondità spesso si avvicina al centinaio di metri o la supera, sfruttati per usi agricoli, industriali e domestici al servizio di singole unità o di piccoli gruppi di abitazioni. Nonostante lo sfruttamento delle falde sia tanto diffuso, i dati disponibili sui pozzi sono molto scarsi e la carenza di informazioni non consente di controllare lo sfruttamento delle risorse idriche e di adottare provvedimenti adeguati a proteggere le falde da alterazioni che potrebbero rivelarsi irreversibili.

Alla fine degli anni novanta il Dipartimento di Georisorse e Territorio dell'Università degli Studi di Udine avviò un importante lavoro di acquisizione e analisi di dati raccolti nel tempo da diversi Enti:

archivio della Provincia di Udine che, ai sensi del D.L. 275/1993, raccoglieva Schede di Denuncia pozzo esistente;

- Catasto Regionale dei Pozzi;
- archivio delle Direzione Provinciale dei Servizi Tecnici Regionali per le istruttorie delle Concessioni di approvvigionamento idrico;
- censimento diretto presso i proprietari (con questionari anonimi) da parte del Dipartimento stesso.

L'analisi di tali dati, seppur dispersi, frammentati e disomogenei, ha permesso agli studiosi del Dipartimento di Georisorse e Territorio dell'Università degli Studi di Udine di sviluppare una discreta conoscenza qualitativa del sottosuolo della Bassa Pianura Friulana. L'osservazione della variazione nel tempo dei parametri caratteristici dei pozzi ha evidenziato un graduale e progressivo degrado delle risorse idriche del sottosuolo della zona.

Nel 2003, un ulteriore passo in avanti è stato fatto con l'unificazione dei dati raccolti: è stata progettata una struttura omogenea che potesse accogliere i dati dispersi nei diversi archivi. A quel punto, i dati sono stati riversati in un nuovo archivio, unico, effettuando nel contempo operazioni di pulizia ed eliminazione dei duplicati. Il ricorso alla nuova struttura, che accoglie oggi oltre 26.000 pozzi, ha facilitato l'analisi e ha ulteriormente evidenziato la necessità di raccogliere, completare e documentare le informazioni, soprattutto stratigrafiche e chimico-fisiche,

dei pozzi.

Nel 2009 è partito il progetto Infopozzi.

Si tratta di un applicativo web, realizzato utilizzando programmi open-source, con l'obiettivo di rendere facilmente reperibili, integrabili e maggiormente controllabili tutte le informazioni sui pozzi del Friuli Venezia Giulia finora raccolte a cura del Dipartimento di Georisorse e Territorio dell'Università degli Studi di Udine.

L'utilizzo di un applicativo web comporta una serie di vantaggi:

l'applicazione risiede su un server al quale si accede via internet con il proprio browser, eliminando la necessità di installazione di programmi sui pc degli utilizzatori;

l'impostazione data al sistema di permessi consente di estendere facilmente l'accesso a nuovi utenti calibrando la loro possibilità di accesso e azione sui dati;

possono essere sfruttate le potenzialità di Google Maps per la geo-localizzazione dei pozzi.

Accedendo al sistema, gli utenti si muovono nel contesto dei comuni attivati sul proprio account e possono:

consultare la scheda dei pozzi che comprende dati geografici, tecnici, amministrativi, chimico-fisici e di misura ove disponibili, assieme ad una localizzazione su Google Maps sulla base dell'indirizzo registrato;

effettuare ricerche dei pozzi sulla base dell'indirizzo o del nominativo del proprietario;

visualizzare la scheda di un pozzo partendo dalla sua visualizzazione su Google Maps e cliccando sul segno-posto (in maniera del tutto simile a quanto accade in un GIS);

visualizzare statistiche sulla completezza di alcuni dati.

Le funzionalità del sistema possono sicuramente essere migliorate e ampliate, tuttavia l'aspetto più importante è dato dal fatto che l'accesso è facilmente estendibile a utenti che potrebbero identificarsi in strutture pubbliche o private. Beneficiando delle possibilità di consultazione, grazie al proprio ruolo e alle informazioni di cui dispongono, tali strutture potrebbero intervenire, in modo attivo ed insostituibile, nel controllo e nell'integrazione dei dati, permettendo così il completamento del lavoro conoscitivo e una pianificazione più consapevole e conservativa dello sfruttamento delle risorse idriche.



# The geothermal potential of the carbonatic platform buried beneath the Veneto and Friuli coastal areas: results from the Grado-1 borehole (NE Italy)

**Bruno Della Vedova, Aurelie Cimolino, Rinaldo Nicolich, Erika Barison, Giuseppe Brancatelli**

*Dipartimento di Ingegneria Civile e Architettura, Università di Trieste, dellavedova@units.it*

The carbonatic platform buried beneath the Veneto-Friuli plain represents a distinctive character of the Adriatic foreland, which experienced deformation and flexure by the propagating orogenic loads of the Dinaric mountain range, from ENE, and of the Southern Alps, from the north. Diachronous compression phases characterized both mountain belts during Late Cretaceous and Cenozoic times, favouring the development of thick sedimentary wedges at the foreland borders.

The structural highs of the carbonatic platform in the plain and adjacent north Adriatic were recently reconstructed on the base of an integrated study of the available geological and geophysical data, complemented by new high resolution seismic reflection profiles acquired in the onshore and offshore areas. The composed research program was funded by Regione Friuli Venezia Giulia - Servizio Geologico. A major contribution to this study was provided by the ENI-AGIP seismic reflection profiles and deep boreholes, carried out for hydrocarbon exploration (e.g. Fantoni et al., 2003; Nicolich et al., 2004). The morphology of the platform shows two clear culminations beneath the Veneto-Friuli coastal area: the “Cesarolo high”, at a depth of about 700-800 m, and the “Grado high” offshore Grado Island, at a depth of about 500 m. These ridges form a right corner approximately oriented sub-parallel to the main far away orogenic loads and are delimited by normal and trans-tensional faults rooted into the basement and episodically interested by weak seismicity. The “Grado high” is NW-SE oriented and is clearly in continuation with the Jurassic-Cretaceous anticline crossing the western part of Istria.

Despite the low geothermal gradient (about 20 °C/km) of the entire Po Plain, the Cenozoic terrigenous and molassic cover on top of the platform culminations beneath the Veneto-Friuli coastal area exhibits a positive heat flow anomaly with temperature gradients of 40-50 °C/km and temperatures up to 50 °C within the fresh Quaternary aquifers. The stratigraphic records from water wells, together with temperature and geochemistry data

and the Cesarolo-1 borehole data, allowed us to calibrate a simplified 2-D thermal model that requires convection of fossil waters in the upper 2-2.5 km of fractured Paleogene-Mesozoic rocks (representing the reservoir), and a prevailing heat conduction in the overburden molassic deposits (cap rock).

In order to assess the geothermal potential of the carbonatic aquifer and its suitability for district heating of public buildings in the Grado city (by means of a geothermal doublet), the RFGV, supported by European funding, contracted the geophysical survey and drilling of an exploratory well entering at least 200 m into the reservoir rocks. Our Department carried out the site survey and provided the borehole design, preliminary thermal modeling, drilling direction and well logging interpretation.

The Grado-1 borehole was located at the westernmost end of Grado Island and was completed in March 2008. It reached the top of Paleogene calcarenites at 616,5 m, the top of the Mesozoic limestone at about 1000 m and ended at 1110 m total depth, entering a major artesian aquifer with an outflow of 100 tons/h of saline waters at 44-48 °C temperature. Two relevant fractured portions were crossed at 736-740 and 1040 m depth.

The results of the coring, well logging, pumping tests and a regional geologic interpretation (Cimolino et al., 2010) will be presented.

## References

- Cimolino A., B. Della Vedova, R. Nicolich, E. Barison, G. Brancatelli, 2010. New evidence of the outer Dinaric deformation front in the Grado area (NE-Italy). *Ren. Acc. Lincei*, 21 (suppl 1): S167-S179.
- Fantoni, R., Della Vedova, B., Giustiniani, M., Nicolich, R., Barbieri, C., Del Ben, A., Finetti, I. and Castellarin, A. [2003] Deep seismic profiles through the Venetian and Adriatic foreland (N-Italy). *Mem. di Scienze Geologiche*, 54, 131-134.
- Nicolich, R., Della Vedova, B., Giustiniani, M. and Fantoni, R. [2004] Map of subsurface structures of the Friuli Plain. 32 pp. and 4 Tables, *Litografia Artistica Cartografica*, Firenze.



ACQUA 2011

## Considerazioni sullo stato dell'approvvigionamento idropotabile nel territorio italiano

**Stefano Tersigli<sup>(1)</sup>, Giuseppe Sappa<sup>(2)</sup>, Simona Ramberti<sup>(1)</sup>, Maria Teresa Coviello<sup>(1)</sup>**

<sup>(1)</sup>Istat – Servizio Statistiche ambientali

<sup>(2)</sup>Sapienza – Università di Roma, Dipartimento di Ingegneria, Civile, Edile ed Ambientale

Dal 1951 l'Istituto Nazionale di Statistica (Istat) effettua rilevazioni sulle acque ad uso civile. I principali aspetti esaminati riguardano tutta la filiera di uso pubblico delle risorse idriche e le principali caratteristiche dei servizi idrici presenti in Italia, dal prelievo di acqua per uso potabile alla depurazione delle acque reflue urbane.

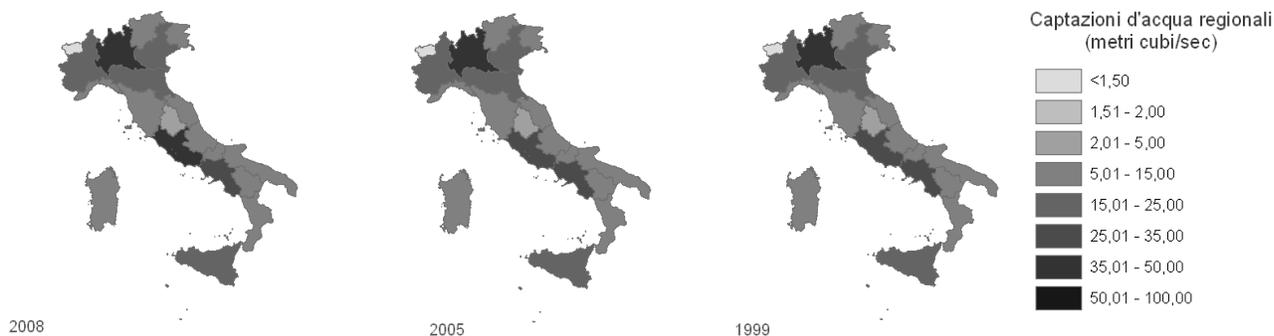
La continuità delle indagini nel tempo ha permesso di disporre di una base informativa costante con un progressivo aggiornamento dei contenuti dettato dalla legislazione vigente e dalle esigenze conoscitive sul fenomeno. Nell'ultimo decennio, in particolare, l'Istat ha approfondito le proprie ricerche nel campo dei consumi idropotabili, svolgendo una intensa attività di raccolta, elaborazione ed interpretazione dei dati relativi ai volumi captati, potabilizzati, addotti che ha coinvolto tutti gli enti gestori dei servizi idrici in Italia al fine anche di monitorare i cambiamenti derivanti dall'introduzione del Servizio idrico integrato (Sii). Le ultime tre edizioni della Rilevazione sui servizi idrici fanno riferimento agli anni 1999, 2005 e 2008. I risultati ottenuti hanno consentito di delineare un quadro di rilevante interesse conoscitivo sullo stato e sull'evoluzione delle modalità di sfruttamento delle risorse idriche, principalmente sotterranee, per uso potabile. Inoltre, il dettaglio territoriale delle informazioni raccolte consente un grado di interpretazione dei dati, sia in forma aggregata sia in forma disaggregata, decisamente spinto.

Tra gli obiettivi dell'indagine vi è quello di conoscere l'entità dei volumi d'acqua captata per usi potabili, la distribuzione territoriale delle fonti di approvvigionamento e l'efficienza delle reti comunali di distribuzione dell'acqua potabile esistenti sul territorio nazionale, che ancora oggi risultano gestite da soggetti che hanno natura giuridica differente.

Da una parte, l'espletamento delle indagini si scontra ancora oggi con la difficoltà di reperimento dei dati presso gli Enti gestori, per la diversità delle strutture organizzative che essi presentano e per la limitata presenza di strumenti per la misurazione dell'acqua ai punti di captazione e lungo i tronchi della rete acquedottistica e di distribuzione. Dall'altra, ha l'indubbio merito di valorizzare le informazioni frammentarie relative al sistema idrico, esistenti e altrimenti disperse. Il patrimonio informativo acquisito dalla Rilevazione sui servizi idrici, anche grazie alla disponibilità di informazioni collaterali, derivanti sia da altre indagini Istat che da fonti esterne, consente lo svolgimento di adeguate analisi di sostenibilità dello sfruttamento della risorsa acqua, finalizzato al miglioramento dell'aspetto gestionale dell'intera filiera idrica, da più parti auspicato (enti locali e legislatori).

L'impegno più oneroso per Istat risiede nella correzione e validazione dei dati pervenuti dai questionari e nella ricostruzione dei dati mancanti. A tale scopo sono state elaborate procedure informatizzate di correzione dei dati basate su verifiche di congruità per ogni singolo Comune tra i volumi in esame, informazioni disponibili dalle precedenti rilevazioni e rapporti tecnici reperibili (Piani d'ambito, Piani regionali e generali degli acquedotti, Piani di tutela delle acque, archivi sulle concessioni idropotabili).

Allo stato attuale le maggiori difficoltà nella costruzione di elementi conoscitivi attendibili risiedono nella carenza di approfondite conoscenze dell'assetto idrogeologico degli acquiferi che ospitano le risorse idriche sfruttate, nella mancanza di sistematicità nel monitoraggio, raccolta ed archiviazione dei dati necessari alla pianificazione della risorsa, nell'elevata dispersione dei punti di prelievo e nella vulnerabilità delle falde.



Tali inconvenienti si riflettono sulla definizione del costo della risorsa, che cresce con il diminuire delle informazioni di dettaglio, necessarie ad una sua corretta caratterizzazione.

Per quanto riguarda i volumi di acqua addotta, la quantità annua procapite (in metri cubi) registrata in Italia al 2008, riferisce che la Valle d'Aosta con 198, l'Abruzzo con 175 e Lazio con 173 sono le regioni che presentano i valori più alti, mentre Marche ed Umbria con 102 metri cubi annui per abitante quelli più bassi.

L'insieme delle informazioni raccolte, elaborate ed interpretate statisticamente riferisce uno stato, relativo allo sfruttamento della risorsa a scopo idropotabile, estremamente eterogeneo nel territorio italiano, nonostante la graduale attuazione della Legge n. 36 del 1994

Con questo lavoro si intende analizzare i risultati relativi all'indagine sui tre sub sistemi in cui si articola il sistema dell'approvvigionamento: prelievo, potabilizzazione e adduzione. In generale, da un punto di vista stretta-

mente quantitativo, il totale dei volumi prelevati, in Italia, appare in lieve ma continua crescita dal 1999 al 2008.

La distribuzione territoriale dei prelievi di risorsa ad uso potabile è rimasta invariata (Fig.1), confermando Lombardia, Lazio e Campania le regioni in cui si prelevano i maggiori volumi, mentre sono cambiate le aliquote di acqua per tipologia di fonte (sorgente, pozzo, acque superficiali, bacini artificiali, acque marine o salmastre). Nella serie di anni considerata, infatti, all'aumento del volume totale prelevato non corrisponde un aumento proporzionale dei volumi relativi ai diversi tipi, ma una diminuzione dei quantitativi prelevati da sorgente ed un incremento di quelli riconducibili ad acque superficiali o pozzi. Il dato trova conferma nell'analisi dei volumi d'acqua potabilizzata, aumentati di circa il 30% dal 1999 al 2008. Questo dato può fornire qualche utile spunto di riflessione circa il trend dello sfruttamento della risorsa, supportando così le scelte di ordine strategico.



## Caratteristiche e comportamento della falda acquifera presente nel sottosuolo della miniera di dolomia e dei bacini ipogei di accumulo d'acqua nella Valle di Non (Trento)

*Andrea Fuganti, S. Odorizzi, A. Franzinelli*

*Università di Trento*

La parte orientale della Valle di Non è costituita da una monoclinale diretta circa N-S e inclinata mediamente sui 10° verso W. La morfologia è condizionata da questa inclinazione che si estende da W verso E dalla quota di circa 500 metri s.l.m. fin quasi a 2000 m s.l.m. dove vi è lo spartiacque con la Valle dell'Adige. La parte più profonda della monoclinale è costituita da dolomie triassiche e giurassiche ricoperte localmente da calcari ammonitici, da sedimenti bituminosi cretacei e da marne della Scaglia Rossa. L'estensione W-E arriva fino a 8 km mentre l'estensione N-S arriva fino a circa 15 km. La monoclinale è limitata verso W e verso N da faglie regionali che mettono a contatto le dolomie con sedimenti impermeabili cretacei e terziari. La parte inferiore della monoclinale fino a quota 1000 m s.l.m. circa ha un'agricoltura intensiva con coltivazione di mele. La monoclinale dolomitica era considerata povera di risorse idriche e afflitta da problemi di approvvigionamento estivi per la detta agricoltura.

Nel centro della Valle di Non opera la società Tassullo S.p.A. che produce e commercializza materiali per l'edilizia. Parte di questi materiali contengono elevate quantità di dolomia. In questo ambito la società individuò nei comuni di Vervò e Taio un'area morfologicamente e

geologicamente favorevole per creare una coltivazione sotterranea di dolomia che è stata approvata dai competenti organi della Provincia Autonoma di Trento. Quest'area ha un'estensione superficiale di sessanta ettari coltivati intensamente con mele. La coltivazione sotterranea in corso mediante camere non disturba l'agricoltura. L'area in questione è stata studiata in dettaglio dal 1993 sia dal punto di vista minerario, litologico e idrogeologico in quanto la dolomia deve essere coltivata asciutta e quindi senza interferenze con la circolazione idrica superficiale e sotterranea. Il problema idrogeologico ha interessato inizialmente le sorgenti affioranti e successivamente si è indagato se le dolomie porose, permeabili e carsificate sono sede di una falda acquifera permanente e profonda. Ciò è stato fatto mediante sondaggi e pozzi profondi fino a 250 metri partendo sia dalla superficie che dalle gallerie della miniera. Tale falda esiste ed è risultata adatta a soddisfare sia il consumo umano che l'irrigazione. A tale scopo sono in corso di costruzione all'interno della miniera due bacini di raccolta di acqua lunghi 500 metri ciascuno capaci di ospitare 100.000 metri cubi di acqua. Ciò in collaborazione con i Comuni e con i Consorzi irrigui locali. Si è così coniugata l'attività industriale con l'attività agricola.

Le ricerche idrogeologiche sulla falda che alimenta i detti bacini di raccolta sono iniziate nel 1993 e riguardano gli aspetti geologici, fisico-chimici, isotopici, nonché le oscillazioni della falda nell'arco degli ultimi sette anni. E' risultato che la falda è alimentata (recharge) dalla pioggia e dallo scioglimento delle nevi, che i pozzi hanno

portate sostenibili sui 5 litri al secondo e quindi in grado di soddisfare l'agricoltura ed il consumo umano. L'attuale deflusso (discharge) della falda avviene attraverso le miloniti della faglia diretta N-S che tronca la monoclinale.



## Stima della disponibilità idrica di un serbatoio idrico sotterraneo in funzione delle caratteristiche geomorfologiche e di ricarica

**Francesca Del Rosso, Tullia Bonomi, Letizia Fumagalli**

*Dipartimento di Scienze dell'Ambiente e del Territorio, Università degli Studi di Milano – Bicocca, Piazza della Scienza 1, 20126 Milano. francesca.delrosso@unimib.it*

**ACQUA 2011**

L'obiettivo di questo lavoro è consistito nella valutazione della stima della disponibilità idrica del sottosuolo, attraverso una metodologia sviluppata dal gruppo di ricerca di idrogeologia del DISAT (Dipartimento di Scienze dell'Ambiente e del Territorio) secondo la quale viene valutato il quantitativo di acqua presente in un serbatoio idrico sotterraneo, in base alle caratteristiche idrogeologiche dell'area in esame e al variare delle condizioni piezometriche storiche.

In una prima fase, attraverso l'utilizzo di Banche Dati, Sistemi Informativi Territoriali e software di interpolazione bidimensionale e tridimensionale, vengono riprodotte la struttura geologica e le caratteristiche idrogeologiche del sistema acquifero, a partire da informazioni stratigrafiche raccolte nell'area di studio. Particolare attenzione viene assegnata alla ricostruzione della distribuzione della porosità efficace nel sottosuolo che stima le dimensioni dei pori dei sedimenti effettivamente attraversabili dall'acqua e fornisce un'indicazione sulla quantità d'acqua immagazzinabile nel sottosuolo.

In una seconda fase, viene riprodotto il comportamento dinamico dell'acquifero, attraverso la ricostruzione delle variazioni del livello della falda nel tempo le cui oscillazioni costituiscono il bilancio netto del sistema.

I risultati di queste due fasi del lavoro vengono incrociati per stimare il volume di terreno saturo e, all'interno di questo, calcolare la quantità d'acqua che si trova nei pori dei depositi a granulometria grossolana e media (considerando valori di porosità efficace maggiori e uguali al 17%) che corrispondono al volume di acqua mobile che è in grado di filtrare all'interno dell'acquifero. Questo volume corrisponde alla reale disponibilità idrica presente nel sottosuolo e comprende sia le riserve strategiche dell'acquifero sia la parte che può risultare disponibile al prelievo.

Il metodo è stato applicato al territorio corrispondente

alle province di Milano e Monza e Brianza (1963.5 km<sup>2</sup>), relativamente alla porzione dell'acquifero tradizionale (Martinis & Mazzarella, 1971, Eni-Agip, 2002).

Quest'area è ricca di acque sia superficiali, sia sotterranee e proprio il sottosuolo contiene una grande riserva di acqua dolce che viene utilizzata soprattutto per approvvigionamento idrico potabile.

Per la ricostruzione della struttura geologica dell'acquifero sono state utilizzate elaborazioni di progetti e lavori precedenti (RICLI-WARM, 2007-2009, Marchetti, 1992 e Regione Lombardia & ENI Divisione Agip, 2002). L'eterogeneità dei depositi di origine fluviale e fluvio-glaciale è stata riprodotta attraverso l'interpolazione (tramite il software Gocad) di 3493 pozzi georeferenziati con stratigrafia raccolti nell'area di studio e archiviati nella Banca Dati specifica per pozzi per acqua, Tangram ([www.tangram.samit.unimib.it](http://www.tangram.samit.unimib.it), Bonomi et al., 1995), individuando 25 classi di porosità efficace percentuale.

La variazione dinamica della tavola d'acqua nel tempo è stata calcolata elaborando i dati della rete di Monitoraggio del CAP (Consorzio per l'Acqua Potabile) di Milano dal 1979 al 2005 e della Rete di Monitoraggio Quantitativa di ARPA Lombardia (2001 – 2005), ad integrazione dei primi; sono stati utilizzati i valori medi annuali. Dalle carte piezometriche è risultato che dal 1979 al 2005 c'è stato un generale abbassamento della tavola d'acqua di circa 5-10 m con una depressione di anche 10-30 m nel settore centro-settentrionale dell'area di studio; al contrario si è registrato un recupero di livelli, fino a 5 m, nel comune di Milano, per una diminuzione dei prelievi industriali, nel suo hinterland e a Sud-Ovest di esso.

In base alla caratterizzazione del sistema idrogeologico è stato stimato che il serbatoio sotterraneo dell'intera area di studio dal 1979 al 2005 contiene una media di circa 17,5 miliardi di m<sup>3</sup>/anno di acqua immagazzinata. Il

valore massimo è stato calcolato nel 1980, pari a circa 18,3 miliardi di m<sup>3</sup>/anno, mentre il valore minimo è stato registrato nel 1991 pari a circa 17,03 miliardi di m<sup>3</sup>/anno. Il trend dei 27 anni indagati appare ricollegabile al trend socio-economico che controlla gli interventi antropici, quali prelievi sotterranei e irrigazioni, e al trend naturale delle precipitazioni.

Le differenze tra i volumi mobili di ciascun anno rispetto a quelli del 1982, il cui livello piezometrico è stato identificato come livello sostenibile degli ultimi 30 anni (Regione Lombardia, 2006), non superano mai circa 700 milioni di m<sup>3</sup> di deficit, il 4% della quantità di acqua disponibile media nel periodo considerato.

Per un'analisi di dettaglio della risorsa idrica in funzione delle caratteristiche geomorfologiche e della tipologia di ricarica, l'area di studio è stata suddivisa in 8 settori, in base alla carta geomorfologica della Regione Lombardia: 4 a Nord del canale Villoresi (terrazzo Ovest, terrazzo centro, morene e terrazzo Est) e 4 circa a Sud di esso (alta pianura, comune di Milano, terrazzo fluviale del Ticino e pianura idromorfa). Nelle zone a Nord lo spessore dell'acquifero è ridotto e la ricarica della falda proviene principalmente dalle precipitazioni; in quelle a Sud gli spessori dell'acquifero aumentano e l'oscillazione della tavola d'acqua è influenzata non solo dalle precipi-

tazioni, ma anche dalle perdite dei canali irrigui e dai prelievi umani.

Nelle 8 aree considerate l'andamento dei volumi di acqua mobile stimati per ciascuna di esse dal 1979 al 2005 mostra un trend in generale decrescente. Si discosta da questo comportamento il comune di Milano, dove da circa metà degli anni '90 si è verificato un recupero dei volumi d'acqua mobile, in base all'innalzamento della tavola d'acqua descritto prima.

In un'ottica gestionale che mira a individuare quanto l'oscillazione della disponibilità idrica sia influenzata da cause naturali o dall'attività antropica, in base ad un buon o cattivo utilizzo della risorsa per le diverse attività umane, risulta significativo poter confrontare i volumi di acqua mobile con gli effettivi prelievi da acque sotterranee. La disponibilità di questi dati è però molto frammentaria, se non inesistente. A titolo esemplificativo è stato realizzato un confronto tra la disponibilità idrica e gli esigui dati di prelievo reperiti in un paio di sottoaree indagate.

Il metodo descritto può essere considerato uno strumento utile nel supporto della gestione del territorio attraverso l'individuazione di aree a maggior o minor potenzialità e quindi aree di potenziale sfruttamento o di potenziale rischio di deficit idrico, indirizzando le politiche di risparmio idrico.



ACQUA 2011

## L'acquifero alluvionale della piana costiera del Fiume Roja a Ventimiglia: definizione del suo modello concettuale

*Piero Barazzuoli, Fausto Capacci, Jenny Migliorini, Roberto Rigati*

*Università di Siena, Dipartimento di Scienze della Terra. Università di Cagliari*

La zona oggetto di studio è collocata poco a monte dell'abitato di Ventimiglia e si estende per quasi un chilometro a nord e circa 500 m a sud della confluenza tra il F. Roja ed il suo principale affluente il T. Bevera. L'acquifero si trova all'interno di una fascia di larghezza variabile da circa 450 m a 600 m del fiume Roja all'interno delle formazioni geologiche caratterizzate da alluvioni e detriti del Quaternario.

Per quanto riguarda la ricostruzione della geometria dell'acquifero, essa è basata sulle perforazioni geognostiche e sulle prospezioni geofisiche realizzate nell'ambito del progetto Eurobassin e Risknat, oltre che sulle stratigrafie di alcuni sondaggi realizzati negli anni '70.

Con queste informazioni sono state elaborate nove sezioni litostratigrafiche dell'area (due longitudinali e sette trasversali alla valle) dalle quali emerge la presenza di un unico acquifero a falda libera in prevalenza costituito da ghiaie sabbiose con ciottoli in gran parte con matrice li-

moso-argillosa, responsabile di una permeabilità per porosità media. Lo spessore medio del materasso alluvionale è di circa 25 m. Il substrato che delimita l'acquifero alla sua base è costituito dal Flysch di Ventimiglia.

Per la caratterizzazione della dinamica dell'acquifero, è in corso una campagna di rilevamento della superficie piezometrica con misurazioni in 20 punti, questo permetterà la realizzazione di carte isopiezometriche che rappresentano l'andamento idrodinamico della falda durante il periodo di osservazione (Giugno 2010 – Giugno 2011).

Sono stati inoltre valutati i rapporti quantitativi tra il fiume Roja e l'acqua di falda. Il metodo di calcolo utilizzato è stato di tipo indiretto, ovvero mediante la misura delle portate fluviali del Roja attraverso l'impiego di un mulinello idrometrico e analizzando le variazioni di tali portate lungo l'asta del corso d'acqua.

Con i dati disponibili è stata stimata l'entità della ricarica dell'acquifero, nonché i volumi idrici immagazzinati

e la variazione della sua ricarica nel periodo monitorato.

A conclusione della prima parte di questo studio è stato possibile realizzare il modello concettuale dell'acquifero, dove sono state schematizzate e quantificate le relative entrate ed uscite per i vari scenari, dal quale è risultato un bilancio idrico nel complesso sempre attivo.

Una volta messo a punto il modello concettuale è in fase di svolgimento l'elaborazione del modello numerico

tridimensionale che, mediante un processo di iterazione, permetterà di verificare le ipotesi fatte sul funzionamento dell'acquifero.

Tale modellazione permetterà una adeguata programmazione per la tutela e per la salvaguardia qualitativa della risorsa idrica, data la rilevante importanza strategica per l'utilizzo potabile per le comunità italiane e francesi.



**ACQUA 2011**

## Impact of climatic change and anthropic pressure on Bracciano lake and its aquifer (Central Italy)

*Lucio Di Matteo, Walter Dragoni, Cecilia Giontella, Massimo Melillo*

*Earth Science Department, University of Perugia, Piazza dell'Università n.1, 06123 Perugia (Italy)*

This study deals with the long-term management of Lake Bracciano, one of the most important surface fresh-water systems in Central Italy, characterized by an outstanding cultural, environmental and touristic-economic value. Lake Bracciano is located about 50 kilometres north of Rome: the lake has an area of about 57 km<sup>2</sup>, a maximum depth of 160 m and a hydrogeological basin of about 110 km<sup>2</sup>. The lake and its basin are located in a volcanic area, mainly made up of ignimbrites and tuffs, laid over low permeability sedimentary lithotypes. The volcanic rocks form a dual porosity aquifer characterized by good water quality. The aquifer is used for drinking water purposes and for irrigation. Since the 1960s, when the Water Supply Agency "ACEA" started exploiting the lake to supply drinking water to Rome (total mean discharge of about 0.8 m<sup>3</sup>/s), the discharge of the natural lake outlet, the river Arrone, has gradually dropped off, becoming nil in the last decade. It is not clear for how long the area will be in this situation, as there are plans to increase the water supply from the lake as well as from the aquifer. The situation is worsened by the fact that in the area there is a climatic variation occurring. Such variation is characterized by a slight increase in the temperature and by a decrease in the average yearly rainfall. In Central Italy the presence and intensity of trends vary according to the statistical technique employed, but the general picture is fairly clear: not all the stations have a statistically significant trend, but - in practice - all the stations that have a statistically significant trend show a decrease in rainfall and an increase in temperature, with linear rainfall gradients up to -6 mm/year, and temperature gradients up to about 1°C/century. If the present trend continues, in the next 30 years we should expect a total water yield up to 20-30% lower than the present one. These findings are sub-

stantially consistent with the scenarios reported in the last IPCC report.

According to piezometric data, the area of the hydrogeological basin - excluding the lake - is larger than the catchment one. Regarding lake levels, during the period May 1975-May 2010 a maximum value of about 163.23 m a.s.l. and a minimum value of 161.85 m a.s.l. were registered, with a maximum oscillation of about 1.3 m observed during the period June 2001-April 2003, which was characterized by an exceptionally low rainfall value. The Lake levels show that with the present climatic conditions and water intake, the lake is not in equilibrium: a significant decrease of the lake water levels of about -1.3 cm/year was observed. In order to have an idea of the effect of the future climatic scenarios on the lake area extension, a comparison between the water budget computed under the average rainfall conditions of the 1975-2009 period with the budget under a rainfall decrease of 0.07 m and an increase of temperature of 0.3°C was carried out. Extending the detected trends of rainfall and temperatures to the next 40 years and assuming that withdrawals will have the same value as today, the area of the lake results of about 32.5 km<sup>2</sup>: this implies that, at equilibrium, the surface of the lake would be reduced by about 40%. In order to investigate more accurately the effect of climate change on lake water levels and to set up strategies to minimize the impact of the climatic variation, a monthly lake level simulation model was applied to the Bracciano Lake (LAGO model): this model is a variation of a series of models that have already been worked out to simulate the rainfall/runoff transformation of some basins in Central Italy. The model calibration was made by using the actual lake levels (1975-2001 period). The calibrated model was used to build some sce-

narios which took into account 100% of the present withdrawals: the actual rainfall of the 1975-2001 period was decreased by 3%, 5% and 10%. The lake level will drop by several meters in the next decades: this is consistent with the fact that during the Holocene the lake suffered

strong level decreases due to natural causes connected to paleo-climate changes. Under the hypothesis that the current climatic trend continues it appears that the only way to minimize its impact on the lake and its aquifer is to decrease withdrawals.



## Le risorse idriche sotterranee dell'Alto Bacino del Fiume Aso (Parco Nazionale dei Monti Sibillini): studio idrogeologico e valutazione dello stato di utilizzazione

**Lucia Mastrotillo<sup>(1)</sup>, Torquato Nanni<sup>(2)</sup>, Marco Petitta<sup>(1)</sup>, Paola Vivalda<sup>(2)</sup>,  
Francesca Banzato<sup>(1)</sup>, Stefano Palpacelli<sup>(2)</sup>**

<sup>(1)</sup>Dipartimento di Scienze della Terra, della Sapienza Università di Roma

<sup>(2)</sup>Dipartimento di Fisica dei Materiali e del Territorio, Università Politecnica delle Marche, Ancona

Il territorio del Parco Nazionale dei Monti Sibillini è costituito prevalentemente da dorsali carbonatiche sedi di acquiferi di importanza strategica, che costituiscono la principale fonte di approvvigionamento idropotabile dell'intero territorio regionale. Inoltre, le risorse idriche disponibili sono utilizzate da circa un secolo per la locale produzione idroelettrica. I criteri di gestione delle risorse idriche di questo territorio, quindi, devono rispondere alle esigenze di sfruttamento della risorsa garantendo, comunque, le aspettative di tutela di un'area dalle elevate caratteristiche ambientali.

La difficoltà di raggiungere soluzioni operative in questa direzione ha portato le amministrazioni locali a collaborare con la comunità scientifica nella consapevolezza che la gestione ottimale della risorsa idrica richieda un'adeguata conoscenza dei processi che ne regolano la circolazione sotterranea, soprattutto in un acquifero fraturato. Le ricerche idrogeologiche sugli acquiferi carbonatici dei Monti Sibillini, avviate nel 1992 dal Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Roma La Sapienza e dal Dipartimento di Fisica e Ingegneria dei Materiali e del Territorio dell'Università Politecnica delle Marche e tuttora in corso, hanno progressivamente delineato un quadro idrogeologico regionale sempre di maggior dettaglio dell'intera area soggetta alla tutela del Parco (Boni & Petitta, 2007; Marcellini *et alii*, 2005; Mastrotillo *et alii*, 2009; Nanni *et alii*, 2006; Boni *et alii*, 2010).

In questa nota vengono presentati i primi risultati di uno studio congiunto delle due Università citate, in collaborazione con il CIIP S.p.A, gestore degli impianti di approvvigionamento idropotabile della provincia di Ascoli Piceno. Le indagini hanno riguardato i deflussi, il chimismo e il contenuto isotopico del fiume e delle sorgenti, nonché i livelli piezometrici, anche tramite la realizzazione di un'apposita rete di monitoraggio fissa. Il caso di

studio proposto, relativo all'utilizzazione delle sorgenti presenti nell'alto bacino del fiume Aso, può considerarsi rappresentativo di una situazione diffusa in tutto il territorio del Parco dei Sibillini.

Il sistema sorgivo del fiume Aso costituisce il livello di base di una vasta ed articolata circolazione idrica sotterranea che coinvolge le principali sorgenti del versante orientale dei Monti Sibillini, per un'area di ricarica di almeno 120 km<sup>2</sup> con una potenzialità idrica totale di circa 3200 L/s (Boni & Petitta, 2007). Il fiume si origina alle pendici del Monte Vettore, da un complesso sistema di emergenze naturali ed artificiali, con una portata media complessiva di circa 1500 L/s, che vengono a giorno fra quota 940 e 830 m, in parte nell'alveo del fiume e in parte nella galleria drenante del sistema di captazione, attualmente gestito dal CIIP s.p.a., che preleva 530 L/s. Sono, inoltre, presenti due opere di derivazione superficiale per la produzione idroelettrica (ENEL), che prelevano mediamente 750 L/s, con minimi di 200 L/s e massimi di 2000 L/s.

Nel bacino di alimentazione dell'intero sistema affiorano i complessi idrogeologici del dominio carbonatico umbro-marchigiano caratterizzati da un'alternanza di acquiclude e/o aquitard (Complesso calcareo-silicomarnoso, Marne a Fucoidi, Scaglia Cinerea) che chiudono o limitano la circolazione idrica sotterranea negli acquiferi contenuti nei complessi prevalentemente calcarei della Corniola e Calcarea Massiccio indifferenziati, della Maiolica e della Scaglia calcarea. L'assetto strutturale è caratterizzato da un generale motivo anticlinalico con asse meridiano, delimitato lungo il bordo orientale dal sovrascorrimento dei Monti Sibillini (Boni & Petitta, 2007). Il fiume Aso scorre trasversalmente alle dorsali carbonatiche, incidendo i tre complessi acquiferi, da cui riceve consistenti apporti idrici.

L'interpretazione delle misure di portata, eseguite

lungo l'alveo del fiume (marzo 1992 – novembre 2009), dell'assetto geologico-strutturale e dei risultati ottenuti da analisi chimiche e isotopiche delle acque ha consentito di distinguere il contributo dei tre acquiferi alla portata del flusso di base e di valutarne la potenzialità in due periodi con differente disponibilità idrica: nel 1992, anno di scarsa disponibilità idrica, e nel 2009, anno di buona disponibilità idrica.

La portata dell'Aso, nel tratto montano analizzato, è quasi interamente sostenuta dal flusso di base, cioè dalla portata complessivamente erogata dalle sorgenti esistenti nel bacino idrografico considerato. Il ruscellamento, nel contesto idrogeologico descritto, ha un'incidenza trascurabile poiché si esaurisce pochi giorni dopo l'evento piovoso.

L'approfondimento del quadro idrogeologico finora delineato consentirà di affinare il modello concettuale sopra esposto, definendo con maggiore precisione i limiti dei bacini idrogeologici dei sistemi sorgivi identificati e la corretta ubicazione delle aree di ricarica; a tale scopo sono già state eseguite nel corso del 2009 periodiche analisi isotopiche specifiche ( $^{18}\text{O}$  e D) e sono state installate stazioni idrometrografiche per il controllo automatico e continuo della portata del fiume in corrispondenza di sezioni rappresentative del contributo di ciascun acquifero al flusso di base.

Le potenzialità idriche valutate sono state confrontate con i dati di prelievo idropotabile del CIIP e con le portate derivate dall'ENEL. L'incidenza, espressa in percentuale sulla totalità delle risorse idriche disponibili, dei prelievi ENEL supera generalmente quella del CIIP; la situazione si inverte solo nei mesi di massima magra, quando le risorse di superficie sono al minimo della loro disponibilità. La situazione descritta, comune a tutti i tratti montani dei corsi d'acqua dell'Appennino carbonatico,

mette in evidenza che i locali prelievi sotterranei e le derivazioni superficiali incidono esclusivamente su risorse idriche sotterranee di ottima qualità. L'integrità di tali risorse è garantita, infatti, da aree di ricarica ad alta quota e a bassissimo grado di antropizzazione; nel caso specifico la tutela dell'area di studio è ulteriormente favorita dall'esistenza del Parco Nazionale dei Sibillini.

Qualunque intervento di razionalizzazione dei prelievi di acque sotterranee nelle aree appenniniche carbonatiche non può, quindi, prescindere da una seria revisione delle destinazioni d'uso delle derivazioni delle così dette "acque superficiali", che nella realtà costituiscono a tutti gli effetti prelievi di acque sotterranee di qualità pregiata con destinazione d'uso generalmente industriale.

### **Bibliografia**

Boni C. & Petitta M. (2007) - Studio idrogeologico per l'identificazione e la caratterizzazione degli acquiferi che alimentano le sorgenti dei corsi d'acqua perenni dei Monti Sibillini, esteso all'intera area del Parco Nazionale. Autorità Bacino Fiume Tevere, Parco Nazionale Monti Sibillini, Dip. Scienze Terra Università Roma "La Sapienza".

Marcellini M., Nanni T., Palpacelli S. & Vivalda P. (2005)- Le sorgenti del versante adriatico dei Monti Sibillini (Marche centrali). Geotalia 2005, Quinto Forum Italiano di Scienze della Terra, 21-23 settembre, Spoleto.

Mastrorillo L., Baldoni T., Banzato F., Boscherini A., Cascone D., Checcucci R., Petitta M. & Boni C. (2009) – Analisi idrogeologica quantitativa del dominio carbonatico umbro. Italian Journ. Engineering Geology and Environment 1/2009.

Nanni T, Vivalda P., Marcellini M. & Palpacelli S. (2006) – Spring monitoring and analysis of groundwater circulation in the Sibillini mountains aquifers (Adriatic side of central Apennine, Italy). Proceedings of 8<sup>th</sup> Conference on Limestone Hydrogeology., 197- 200, Neuchatell, Switzerland, September 21-23, 2006.

Boni C., Baldoni T., Banzato F., Cascone D., Petitta M. (2010). - Hydrogeological study for identification, characterization and management of groundwater resources in the Sibillini Mountains National Park. Italian Journal of Engineering Geology and Environment, 2, 33-51.



## Lo svuotamento degli acquiferi carsici attraverso l'analisi degli idrogrammi sorgivi

**Francesco Fiorillo, Francesco M. Guadagno**

Dipartimento di Studi Geologici ed Ambientali, Università degli Studi del Sannio, via dei Mulini 59/A, 82100 Benevento; francesco.fiorillo@unisannio.it

Viene analizzato lo svuotamento di un generico acquifero carsico attraverso l'utilizzo di semplici modelli fisici, partendo da un serbatoio cilindrico dalle caratteristiche geometriche note. L'argomento è ben noto nel campo dell'idrogeologia, soprattutto con riferimento ai sistemi carsici, ma le equazioni che descrivono il processo di svuotamento, basate su diversi approcci, presentano differenze tra loro.

L'analisi è in genere condotta nel tratto di esaurimento di un idrogramma sorgivo (*recession limb*), corrispondente a quel tratto concavo che segue un picco o una piena, non influenzato da processi di ricarica; la parte ultima della curva viene riferita al c.d. flusso di base (*base flow recession*).

La conoscenza della modalità di decremento delle portate sorgive durante i periodi di svuotamento dei sistemi carsici costituisce un importante strumento della gestione delle risorse idriche, soprattutto durante i periodi di siccità.

Nelle aree con clima mediterraneo, la lunga stagione estiva calda e secca tra giugno e settembre è quella che causa lo svuotamento degli acquiferi carsici. Durante questo periodo, molte regioni dell'Italia meridionale dipendono totalmente da sorgenti carsiche, essendo scarse se non assenti altre fonti di approvvigionamento.

L'importanza di queste sorgenti è stata notevole fin dall'epoca Romana sia perché, grazie alle favorevoli condizioni idrogeologiche e topografiche, queste consentono una distribuzione dell'acqua di ottima qualità con la sola gravità, sia perché garantiscono un soddisfacente approvvigionamento idrico durante la lunga estate secca.

Come noto, nei sistemi carsici l'acqua viene trasmessa prevalentemente attraverso condotti, mentre la gran parte è immagazzinata all'interno di fessure e della matrice. La conoscenza dell'intera struttura di drenaggio è necessaria per impostare un qualsiasi modello fisico di svuotamento, ma questa struttura è generalmente ignota e solo forti semplificazioni consentono di configurare un modello fisico, la cui affidabilità rimane comunque dubbia.

Queste ragioni hanno spinto a considerare un modello fisico semplice, che riproduca esattamente un idrogramma sorgivo durante le fasi di svuotamento. In tal modo vengono valutati i ruoli dei vari parametri geometrici ed idraulici coinvolti, con importati risvolti circa il comportamento dei reali sistemi carsici.

L'analisi si basa sul presupposto che un serbatoio *Torricelliano* o uno *Lineare* (o la combinazione dei due) possa descrivere l'intero processo di svuotamento di un sistema carsico.

La caratteristica principale del serbatoio *Torricelliano* è il decremento lineare della portata con il tempo; la principale conseguenza di questo comportamento è una pendenza costante dell'idrogramma (retta), indipendentemente dall'altezza iniziale dell'acqua nel serbatoio. Esso definisce lo svuotamento senza perdita di energia e simula lo svuotamento di grossi condotti carsici.

Quando la viscosità del fluido e le forze di attrito sono considerate, lo svuotamento può essere ricondotto ad un serbatoio *Lineare*, con perdita di energia durante l'intero processo. In questo caso la legge di *Darcy* o quella di *Poiseuille*, opportunamente applicate al serbatoio considerato, consentono di pervenire alla espressione generale della nota formula di *Maillet*, con la portata che diminuisce esponenzialmente con il tempo e "linearizzata" in un grafico semilogaritmico.

L'analisi evidenzia i principali parametri che controllano il coefficiente di esaurimento (*recession coefficient*), fornendo un significato fisico allo stesso. Questo risulta dipendere dalla configurazione globale dell'acquifero carsico, e non rappresenta specificamente la permeabilità dei condotti carsici, delle fessure o della matrice. In particolare, esso è proporzionale ad una costante idraulica che esprime le caratteristiche di drenaggio dell'acquifero fino alla sorgente. Inoltre, il coefficiente di esaurimento è inversamente proporzionale all'area effettiva del serbatoio che contribuisce allo scarico (*discharge area*), data dal prodotto dell'area occupata dalla tavola d'acqua (acquifero non confinato) con la porosità effettiva.

Il cambiamento del coefficiente di esaurimento che generalmente si osserva durante lo svuotamento di un reale acquifero carsico viene associato alla variazione della porosità effettiva o a quello dell'area occupata dalla tavola d'acqua.

Ampi bacini di alimentazione favoriscono un lento decremento della pressione nella zona freatica durante lo svuotamento e determinano bassi valori del coefficiente di esaurimento.

Alti valori del coefficiente di esaurimento sono associati a rapide diminuzioni di pressione, favorite da piccoli bacini di alimentazione o indotte dallo svuotamento di pozzi e condotti al di sopra della tavola d'acqua.



## La gestione integrata delle risorse idriche e dei bacini idrogeologici

**Giovanni Barrocu**

*Ordinario di Geologia Applicata, Dipartimento di Ingegneria del Territorio – Sezione di Geologia Applicata e Geofisica Applicata, Università di Cagliari, barrocu@unica.it*

La gestione delle risorse idriche integrate implica che esse siano riferite non tanto ai bacini idrografici quanto ai bacini idrogeologici, reali alimentatori degli acquiferi, e ai bacini d'utenza, verso i quali le acque possono essere trasferite anche a grande distanza.

Specie nei mezzi fessurati è frequente che le idrostrutture travalichino diversi bacini idrografici e amministrativi, nazionali e internazionali, senza rispetto dei limiti geomorfologici degli spartiacque superficiali, della qual cosa si deve tener conto nel bilancio degli afflussi e dei deflussi superficiali e sotterranei.

È nel concetto di gestione delle risorse idriche integrate che tutte le acque, superficiali e sotterranee, siano considerate in termini di bilancio delle quantità e qualità richieste nel territorio per i diversi usi, il che comporta di necessità che esse siano regimate, immagazzinate e trattate con interventi e infrastrutture progettate nell'interesse dell'uomo e nel rispetto dell'ambiente e del territorio.

Le acque sotterranee, alle quali è tradizionalmente rivolto l'interesse particolare dell'idrogeologia, sono le più pregiate per gli usi idropotabili, mentre le superficiali, primarie e rigenerate, costituiscono la risorsa idrica maggiormente disponibile, che meglio può essere regimata e trattata con interventi e opere d'ingegneria anche per altri molteplici usi, quali l'irriguo, l'industriale, il ludico e per la produzione di energia.

I rapporti delle acque superficiali sono più stretti e diretti con le acque sotterranee di circolazione poco profonda, mentre quelli con le acque di circolazione più profonda, meno evidenti e più difficili da stabilire, possono essere chiariti solo con l'impiego delle metodologie isotopiche.

Riconoscendo la validità e l'utilità di tali metodi, l'UNESCO, accogliendo la proposta di vari comitati nazionali per l'International Hydrological Programme (IHP) e fra i primi dell'italiano, ha promosso e raccomandato l'istituzione dell'Idrologia Isotopica, ma tale disciplina per la quale in altri paesi europei sono state istituite cattedre e laboratori, non si è ancora potuta ancora affermare.

Gli acquiferi costituiscono la parte più fragile dei bacini idrogeologici per quanto riguarda sia la zona satura sia la non satura, esposta direttamente a diverse forme di degrado della componente fisica del suolo, reversibili e irreversibili, quali l'erosione ad opera del deflusso superficiale, e gli inquinamenti.

Le risorse e le riserve della zona satura, rese più vulnerabili all'inquinamento per il degrado del suolo di co-

pertura, sono esposte anche al sovrasfruttamento, che può comportare sifonamenti dei fini e subsidenza. Le pressioni idrodinamiche esercitate sui versanti anche di bacini contermini possono produrre frane e colate torrenziali di detriti, distruttive di centri abitati anche con perdite di vite umane, danni di strutture e infrastrutture, e scomparsa di suoli produttivi.

Gli interventi di tutela per la salvaguardia degli acquiferi non dovrebbero essere rivolti solo alle acque di più rapida corruzione sotterranea ed emergenza, ma anche a quelle di più antica infiltrazione, che solo in parte sono da considerare fossili, termine riservato alle acque infiltratesi in diverse condizioni climatiche e rimaste intrappolate in idrostrutture profonde.

Tutte le acque non costituiscono solo risorse, che si rigenerano naturalmente, e riserve immagazzinate nel tempo in funzione dei cicli climatici, le superficiali come ghiacciai e le sotterranee nelle idrostrutture delle discontinuità di varia profondità nelle rocce, ma anche i maggiori fattori dei processi di erosione superficiale e sotterranea.

Le parti più depresse dei bacini sono tendenzialmente vulnerabili alle esondazioni delle acque superficiali in piena. È fondamentale che per una buona riuscita degli interventi di sistemazione, siano messe bene in evidenza le litologie e le strutture che hanno condizionato lo sviluppo delle diverse idrografie che si sono sovrapposte nel corso dei tempi geologici.

L'idrogeologia, intesa come la disciplina che riguarda le interazioni fra le acque e i terreni, non deve perciò limitarsi allo studio delle acque sotterranee per renderle disponibili ma deve considerare anche le azioni che le acque superficiali possono produrre e subire al contatto con la superficie terrestre.

L'attenzione del geologo e dell'ingegnere deve essere rivolta anche all'idrogeologia superficiale, in una visione più ampia dei processi che regolano gli afflussi e i deflussi finora considerati con diverse prospettive dalla geomorfologia e dall'idrologia.

Le acque considerate nel loro insieme sono fattore fondamentale ed imprescindibile di sviluppo. La gestione integrata delle risorse idriche, come parti del ciclo idrologico e nell'insieme con tutte le altre componenti ambientali del territorio, biotiche e abiotiche, è la sola procedura per prevenire e mitigare conflitti di interessi economici fra le popolazioni residenti dove le risorse si formano e dove esse vengono impiegate.

Per la sua complessità la gestione integrata dei bacini richiede la collaborazione di esperti e tecnici di varie competenze. E' essenziale che la ricerca e i corsi univer-

sitari siano finalizzati alla preparazione dei gestori di vario livello, anche per non rimanere in ritardo rispetto agli standard europei.



**ACQUA 2011**

## Progetto di un modello tridimensionale del sottosuolo della Pianura Padana

**Tullia Bonomi<sup>(1)</sup>, Giuseppe Giuliano<sup>(2)</sup>, Beatrice Bertolo<sup>(3)</sup>, Angelo Cavallin<sup>(1)</sup>, Francesco Puma<sup>(3)</sup>, Giovanni Maria Zuppi<sup>(2)</sup>**

<sup>(1)</sup>Università di Milano Bicocca

<sup>(2)</sup>Dipartimento DTA del CNR

<sup>(3)</sup>Autorità del Bacino del Po, Parma

Il Dipartimento DTA del CNR, mediante l'intervento operativo di tre Istituti di ricerca tematici IRSA, IGAG, IDPA e in collaborazione con l'Università di Milano Bicocca - Dipartimento di Scienze dell'Ambiente e del Territorio, ha aderito all'invito rivolto dall'Autorità del Bacino del Fiume Po alla comunità scientifica a formulare osservazioni sul Progetto di Piano e proposte di azioni che possano essere di ausilio per la risoluzione di problemi ancora aperti.

La misura è finalizzata alla realizzazione di un modello unitario tridimensionale a piccola scala riguardante il sottosuolo della Pianura Padana, connesso a modelli di dettaglio a scala maggiore per le specifiche applicazioni, che permetta la parametrizzazione dei corpi idrogeologici che lo caratterizzano, mediante l'uso delle tecnologie informatiche. Sulla base di questa ricostruzione tridimensionale sarà successivamente possibile, utilizzando i dati relativi al monitoraggio quantitativo e qualitativo delle componenti il ciclo idrologico delle acque sotterranee, applicare modelli di flusso e trasporto necessari per valutarne e proteggere le risorse.

Un siffatto modello, superando ed integrando le particolarità e la molteplicità delle ricostruzioni di area limitata, potrà rappresentare una base conoscitiva omogenea, unitaria e condivisa del sottosuolo per valutare organicamente la disponibilità delle risorse idriche, valorizzarne l'uso, individuando le aree critiche e i relativi periodi di criticità, proteggerne l'integrità e lo stato qualitativo. La misura rappresenta uno strumento per armonizzare, coordinare ed integrare il patrimonio di conoscenze sul sottosuolo disponibile presso la comunità scientifica, l'Autorità di Bacino e gli Enti regionali.

È importante sottolineare la possibilità di realizzare mediante la misura un sistema conoscitivo unitario del sottosuolo funzionale alle attività sia pianificatorie (Autorità di bacino/distretto, Regioni) che gestionali (enti territoriali e di servizio).

In particolare attraverso l'applicazione di approcci

scientifici e tecnici innovativi si intende contribuire organicamente:

- alla omogeneizzazione delle conoscenze di base e al miglioramento degli strumenti analitici per la caratterizzazione dei corpi idrici sotterranei,

- all'approfondimento degli elementi del bilancio idrogeologico e delle relazioni col sistema delle acque superficiali,

- al miglioramento dell'efficacia delle reti di monitoraggio,

- al controllo delle pressioni e degli impatti esercitati dalle attività umane ed alla verifica delle relative azioni di mitigazione,

- all'integrazione delle misure di attuazione del Piano.

La misura si avvarrà dell'attività dei tre Istituti di specifica tematica e dell'Università di Milano Bicocca - Dipartimento di Scienze dell'Ambiente e del Territorio. Collaborazioni specifiche saranno stabilite con le istituzioni universitarie dell'area padana presso le quali risiede un prezioso patrimonio di conoscenze idrogeologiche.

Il CNR ha chiesto all'Autorità di Bacino di condividere, nel rispetto dei ruoli e delle responsabilità, le azioni progettuali in termini sia di coordinamento strategico sia di rispondenza implementativa agli obiettivi del Piano.

La misura rappresenta un contributo significativo della comunità scientifica e del CNR in particolare, alla efficacia risolutiva del Piano dei problemi di gestione delle acque del Distretto. Si sottolinea altresì la possibile mutua fertilizzazione tra Piano e Progetto di ricerca riguardo alla valenza e fruibilità dei risultati e alla diffusione di strumenti di indagine innovativi.

La collaborazione potrà altresì contribuire al miglioramento della formazione degli utilizzatori/fruitori/controllori e della diffusione /condivisione dell'informazione tecnica, mediante specifiche attività formative da svolgere presso gli organi di ricerca partecipanti.



ACQUA 2011

## Studio della composizione isotopica delle precipitazioni del Friuli-Venezia Giulia

*M. Michelini, F. Cucchi, O. Flora, B. Stenni, F. Treu, L. Zini.*

*Dipartimento di Geoscienze, Università di Trieste*

L'acqua è una delle risorse più importanti per l'uomo, come dimostra la crescente attenzione che le viene dedicata in diversi ambiti, sociale, ambientale ed economico; sia che vediamo l'acqua come una risorsa da preservare, sia che ne consideriamo il ruolo nella distribuzione e trasporto degli inquinanti, prima di poter pensare a come proteggerla o risanare eventuali aree inquinate bisogna conoscere bene la situazione che si va a studiare. Da qui la necessità di strumenti e metodologie di indagine che permettano di studiare gli acquiferi nella loro completezza, a partire dalla fonte di alimentazione, che in genere è identificabile con le acque meteoriche.

Tra le diverse svariatissime possibilità offerte dalle analisi isotopiche per le applicazioni in idrogeochimica ed idrogeologia, quelle basate sugli isotopi stabili e instabili degli elementi costitutivi dell'acqua (H e O), sono riconosciute come il primo importantissimo passo verso la comprensione dell'origine e delle modalità di circolazione delle acque stesse, dato che questi possono fornire informazioni estremamente affidabili. La composizione isotopica dell'ossigeno ( $\delta^{18}\text{O}$ ) e dell'idrogeno ( $\delta\text{D}$ ) viene definita come la deviazione in parti per mille del rapporto isotopico di un campione rispetto ad uno standard di riferimento; la sua notazione è:  $\delta\text{‰} = 1000 (R_{\text{campione}} - R_{\text{standard}}) / R_{\text{standard}}$  con R rapporto di abbondanza tra  $^{18}\text{O}$  e  $^{16}\text{O}$  ( $R^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ ) o tra  $^2\text{H}$  e  $^1\text{H}$  ( $R^2\text{H}/^1\text{H}$ ) e con V-SMOW (Vienna-Standard Mean Ocean Water) scelto come standard internazionale di riferimento. La composizione isotopica dell'ossigeno è una marcatura naturale delle acque ed è un parametro conservativo che, normalmente, può essere variato solo mediante mescolamento con acque con caratteristiche isotopiche diverse. Questa marcatura, determinata da fenomeni di evaporazione dell'acqua oceanica nella produzione del vapore d'acqua e di condensazione durante la formazione delle precipitazioni, risente di alcuni fattori che condizionano la composizione isotopica, come l'effetto stagionalità (le acque meteoriche estive risultano più positive di quelle invernali) e l'effetto altitudine (le piogge a quote più basse sono più positive di quelle a quote più alte). L'inquadramento idrogeologico di una qualsiasi area deve, in via prioritaria, essere supportato da alcuni dati di base che sono indispensabili per differenziare le zone di alimentazione idrica delle falde profonde. Non si può, quindi, prescindere dalla conoscenza della composizione isotopica dell'ossigeno media

annua ponderata delle precipitazioni, della escursione isotopica massima estate-inverno dell'area presa in esame, dei gradienti isotopici verticali. La geochimica isotopica ci permette di stimare la quota media del bacino di alimentazione di un acquifero, i tempi di residenza dell'acqua in un circuito idrologico, la sua profondità e di effettuare valutazioni sulle dinamiche temporali e spaziali che producono il mescolamento tra diverse tipologie idriche.

In questo studio sono presentati i dati provenienti da pluviometri situati nel Friuli-Venezia Giulia e raccolti in parte dal Gruppo Geomorfologia e Geologia applicate e Cartografia Informatica (GGACI) e in parte da afferenti al Laboratorio di Geochimica Isotopica del Dipartimento di Geoscienze e analizzati presso la stessa struttura.

Su tutti i campioni è stata determinata la composizione isotopica dell'ossigeno e su gran parte di essi è stata effettuata anche l'analisi della composizione isotopica dell'idrogeno. Le analisi sono state effettuate tramite uno spettrometro di massa Delta Plus Advantage della Thermo - Finnigan e tramite uno spettroscopio laser della PICARRO. Per tutti i campioni sono calcolate le medie annue ponderate, il gradiente isotopico verticale e le escursioni estate/inverno; tutti i dati sono stati comparati con la linea generale per le acque meteoriche (GMWL) e con i dati di temperatura provenienti dalle centraline meteo dell'ARPA disponibili in rete.

I pluviometri attualmente attivi sono venti situati per la maggior parte nel Friuli nord orientale e i periodi di campionamento partono da un periodo compreso tra il 2004 (nel caso dei più vecchi) ed il 2008 fino ad oggi. Discorso a parte merita la zona di Trieste per la quale, grazie alla stazione di Basovizza, è possibile avere una serie storica di dati, quasi ininterrotta, che parte dal 1987.

I valori più negativi si sono osservati per le stazioni di Tarvisio e Monte Lussari, con un'evidente anomalia per quanto riguarda Tarvisio, mentre valori meno negativi sono attribuibili alla zona di Trieste a livello del mare.

La quantità di dati ottenuta permette di avere un buon inquadramento della composizione isotopica delle piogge nella zona del Friuli dal punto di vista spaziale e temporale e permette a questo lavoro di essere una buona base per ulteriori studi idrogeochimici sull'area.

Al momento della presentazione dell'abstract parte delle analisi sono ancora in corso.



## Caratterizzazione chimica e isotopica dell'acquifero del Carso Classico

**Federico Valentinuz, Luca Zini, Riccardo Petrini**

*Dipartimento di Geoscienze, Università di Trieste*

Il Carso Classico è noto fin dall'antichità perchè è sede del reticolo sotterraneo del Fiume Timavo ed è stato oggetto di ricerche idrogeologiche fin dal dalla prima metà del diciannovesimo secolo. Grazie ai numerosi studi condotti oggi sappiamo che è un'idrostruttura complessa, che si estende per circa 750 Km<sup>2</sup> dalla sponda sinistra del Fiume Isonzo alla Conca di Postumia e dalla Valle del Vipacco al Golfo di Trieste.

Il massiccio carsico è costituito da calcari e calcari dolomitici di età compresa fra il Cretaceo Inferiore e l'Eocene Inferiore appartenenti alla formazione dei Calcari del Carso Triestino; questi sono disposti ad anticlinale e sono sovrascorsi su depositi torbiditici risalenti all'Eocene (Tirelli et al., 2008). Le litologie carbonatiche presenti sono generalmente molto carsificabili e ciò ha contribuito allo sviluppo di un carsismo evoluto.

Le sorgenti principali dell'idrostruttura sono distribuite su di un'area di circa 20 km<sup>2</sup>, che si trova a cavallo tra il "Carso Goriziano" e il "Carso Triestino" con portata media del sistema sorgivo di circa 40 m<sup>3</sup>/s e che in piena può raggiungere i 175 m<sup>3</sup>/s.

Da tempo è provata la connessione tra il fiume Reka, le cui acque si infiltrano completamente nell'inghiottitoio puntuale delle grotte di San Canziano (Scocjanske Jame), il corso d'acqua che scorre sul fondo dell'Abisso di Trebiciano e le Sorgenti del Timavo. Tale direttrice di deflusso con direzione NE-SW è considerata tradizionalmente una tra le possibili del corso sotterraneo del Fiume Timavo. L'impiego dei traccianti naturali (composizione chimica e isotopi dell'ossigeno) evidenzia inoltre, specialmente in fase di magra, significativi contributi all'alimentazione delle sorgenti del settore Nord occidentale (Sorgenti dei laghi di Doberdò e Pietrarossa, Moschenizze Nord e Sablesi e Lisert) da parte delle perdite di subalveo del Fiume Isonzo e in minor misura del Fiume Vipacco, corsi d'acqua che lambiscono l'altipiano in corrispondenza del suo bordo Nord occidentale. Durante gli episodi di magra più spinti è stato ipotizzato inoltre che tali apporti possano contribuire all'alimentazione delle Sorgenti del Timavo (eg Gemiti e Licciardello, 1977; Flora et al., 1990). Secondo il modello idrogeologico elaborato a partire dai risultati dei numerosi studi eseguiti (Cucchi e Zini, 2007), la ricarica degli acquiferi proviene in parte dalle due zone di assorbimento sopra menzionate e in parte dall'infiltrazione diretta delle precipitazioni che cadono sull'altipiano. La zona freatica, che si sviluppa in un'articolato sistema di vuoti più o meno incascati, trasferisce le acque sotterranee dalle aree di ricarica verso le sorgenti secondo

direzioni di deflusso determinate dalle differenze di carico idrodinamico, dalla geometria e dalla permeabilità del reticolo ipogeo.

Alcune sorgenti sopra menzionate vengono captate dall'Acegas APS (gruppo che gestisce la rete idrica della provincia di Trieste) mentre l'Acquedotto del Carso di Sežana sfrutta per l'approvvigionamento idrico dei comuni del Carso Sloveno e della zona litoranea di Capodistria alcuni pozzi terebrati nel settore Nord occidentale dell'altipiano in località Klariči. Le acque carsiche dunque rappresentano una risorsa idrica di importanza strategica che tuttavia risulta molto vulnerabile (Cucchi et al., 2000). A tal fine le sistematiche isotopiche di O-H-Sr possono contribuire a migliorare il quadro interpretativo ed a caratterizzare l'idrodinamica delle acque.

Tra il 2007 e il 2010 sono state pianificate tre campagne di campionamento, due in fase di magra (Gennaio 2007 e Febbraio 2008) e una in occasione di un evento di piena (Maggio 2010). I punti acqua campionati sono stati 24 e comprendevano: i fiumi Isonzo, Vipacco e Reka, le acque di fondo e di percolio di alcune cavità, le principali sorgenti e alcuni pozzi e piezometri. Questi ultimi sono stati monitorati allo scopo di caratterizzare chimicamente e isotopicamente la "falda carsica" che si sviluppa nella rete di fratture con diverso grado di carsificazione che segmenta in modo discontinuo il massiccio carbonatico.

Sui campioni raccolti sono stati misurati in situ i parametri: temperatura (T), conducibilità elettrica specifica (K<sub>25</sub>) e pH, mentre in laboratorio si sono determinate le concentrazioni degli ioni principali, della silice e le composizioni isotopiche di ossigeno ( $\delta^{18}\text{O}$ ), idrogeno ( $\delta^2\text{H}$ ) e stronzio ( $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ). Inoltre, tramite un pluviocampionatore posizionato in località Opicina (località ubicata sull'altipiano carsico alla quota di 300 m s.l.m), sono state raccolte le precipitazioni che hanno dato origine all'episodio di piena considerato per determinarne i valori di  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$ .

I risultati delle analisi idrogeochimiche e isotopiche confermano la suddivisione in gruppi delle sorgenti proposta in passato (eg Gemiti e Licciardello, 1977; Flora et al., 1990). In particolare sulla base dei valori di  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$  misurati possono essere distinte le acque dei fiumi campionati da quelle delle precipitazioni cadute sull'altipiano. A causa dell'effetto altitudine in termini di aree di ricarica il fiume Isonzo risulta più impoverito negli isotopi pesanti di ossigeno e idrogeno (valori più negativi di  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$ ) rispetto ai Fiumi Vipacco e Reka e alle piogge campionate. Nel Carso Goriziano è ben evidente l'apporto di

acque provenienti dal fiume Isonzo testimoniato dal maggiore impoverimento in isotopi pesanti delle acque di questo settore.

Il rapporto  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  evidenzia due trend evolutivi: un primo riguardante le acque del settore occidentale (sorgenti del Carso Goriziano) ed un secondo riguardante il corso sotterraneo del fiume Timavo. I due trend sono stati interpretati come il risultato congiunto della miscelazione delle acque fluviali provenienti nel primo caso dal Fiume Isonzo e nel secondo caso dal Fiume Reka con acque di infiltrazione locale, caratterizzate da un rapporto isotopico dello stronzio vicino a quello delle rocce carbonatiche che costituiscono l'idrostruttura e da una composizione isotopica dell'ossigeno e dell'idrogeno compatibile con quella delle precipitazioni che cadono sull'altipiano. La variazione del rapporto isotopico dello stronzio testimonia inoltre la progressiva evoluzione che subiscono le acque sotterranee nel corso dell'attraversamento dei vari termini della serie carbonatica che costituiscono l'idrostruttura.

#### **Bibliografia essenziale:**

- Cucchi F., Forti P., Marinetti E., Zini L. (2000). *Recent developments in knowledge of the hydrogeology of the Classical Karst*. Acta Carsologica, 29/1, 4, 55-78.
- Cucchi F. & Zini L. (2007). *Le acque del Carso Classico*. In L'acqua nelle aree carsiche in Italia, a cura di F. Cucchi, P. Forti & U. Sauro, Mem. Ist. It. Spel., serie II, Vol. XIX, 33-40, Bologna 2007.
- Gemiti F., Licciardello M. (1977). *Indagini sui rapporti di alimentazione delle acque del Carso triestino e goriziano mediante l'utilizzo di alcuni traccianti naturali*. Annali Gruppo Grotte Ass. XXX Ottobre, Sezione CAI Trieste, 6, 43-61.
- Flora O., Galli G., Negrini L., Longinelli A. (1990). *Studio geochimico-isotopico di alcune sorgenti carsiche: un nuovo modello idrologico*. Atti e Memorie della Commissione Grotte "E. Boegan", vol. XXIX.
- Shand P., Darbyshire D.P.F., Love A.J., Edmunds W.M. (2009). *Sr isotopes in natural waters: Applications to source characterisation and water-rock interaction in contrasting landscapes*. Applied Geochemistry, 24, 574-586.
- Tirelli T., Ravalico M., Cucchi F., Covelli S., Fanucci F., Fanzutti G.P., Fontana A., Marocco R., Poli M.E., Ponton M., Tunis G., Zini L. (2008). *Carta di sintesi geologica GEO-CGT. 1:10000. Fogli: 088-Gorizia, 109-Grado, 110-Trieste*. DiSGAM Università degli Studi di Trieste & R.A. Friuli Venezia Giulia, Trieste.



## Hydrogeological and hydrogeochemical features of the peculiar aquifer of Pianosa Island (Tuscan Archipelago, Italy)

**M. Doveri<sup>(1)</sup>, R. Giannecchini<sup>(2)</sup>, M. Mussi<sup>(1)</sup>, I. Nicotra<sup>(3)</sup>, A. Puccinelli<sup>(2)</sup>**

(1) Istituto di Geoscienze e Georisorse - C.N.R., Pisa - doveri@igg.cnr.it

(2) Università di Pisa - Dipartimento di Scienze della Terra - rgiannecchini@dst.unipi.it

(3) Provincia di Livorno - i.nicotra@provincia.livorno.it

The Pianosa Island (Tuscan Archipelago), characterized by the typical flat morphological structure, is formed by Neogenic-Quaternary sedimentary rocks. Despite its small extension and poor rainfall amount, the Pianosa aquifer is characterized by significant groundwater resources, supporting the presence of about 2,000 people in the past. Nevertheless, the groundwater overexploitation and the local land use (agricultural activity and cattle-breeding, related to the local penal settlement) caused sea-water intrusion and pollution phenomena. An improvement of such situation occurs since 1998, owing to the closing of the penal settlement. By means of a multidisciplinary approach, this research intended to describe the hydrogeological and hydrogeochemical features of the Pianosa Island aquifer system.

Preliminary results show that the groundwater recharge and circulation are substantially controlled by the hydro-structural conditions. The water table flow direction is generally W-E, in conformity with the dip direction of the stratigraphic contact between the outcropping permeable calcarenite and the underlying impermeable marly-clayey rocks. However, the last present conglomerate and sandstone intercalations, sometimes in contact

(by angular unconformity) with the calcarenite, determining a continuity in the groundwater circulation, which is phreatic in the calcarenite, and confined in the conglomerate and sandstone horizons.

The groundwater budget points out that the aquifer system recharge occurs chiefly between January and March, as confirmed also by isotopic data.

In agreement with the hydro-structural and piezometric conditions, the hydrogeochemical analyses confirm the recharge of the confined horizons (conglomerate and sandstone) by the superficial calcarenite. The isotopic data indicate that the aquifer system is recharged by the rainfall direct infiltration.

The chemical analyses of most groundwater samples suggest an intermediate facies Na-Cl/Ca-HCO<sub>3</sub>, produced by the combination of the sea spray and the circulation in prevalently carbonate aquifer. Clearly Na-Cl groundwater prevails in the eastern portion of the island, evidencing the seawater intrusion in the calcarenite, also confirmed by water table conditions and isotopic data. Comparing recent and past data, a significant predisposition to this phenomenon is recognizable in the eastern coast.



ACQUA 2011

## Caratteristiche idrogeologiche, idrochimiche ed isotopiche degli acquiferi della Pianura Pavese (Lombardia Meridionale)

**Giorgio Pilla**

*Dipartimento di Scienze della Terra – Università degli Studi di Pavia – Via Ferrata, 1 – 27100 Pavia*

Il sottosuolo della Pianura Pavese è costituito da sedimenti appartenenti al sistema deposizionale continentale padano di età plio-pleistocenica (I.R.S.A. - C.N.R., 1981, REGIONE LOMBARDIA & ENI DIVISIONE AGIP, 2002). Questo sistema è sostenuto da sedimenti di origine marina a bassa permeabilità. Esso è articolato in due fondamentali sequenze litostratigrafiche sovrapposte di origine continentale: la sequenza inferiore del "Villafranchiano" Autoctorum e la sequenza superiore alluvionale pleistocenica medio-superiore.

La prima, di origine palustre-lacustre, è litologicamente costituita da un complesso limo-argilloso al cui interno si rinvencono ricorrenti livelli sabbiosi. La seconda è invece costituita da sedimenti depositati in ambiente francamente fluviale (Pleistocene medio-superiore), per lo più costituiti da sabbie e ghiaie, a cui si intercalano orizzonti limosi ed argillosi. In corrispondenza delle principali incisioni fluviali (F. Po, F. Ticino e F. Lambro) si ritrovano, infine, orizzonti costituiti prevalentemente da ghiaie, sabbie e limi (alluvioni antiche e recenti oloceniche) di modesto sviluppo verticale.

Nell'ambito dell'unità alluvionale, che assume particolare interesse idrogeologico in quanto sede dei serbatoi idrici maggiormente sfruttati, è possibile distinguere un acquifero superficiale che ospita una falda a regime freatico e diversi acquiferi via via più profondi che ospitano invece falde con un regime ad affinità artesiane (BRAGA & CERRO, 1988; PILLA, 1998).

La falda a pelo libero possiede un livello piezometrico che si attesta a pochi metri di profondità dal piano di campagna e presenta un campo di moto diretto verso sud-est, palesemente condizionato dall'azione drenante operata dall'incisione delle valli a cassetta dei principali corsi d'acqua che solcano la pianura (F. Po, F. Ticino e F. Lambro),

Nelle porzioni superiori dell'acquifero superficiale si riconosce, specialmente nei settori centro meridionali della Pianura Pavese, anche una modesta falda freatica sospesa. Tale falda possiede un'importanza prettamente locale e trae la propria alimentazione per lo più dall'infiltrazione superficiale (acque di precipitazione e, nel periodo tardo-primaverile ed estivo, acque irrigue). Il corpo idrico sospeso assume però rilevanza in quanto esplica un'azione protettiva per la sottostante falda freatica di base nei confronti di potenziali inquinamenti d'origine antropica.

L'acquifero ospitante i corpi idrici a pelo libero presenta uno spessore di 60-80 m e risulta separata da quelli profondi sottostanti che ospitano le falde confinate da diaframmi a bassa conducibilità idraulica (acquicludi), generalmente potenti e di buona continuità laterale. Gli acquiferi confinati mostrano, nel loro insieme, una potenza variabile in funzione della presenza di morfostrutture sepolte, modellate nel basamento marino e localizzate in corrispondenza dei fronti di sovrascorrimento appenninici (BRAGA & CERRO, 1988; ENI DIVISIONE AGIP, 2002). Gli spessori maggiori degli acquiferi confinati si rinvencono nel settore centro-settentrionale della pianura pavese, mentre procedendo verso meridione i medesimi acquiferi tendono ad assottigliarsi, a causa del sollevamento a quote prossime o superiori al piano di campagna del basamento di origine marina (Colle di San Colombano).

Allo stato attuale delle conoscenze il campo di moto delle falde confinate allocate a maggior profondità non è sufficientemente definito, ma si può ragionevolmente presumere che risulti condizionato, almeno per quelle più profonde, dalle morfostrutture sepolte che sostengono l'acquifero padano (BRAGA & CERRO, 1988).

L'indagine idrochimica è stata effettuata grazie ad un numero significativo di analisi (35), condotte su campioni di acque sotterranee prelevate da pozzi arealmente ben distribuiti nel territorio della Pianura Pavese e con i filtri localizzati a varie profondità (tra 10 e 230 m circa). Le analisi idrochimiche hanno previsto la determinazione dei macrocostituenti, di alcuni metalli (Fe, Mn, As, Ba, Be, Bo, Cr totale, Cr esavalente, Ni, Cu, Se e Zn) e di alcuni costituenti organici chiaramente inquinanti (idrocarburi alifatici clorurati cancerogeni, idrocarburi alifatici clorurati non cancerogeni, erbicidi azotati, pesticidi organo clorurati ed idrocarburi aromatici).

Le acque sotterranee della Pianura Pavese presentano un'idrofacies di tipo bicarbonato-calcica con una mineralizzazione medio-bassa (conducibilità elettriche comprese tra 170 e 400  $\mu\text{S}/\text{cm}$  circa), anche se alcune di esse, (sud-orientale della Pianura Pavese) presentano un sostanziale incremento della loro mineralizzazione, come evidenziato dai valori assunti dalla conducibilità elettrica (550-950  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ). Tale aumento della mineralizzazione è imputabile primariamente ad un incremento della componente clorurato-sodica, che trova giustificazione dall'intrusione verso l'acquifero alluvionale di acque ad elevata salinità (salamoie profonde della Pianura Padana; CONTI ET AL.,

2000), provenienti dal sottostante substrato di origine marina che si localizza, nei settori meridionali della pianura pavese, a poche decine di metri dal piano di campagna. Nella Pianura Pavese centro settentrionale si osserva che a profondità superiori a 60-80 m, la conducibilità elettrica delle acque tende a diminuire, attestandosi verso valori di 200÷300  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , evidenziando molto bene il passaggio tra l'acquifero freatico ed i sottostanti acquiferi confinati.

Per quanto riguarda la distribuzione in falda dei nitrati si evidenzia che la loro concentrazione tende a diminuire con la profondità di campionamento, da valori appena inferiori a 10 mg/l nei corpi idrici più superficiali, fino a concentrazioni prossime allo zero in quelli più profondi. La buona qualità delle acque delle falde che si sviluppano a maggiori profondità è testimoniata anche dalla generalizzata mancanza dei composti inquinanti di origine organica analizzati per il presente studio; solamente nel settore meridionale della Pianura Pavese sono state accertate, anche se con concentrazioni modeste, la costante presenza di erbicidi, quali il bentazone. Per quanto riguarda i metalli solamente il Fe e il Mn la cui presenza è, però, riconducibile ad un'origine naturale, si rinvenivano con concentrazioni che spesso superano i limiti di legge per la potabilità delle acque. Il Ferro in alcuni campioni, prevalentemente provenienti dalle falde idriche più profonde a regime confinato, possiedono concentrazioni anche dell'ordine di 400-500  $\mu\text{g}/\text{l}$ , mentre il anche Manganese mostra, in generale, concentrazioni abbastanza elevate (50-130  $\mu\text{g}/\text{l}$ ).

Lo studio isotopico delle acque sotterranee della Pianura Pavese ha previsto, sui medesimi campioni prelevati per l'indagine idrochimica, l'analisi degli isotopi stabili della molecola dell'acqua e del Carbonio-14 (11 analisi effettuate).

Gli isotopi stabili della molecola dell'acqua hanno permesso di evidenziare le diversità esistenti tra le varie falde studiate, permettendo di acquisire importanti informazioni circa le loro aree ed i meccanismi di alimentazione.

In particolare i segnali dell'Ossigeno-18 riscontrati nella falda freatica nei settori centro-settentrionali della Pianura Pavese (-8.18‰ ÷ e -8.74‰) permettono di avanzare l'ipotesi che l'irrigazione, al contrario della vicina Lomellina (PILLA ET AL., 2006) o del Lodigiano (GUFFANTI ET AL., 2010) non abbia un ruolo così predominante nel sistema di ricarica e di alimentazione della falda freatica, o che comunque tale apporto sia subordinato ad altri tipi di contributo (apporti idrici provenienti dalla falda freatica dai settori di monte e dalle precipitazioni locali). Le acque della falda freatica nei settori pavesi meridionali mostrano invece segnali isotopici più arricchiti in isotopi pesanti (-7.42‰ ÷ -8.08‰) simili a quelli tipici delle precipitazioni locali che sono variabili tra -7‰ e -

8‰ (LONGINELLI & SELMO, 2003).

Per quanto riguarda i valori del  $\delta^{18}\text{O}$  riscontrati nelle acque delle falde confinate profonde, si osserva che essi sono molto uniformi (-8.40‰ ÷ -8.67‰) e del tutto simili a quelli riscontrati nelle falde profonde della Lomellina (PILLA ET AL., 2006), del Lodigiano (GUFFANTI ET AL., 2010) e della Pianura Milanese (AVANZINI ET AL., 1994). I valori isotopici riscontrati permettono, pertanto, di avanzare l'ipotesi che le falde più profonde del sottosuolo pavese (ma il discorso può comunque essere esteso in generale alla porzione sud-occidentale della pianura lombarda che si sviluppa a nord del F. Po) siano la diretta continuazione delle falde profonde ubicate nei settori settentrionali della media e alta pianura.

Per quanto riguarda infine l'attività del Carbonio-14, essa evidenzia una tendenza a mostrare valori minori con l'aumentare della profondità di captazione delle acque (da 75.8 pmc a 40.6 pmc). Le età radiometriche calcolate con i metodi di PEARSON e da FONTES & GARNIER evidenziano valori dell'ordine del migliaio di anni. Tali tempi di permanenza trovano giustificazione dall'innalzamento verso meridione dei sottostanti terreni mio-pliocenici marini a bassa permeabilità, che ostacolano il loro naturale percorso verso i quadranti sud-orientali e dalla lontananza della loro area di ricarica (fascia pedemontana alpina).

### **Bibliografia**

- Avanzini R., Beretta G.P., Francani V. & Nespoli R. (1994) - *Indagine preliminare sull'uso sostenibile delle falde profonde nella provincia di Milano*. CAP Milano, Consorzio per l'acqua potabile.
- Braga G. & Cerro A. (1988) - Le strutture sepolte della pianura pavese e le relative influenze sulle risorse idriche sotterranee. *Atti Tic. Sc. Terra*, 31, 421-433.
- Conti A., Sacchi E., Chiarle M., Martinelli G. & Zuppi G.M. (2000) - *Geochemistry of the formation water Po plain (Northern Italy): an overview*. *Applied Geochemistry*, 15, 51-65.
- I.R.S.A. - C.N.R. (1981) - *Indagine sulle falde acquifere profonde della Pianura Padana*. Quaderni I.R.S.A., 51/2, Roma.
- Longinelli A. & Selmo E. (2003) - *Isotopic composition of precipitation in Italy: a first overall map*. *Journal of Hydrology*, 270, 75 - 88.
- Guffanti S., Pilla G., Sacchi E. & Ughini S. (2010) - Caratterizzazione della qualità e origine delle risorse idriche sotterranee del lodigiano con l'ausilio di strumenti idrochimici ed isotopici. *Italian Journal of Engineering Geology and Environment*, 1, 65-78
- Pilla G. (1998) - Caratterizzazione idrochimica e geochimica isotopica delle falde idriche nel sottosuolo della città di Pavia. *Atti Tic. Sc. Terra*, 40, 185-201.
- Pilla G., Sacchi E., Zuppi G.M., Braga G. & Ciancetti G. (2006). *Hydrochemistry and isotope geochemistry as tools for groundwater hydrodynamic investigation in multilayer aquifers: a case study from the Lomellina, Po plain, South-Western Lombardy, Italy*. *Hydrogeology Journal*, 14, 795-808.
- Regione Lombardia & ENI Divisione AGIP (2002) - *Geologia degli acquiferi Padani della Regione Lombardia*. A cura di Cipriano Carcano e Andrea Piccin. S.E.L.C.A., Firenze.



## Hydrochemical changes induced by 2009 L'Aquila earthquake on the Gran Sasso aquifer

**Raffaele Adinolfi Falcone<sup>1</sup>, Valentina Carucci<sup>2</sup>, Antonella Falgiani<sup>1</sup>, Mauro Manetta<sup>2</sup>, Marco Paolessi<sup>2</sup>, Barbara Parisse<sup>2</sup>, Marco Petitta<sup>3</sup>, Sergio Rusi<sup>4</sup>, Donato Sciannamblo<sup>5</sup>, Michele Spizzico<sup>5</sup>, Marco Tallini<sup>2</sup>**

*1 Laboratori Nazionali del Gran Sasso - INFN, S.S 17 Bis Km 18+910, 67010 Assergi (L'Aquila).*

*2 Dipartimento di Ingegneria delle Strutture, delle Acque e del Terreno, Università dell'Aquila, Nucleo Industriale di Bazzano, 67100, Monticchio (L'Aquila).*

*3 Dipartimento di Scienze della Terra, Università "La Sapienza" di Roma, Piazzale A. Moro, 5, 00185, Roma.*

*4 Dipartimento di Geotecnologie per l'Ambiente e il Territorio, Università "G. D'Annunzio" di Chieti-Pescara, Campus Universitario Madonna delle Piane, Via dei Vestini, 31, 66013, Chieti Scalo.*

*5 Dipartimento di Ingegneria delle Acque e Chimica, Politecnico di Bari, Via Orabona, 4, 70125, Bari.*

The Gran Sasso carbonate aquifer is partitioned, fissured and, to a lesser extent, of a karst nature holding a huge groundwater resource with a total discharge of about 23 m<sup>3</sup>/s, corresponding to a net infiltration of more than 800 mm/year, very high compared to an average rainfall of 1200 mm/year. Generally Gran Sasso groundwater has a bicarbonate-alkali-earth nature with a Ca<sup>+2</sup>/Mg<sup>+2</sup> ratio of 3 to 2.

The earthquake that struck L'Aquila on April 6 2009 (Mw 6.3) occurred at a depth of about 9 km on the SW-dipping active normal fault (Paganica fault) which crosses the Gran Sasso aquifer. Co-seismic and post-seismic changes in water discharge from springs, clearly induced by the earthquake, were observed. Spot measurements of the main physico-chemical parameters of spring waters (T, pH, electrical conductivity, main ions and <sup>222</sup>Rn) were thus carried out, in order to compare data in the interseismic period (pre- and post-seismic) and in the co-seismic one (in this case, ten days after the main-shock) and to determine the effects of the L'Aquila earthquake on groundwater at regional and local scale. Indeed, as is known, the shear zone of active faults favours the rising up of deep crustal fluids, including <sup>222</sup>Rn and CO<sub>2</sub>, which can make more aggressive the groundwater of a carbonate aquifer, like the Gran Sasso one. CO<sub>2</sub> upwelling may have an appreciable impact on the chemistry of Gran Sasso groundwater. When comparing spot-measured values, however, it should be taken into account also that hydrochemical changes are mostly related to the normal hydrogeological cycle and that the effect of rising up of deep fluids may be added to this cycle.

The main remarks which may be drawn are as follows:

- at regional scale: in the co-seismic period, pH and calcite SI values sharply decline in the epicentral area; in the post-seismic one, they decrease in the more peripheral aquifer areas, becoming again normal in the epicentral

area (Fig. 1);

- at local scale: the Vera-Tempera springs, located along the fracture zone of the Paganica fault, increase their electric conductivity, <sup>222</sup>Rn amount and T and currently decrease their pH and calcite SI in the co-seismic and post-seismic periods with respect to the pre-seismic one. All this in spite of a remarkable increase in discharge of about 40% (Tempera) and 10% (Vera), considering that electric conductivity would decrease through the dilution effect due to the groundwater recharge;

- at local scale: into the INFN Underground Laboratories, in the co-seismic period, the groundwater is temporarily undersaturated in calcite and characterised also by lower values of pH, near the regional thrust fault, fact which cannot be entirely attributed to seasonal recharge.

About <sup>222</sup>Rn content, it is noted that <sup>222</sup>Rn sharply rises in the epicentral area (Vera-Tempera springs) in the co-seismic period, but it does not change in peripheral discharge area (Fig. 2); in our conceptual model <sup>222</sup>Rn increase is due to deep fluid upwelling in the epicentral area and above all along the Paganica fault, while in the peripheral discharge area <sup>222</sup>Rn amount is steady, because it takes origin mainly from carbonate rocks and *terra rossa*. Consequently, it is possible to hypothesize two different sources of <sup>222</sup>Rn: the seismic shaking caused by the earthquakes could favour a <sup>222</sup>Rn content increase in groundwater due to the removal from the fractures of *terra rossa* clay minerals and their consequent suspension into groundwater. Otherwise, a rising up of <sup>222</sup>Rn carried with CO<sub>2</sub> fluids in the peripheral discharge area may not be excluded, considering that deep CO<sub>2</sub> anomalies were measured in the co- and post-seismic periods.

Summing up, several data indicate significant changes in the hydrodynamic of the Gran Sasso aquifer due to the April 6 2009 L'Aquila earthquake, affecting the hydrochemical characteristics of the groundwater both close by and far from the epicentral zone.

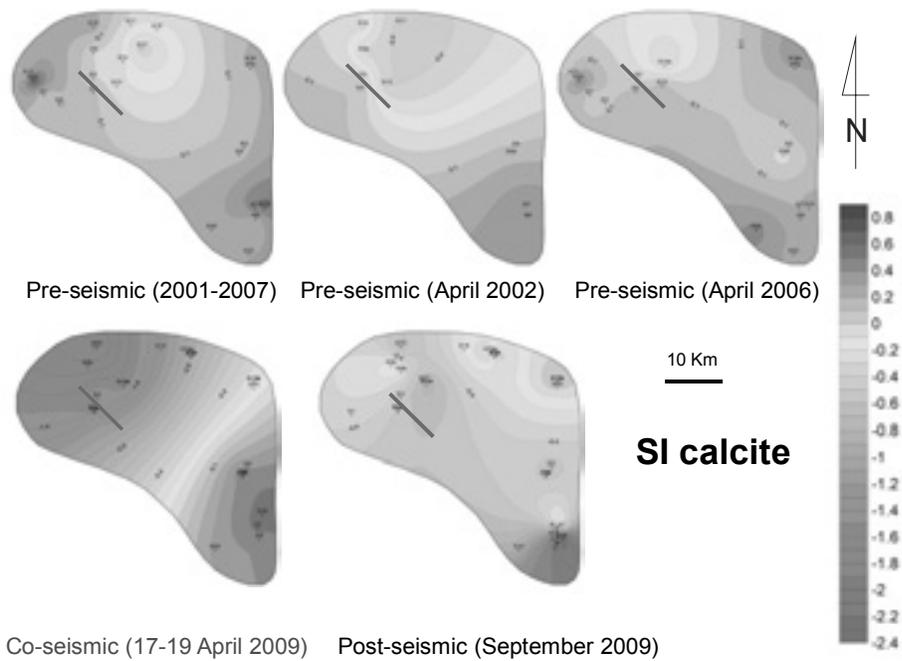


Figure 1. Calcite SI isopleths of Gran Sasso springs. The red line corresponds to the Paganica fault.

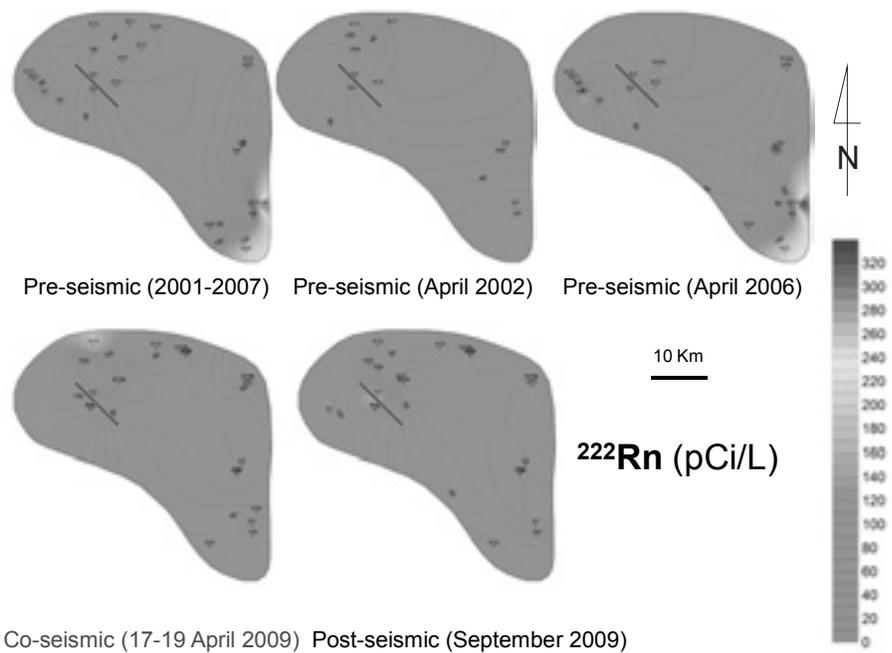


Figure 2.  $^{222}\text{Rn}$  (pCi/L) isopleths of Gran Sasso springs. The red line corresponds to the Paganica fault.



## Caratterizzazione della risorsa termale di Bagni di Lusnizza (Udine) mediante indagini geofisiche integrate

I. Gervasio<sup>(1)</sup>, B. Della Vedova<sup>(1)</sup>, E. Dazzan<sup>(1)</sup>, R. Deiana<sup>(2)</sup>, G. Cassiani<sup>(2)</sup>

<sup>(1)</sup>Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale, Università degli Studi di Trieste

<sup>(2)</sup>Dipartimento di Geoscienze, Università degli Studi di Padova

Si presentano i risultati preliminari di un'indagine geofisica integrata, eseguita in un'area montana particolarmente impervia, allo scopo di caratterizzare le strutture sub-superficiali di una diffusa area di emergenza di acque solforose, con particolare riguardo alle vie preferenziali di risalita. Il progetto è stato condotto in collaborazione con il Dipartimento di Geoscienze dell'Università di Trieste, che ha curato le indagini geochemiche.

L'area di indagine è ubicata nella valle del Rio dello Solfo, affluente di sinistra del fiume Fella, nei pressi dell'abitato di Bagni di Lusnizza, Comune di Malborghetto (UD).

La ricostruzione del modello di circolazione idrotermale, alimentata da un acquifero profondo, è fondamentale per la localizzazione di future indagini invasive (sondaggi) che dovrebbero captare portate maggiori con temperature più elevate, prima che gli apporti idrotermali si miscelino con le acque meteoriche superficiali. Lo scopo finale del progetto è quello di ripristinare gli stabilimenti termali che erano attivi fino agli anni '30.

La valle del Fella è impostata lungo un lineamento strutturale orientato E-W ed immergente a S (linea Fella-Sava) di importanza regionale; esso mette in contatto tettonico la Formazione dei calcari a Bellerophon (a sud) con la Dolomia ladinica dello Schlern (a nord).

L'area di studio è posta nel dominio meridionale dove sono presenti le emergenze di acque solfuree in prossimità e lungo il corso del Rio dello Solfo che scorre da S verso N. Queste emergenze sono alimentate da un acquifero profondo che include necessariamente le formazioni evaporitiche della Formazione a Bellerophon. Le sorgenti di acque solforose si trovano ad una quota di 725 m, in corrispondenza del contatto tra Bellerophon e Werfen e hanno portate elevate e relativamente costanti, con scarsa dipendenza dalla stagionalità. L'area di emergenza è comunque più vasta, in quanto le acque lungo il corso del Rio dello Solfo hanno caratteristiche riducenti anche a monte delle captazioni (fino a oltre 800 m di quota).

Sono stati utilizzati diversi metodi geofisici con diverse risoluzioni e profondità di indagine:

- prospezione elettromagnetica (EM) utilizzando sonde CMD (electromagnetic conductivity meters) della GFInstruments con antenne per indagini fino a 3 e 6 m;
- profili di resistività elettrica (ERT – Electric Resistivity Tomography) con intertraccia 2 m nei pressi delle sorgenti solfuree più importanti e attive, per indagini fino a 20 m di profondità;

- profili di resistività elettrica (ERT) con intertraccia 5 m lungo il Rio dello Solfo, per indagini fino a 40-50 m di profondità;
- profili di resistività elettrica (ERT) con intertraccia 10 m per indagini fino a 140 m di profondità;
- profili di potenziale elettrico (Mise a la masse) per valutare l'inclinazione della risalita delle acque solfuree;
- profili elettromagnetici VLF (Very Low Frequency) che seguono l'andamento delle linee ERT ad intertraccia 5 m, per indagini oltre i 50 m di profondità.

I dati geoelettrici sono stati acquisiti con Syscal Pro della IRIS Instruments a 48 canali utilizzando una configurazione mista Wenner-Schlumberger e dipolo dipolo. L'inversione dei dati, attraverso il programma Profiler (University of Lancaster, A. Binley), ha dato risultati molto soddisfacenti sia per individuare le zone con maggior contenuto di sali (minor resistività), sia per visualizzare la geometria delle diverse formazioni della zona interessata.

L'integrazione dei dati geofisici (EM, ERT e VLF) sostenuti dalle informazioni geologiche dell'area e dai dati geochemici ha permesso di caratterizzare le aree di sorgente e di mettere a fuoco vie di risalita delle acque solfuree, che sono limitate a fasce di 30-40 m di spessore.

### Bibliografia di riferimento

- Carulli G.B., 2006. Carta geologica del Friuli Venezia Giulia in scala 1:150.000 e Note Illustrative. SELCA, Firenze.
- Rajver D., D. Ravnik, 2003. Geothermal characteristics of the Krško basin, Slovenia, based on geophysical research. *Physics and chemistry of the earth* 28, 443-455.
- Gurer, M. Bayrak, O. F. Gurer, S. Y. Sahin, 2008. Delineation of Weathering in the Catalca Granite Quarry with the Very Low Frequency (VLF) Electromagnetic Method. *Pure and Applied Geophysics* 165, 429-441.
- Vereecken H., A. Binley, G. Cassiani, A. Revil, K. Titov, 2006. *Applied Hydrogeophysics*. Nato Science Series IV: Earth and Environmental Sciences, pp 396.
- Milsons J., University College London, 2003. *Field Geophysics*. Wiley, pp 232.
- Martinis A., 1993. *Storia geologica del Friuli*. La NBE, Udine.
- Sundararajan N. et al, 2007. VES and VLF – an application to groundwater exploration. *Khammam, India. The Leading Edge*, 708-716.
- Margiotta S., S. Negri; 2008. Stratigraphic and geophysical integrated methodologies for the interpretation of sulphur water formation environment in Salento (Italy). *International Journal of Coal Geology* 75, 27-39.
- Venturini C., 2002. La successione Permo-Anisica. Alpi e Prealpi Carniche e Giulie. *Guide Geologiche Regionali – FVG*. BE-MA editrice, Milano.
- Telford W.M., R.E. Sheriff, 1990. *Applied Geophysics*. Cambridge University Press, pp 77.



ACQUA 2011

## Caratterizzazione della risorsa termale di Bagni di Lusnizza (Udine) mediante indagini geochemiche

*U. Aviani, R. Petrini, F. F. Slejko, M. Michelini*

*Dipartimento di Geoscienze, Università di Trieste*

Si presentano i risultati di una indagine geochemica concernente la sorgente sulfurea di Bagni di Lusnizza (UD), parte di uno studio multidisciplinare geochemico-geofisico per la valorizzazione della risorsa idrica.

Per caratterizzare la sorgente e definire i possibili modelli di circolazione (oltre alla temperatura della riserva), sono state effettuate analisi di parametri chimico-fisici e isotopici su campioni prelevati nel periodo 2006-2010. L'indagine geochemica è da ritenersi complementare al rilevamento geologico di dettaglio e alle investigazioni geofisiche di superficie.

Obiettivo comune è quello di definire il percorso, la portata e le modalità di risalita delle acque e identificare il sito maggiormente idoneo per l'esecuzione futura di indagini di tipo invasivo (sondaggi) per l'eventuale valorizzazione della risorsa.

La geologia dell'area è caratterizzata da una monoclinale con immersione degli strati verso sud. Le litologie in affioramento sono costituite da Calcari Neri della Fm. a Bellerophon (Permiano Sup.), dalla Fm. di Werfen (Triassico Inf.) e dalle successive formazioni dolomitiche triassiche. L'emergenza è posta in prossimità della zona di contatto tra la Fm. a Bellerophon e la Fm. di Werfen (Mb. di Mazzin) e consiste, oltre alla captazione principale, di numerose venute in subalveo nel Rio dello Solfo. Una spessa copertura detritica non permette di identificare la geologia nelle immediate vicinanze della sorgente.

La tettonica è influenzata principalmente dal retroscorrimento con componente di trascorrenza destra della Linea Fella-Sava, importante struttura regionale che porta le formazioni permiane sopra i terreni dolomitici del Triassico medio. Una serie di faglie subverticali orientate circa NW-SE disloca leggermente con trascorrenza destra tutta la successione.

Le acque hanno un chimismo solfato-calcio-magnesiaco che suggerisce l'interazione con rocce evaporitiche. La temperatura media alla emergenza è di 9.2 °C e subisce piccole variazioni durante l'anno, attribuibili a mescolamenti con l'acquifero superficiale situato nel materasso alluvionale. La conducibilità elettrica media (1976  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) riflette la concentrazione di solfato (media: 1480 mg/L) e dei cationi che ne bilanciano la carica. Il pH è prossimo alla neutralità (valore medio: 7.3) e risente dell'effetto tampone dei carbonati che costituiscono l'acquifero.

Lo ione solfato deriva dal membro evaporitico della Fm. a Bellerophon, che pur non affiorando dovrebbe trovarsi sotto i Calcari Neri e le Dolomie Cariate, anch'esse

non affioranti. I gessi potrebbero anche aver costituito il livello di scollamento preferenziale per il retroscorrimento della Fella-Sava, nel qual caso si troverebbero in lenti discontinue presso la fascia di maggiore deformazione.

Parte del solfato disciolto ha subito riduzione ad opera di batteri solforiduttori trasformandosi in solfuro d'idrogeno, che all'emergenza degassa causando la caratteristica odorazione delle acque.

È interessante notare come il contributo delle acque sulfuree, che si immettono nel Rio dello Solfo, modifichi sensibilmente le caratteristiche chimico-fisiche del Rio stesso. Con questa premessa, e considerando la differenza di conducibilità elettrica delle due componenti, è stato possibile effettuare una prima stima della portata sulfurea complessiva, valutata in 10-60 L/s.

La presenza di tracce di uranio disciolto suggerisce che il percorso delle acque sia piuttosto profondo e che esse interagiscano con le arenarie permiane situate stratigraficamente sotto la Fm. a Bellerophon, il che giustificherebbe inoltre la presenza di elio disciolto. Anche le caratteristiche riducenti sono attribuibili ad una circolazione relativamente lenta e profonda, tale da garantire il tempo per ridurre i composti dello zolfo e del carbonio.

La composizione isotopica di ossigeno e idrogeno indica una origine meteorica delle acque. Le acque mostrano equilibrio in termini di composizione isotopica dello stronzio con le litologie carbonatiche, e non evaporitiche, nonostante le elevate concentrazioni di Sr che caratterizzano queste ultime, suggerendo che lo scambio ionico con la matrice calcarea ha cinetiche rapide e permette la sostituzione dei cationi durante la risalita. Inoltre, il mescolamento superficiale delle acque sulfuree con un acquifero freatico calcio-bicarbonatico può in parte giustificare la variabilità temporale osservata per alcuni parametri chimico-fisici.

Viene proposto un modello di circolazione per stadi successivi di equilibrio termodinamico, che mostra un buon accordo tra parametri calcolati ed osservati. Il modello prevede l'infiltrazione di acque meteoriche, l'interazione con le litologie dell'acquifero, le reazioni della componente biologica (riduzione del solfato, produzione di anidride carbonica), la degassazione e il mescolamento superficiale.

### **Bibliografia**

Carulli (2006) -. Carta geologica del Friuli Venezia Giulia in scala 1:150.000 e Note Illustrative. SELCA, Firenze.

Parkhurst & Appelo (1999) -. User's Guide to PHREEQC (Version 2). Water-Resources Investigations Report 99-4259, Denver (Colorado).



ACQUA 2011

## Metodologie innovative per la caratterizzazione degli acquiferi

**D. Nieto Yabar<sup>(1)</sup>, M. Giustiniani<sup>(1)</sup>, F. Accaino<sup>(1)</sup>, A. Affatato<sup>(1)</sup>, L. Baradello<sup>(1)</sup>, E. Marin<sup>(2)</sup>, S. Picotti<sup>(1)</sup>, G. Santarato<sup>(3)</sup>, Umberta Tinivella<sup>(1)</sup>, C. Vaccaro<sup>(3)</sup>**

<sup>(1)</sup>OGS, Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale;

<sup>(2)</sup>Acque del Basso Livenza SPA;

<sup>(3)</sup>Università degli Studi di Ferrara - Dipartimento di Scienze della Terra.

Negli ultimi decenni il crescente fabbisogno della risorsa idrica legato all'aumento della popolazione e dell'antropizzazione, ha reso necessario lo studio degli acquiferi attraverso diverse metodologie di indagine, al fine di tutelarne la qualità e la quantità. In questo contesto, è stato sviluppato un pacchetto integrato di metodologie di riferimento basato su indagini geofisiche, geochimiche, idrogeologiche e di monitoraggio a livello di bacino idrico e volto alla salvaguardia di questa risorsa indispensabile.

La metodologia descritte in questo studio è basata sulla realizzazione di campagne di indagine sul territorio nell'area pedemontana a cavallo tra Friuli Venezia Giulia e Veneto e delimitata dai fiumi Tagliamento, Meduna-Cellina e Livenza. Ciò ha permesso di applicare e sviluppare diverse metodologie, innovative e multi-disciplinari di monitoraggio (geofisico, geochimico ed idrogeologico) per la salvaguardia e valorizzazione delle risorse idriche a livello di bacino idrografico nell'ambito della direttiva 2000/60/CE.

L'area esaminata è un'area caratterizzata da spesse conoidi alluvionali fortemente permeabili che ospitano uno dei più importanti acquiferi delle due regioni. L'elevata permeabilità dei depositi, l'intensa attività agricola ed il recente incremento dell'urbanizzazione rendono questo acquifero particolarmente vulnerabile all'inquinamento. In particolare, alcuni test sono stati eseguiti nell'area pozzi dell'Acquedotto Acque del Basso Livenza – ABL (Torrates di Chions – PN).

La prima fase dello studio è consistita nella raccolta dei dati esistenti a livello di distretto idrografico del fiume Tagliamento. La raccolta di questi dati, ed in particolare le stratigrafie dei pozzi, ha permesso la costruzione del modello geologico preliminare e la pianificazione delle indagini geofisiche. Il modello idrogeologico ha permesso di individuare la presenza delle seguenti falde acquifere nel campo pozzi dell'ABL: 1) un acquifero a falda libera (A0) che si sviluppa nei depositi alluvionali del fiume Tagliamento; 2) un sistema acquifero A1, dalle ri-

sorgive fino all'area di Torrate risulta artesiano con risalita naturale dell'acqua di circa 3,5 metri sopra il piano campagna, e 3) un sistema acquifero (A2) che si trova a circa 180 metri dal piano campagna.

Successivamente, sono stati testati diversi metodi analitici innovativi idonei a caratterizzare i singoli acquiferi, verificando la reale potenzialità. Le risorgive sono state individuate e caratterizzate grazie ad analisi termiche, mentre i corpi idrici sotterranei grazie all'integrazione di dati idrogeologici, geochimici e geofisici.

I metodi geofisici utilizzati hanno permesso di indagare il sottosuolo a diversa profondità con diversa risoluzione. Il Ground Penetrating Radar (GPR) ha permesso di caratterizzare i primi metri del sottosuolo permettendo l'individuazione delle lenti di argilla. La tomografia elettrica, con la quale si sono indagati i primi 80 metri, ha messo in evidenza che lo strato impermeabile di protezione dell'acquifero A1 è complessa e mostra un forte assottigliamento in alcune aree.

L'indagine sismica 2D e 3D ha permesso di caratterizzare i primi 1000 m del sottosuolo. Le sezioni sismiche hanno permesso di caratterizzare da un punto di vista geometrico gli acquiferi presenti nel sottosuolo. Il campo di velocità sismica, ottenuto dalla tomografia, ed essenziale per la migrazione pre-stack in profondità, ha evidenziato molto bene la presenza di una serie di acquiferi superficiali e più profondi. Sono stati riconosciuti gli acquiferi A1 e A2. Sono state individuate altre strutture più profonde (circa 270 m e 480 m), associabili ad acquiferi più profondi. I campi di velocità sismica hanno permesso di stimare (attraverso relazioni empiriche) la distribuzione della porosità e della densità all'interno dei corpi idrici.

Il metodo Time Domain Electro-Magnetic (TDEM), che ha permesso di indagare i primi 500 m, trova largo impiego nel monitoraggio degli acquiferi se integrate da dati di altra natura. Nell'area di Torrate, sia la stratigrafia di pozzi che i risultati dell'indagine sismica hanno permesso di migliorare l'inversione dei dati ottenendo un risultato affidabile. Poiché il potere risolutivo delle indagini

geoelettriche diminuisce rapidamente con la profondità, l'inversione "constrained" dei dati TDEM ha permesso di ottenere affidabili informazioni della resistività per l'acquifero A1, fra circa 30 e 60 m dal piano campagna, ed un livello localizzato a circa 480 metri da piano campagna.

I risultati ottenuti con i dati sismici, integrati con gli altri dati geofisici ed in particolare con il TDEM, hanno evidenziato la possibile presenza di un acquifero a circa 500 m in profondità. Per verificare tale ipotesi è stata effettuata una perforazione fino ad una profondità di 510 m. La perforazione ha confermato l'esistenza di un acquifero a circa 500 m di profondità, validando i risultati dell'analisi dei dati sismici e del TDEM. Successive analisi geochimiche hanno evidenziato che la qualità dell'acqua del nuovo acquifero è adeguata per lo sfruttamento ad uso domestici.

Lo studio idrogeologico-geochemico è stato mirato, oltre che alla caratterizzazione e descrizione

delle litologie e dei parametri chimico-fisici e dello stato di qualità di ogni corpo acquifero, anche alla descrizione delle variazioni stagionali mediante rilevamento in continuo e prelievo sistematico di campioni d'acqua per l'analisi chimica ed isotopica. Il programma di monitoraggio è stato utile per individuare possibili variazioni dei parametri chimico-fisici con la risposta climatica. Ai fini della caratterizzazione dell'acquifero sono state utili le analisi isotopiche dell'ossigeno e di attività del trizio (isotopo a vita breve dell'idrogeno), che ha messo in evidenza che i corpi idrici in questa zona sono caratterizzate da acque relativamente giovani con età non superiori a 50

anni, per cui si ha una rapida alimentazione dalle acque meteoriche montane.

Tutti i dati acquisiti sono stati utilizzati per sviluppare un modello idrogeologico regionale che ha permesso di individuare le vie preferenziali di scorrimento dell'acqua nel sottosuolo, evidenziando che i maggiori problemi sono relativi alla salvaguardia della qualità dell'acqua a causa della presenza di punti di contaminazione nelle aree di ricarica.

Il pacchetto metodologico sviluppato per la caratterizzazione, monitoraggio e salvaguardia della risorsa idrica ha ottenuto un ottimo risultato nella zona di indagine. Questo pacchetto può:

1) essere un utile strumento di indagine degli acquiferi con un relativo basso costo, anche in zone dove sono disponibili scarse informazioni. In queste aree, l'integrazione con le indagini geofisiche che non hanno impatto sulle falde acquifere è indispensabile per caratterizzare il potenziale dei corpi idrici profondi.

2) trovare largo impiego in aree dove i dati provenienti da esplorazioni dirette (pozzi) sono carenti;

3) limitare l'utilizzo di indagini dirette che potrebbero causare la migrazione di agenti inquinanti da corpi idrici superficiali verso corpi idrici più profondi.

Il potenziale di questo approccio metodologico, ed in particolare delle metodologie geofisiche non invasive, è stata confermata dalla scoperta di un acquifero profondo non conosciuto. Questo acquifero costituisce una risorsa fondamentale per la Regione Friuli Venezia Giulia e una risorsa strategica per crisi idriche future.



## Caratterizzazione del sottosuolo mediante le onde sismiche P ed S

*M. Giustiniani, U. Tinivella, F. Accaino*

*OGS - Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale*

### ACQUA 2011

La risorsa idrica, indispensabile per la nostra vita, è molto vulnerabile a causa dell'inquinamento antropico. Al fine di tutelare questa risorsa, è molto importante caratterizzare il sottosuolo e individuare possibili vie di scorrimento del fluido, come fratture, che mettono in contatto questa risorsa e gli inquinanti.

Per un'adeguata caratterizzazione del sottosuolo, è possibile utilizzare il metodo sismico ed in particolare l'analisi integrata delle onde compressionali (P) e di quelle di taglio (S). L'analisi delle velocità delle onde P e di quelle S permette, infatti, di ottenere informazioni sul rapporto di Poisson che è legato alle caratteristiche petro-

fisiche del sottosuolo. Le sole onde compressionali non riescono a discriminare in modo univoco le proprietà petrofisiche delle formazioni, ma è necessario integrarle con informazioni sulle onde S al fine di discriminare le discontinuità causate da variazioni litologiche e da variazioni del contenuto e/o proprietà del fluido interstiziale.

In questo studio, l'analisi congiunta delle onde P e S è stata effettuata su dati ad alta risoluzione acquisiti nella Pianura Friulana. Sono state acquisite due linee, nella medesima posizione, utilizzando prima una sorgente sismica di onde P e poi una sorgente di onde S. In entrambe le acquisizioni, la distanza tra gli scoppi e tra i ricevitori era rispettivamente pari a 4 m e 2 m. Sono stati uti-

lizzati geofoni a due componenti caratterizzati da un frequenza naturale di 10 Hz.

L'analisi sismica applicata può essere sintetizzata in tre fasi: 1) inversione dei tempi di arrivo dei first break per ottenere i campi di velocità delle onde P ( $V_p$ ) e S ( $V_s$ ) che hanno permesso di stimare il rapporto  $V_p/V_s$ ; 2) elaborazione convenzionale delle riflessioni per ottenere una sezione stack sia per i dati P che S e 3) l'applicazione del metodo "multi-refractor imaging" che analizza gli eventi rifratti.

Le  $V_p$  mostrano una forte variabilità laterale, in particolare modo nei primi 40 m. La velocità delle onde P varia tra 1600 e 2200 m/s in accordo con le strutture geologiche presenti nell'area. Le  $V_s$  sono molto complesse e variano tra 300 e 1000 m/s. L'analisi congiunta dei due campi di velocità mostra alcune zone caratterizzate da una bassa  $V_s$  a cui non corrisponde una diminuzione delle  $V_p$ . Come aspettato, questa area presenta un alto rapporto  $V_p/V_s$ , che può essere interpretato come una zona fratturata satura di acqua. Queste medesime strutture sono state riconosciute anche nell'immagine "multi-refractor".

L'analisi congiunta delle  $V_p$  e  $V_s$  ha permesso di definire una relazione empirica, partendo dalla linea mudrock, che è una linea retta nel piano  $V_s$ - $V_p$ . General-

mente, la linea mudrock è utilizzata per identificare la presenza di fluidi. La relazione definita risulta:

$$V_p = 1440 + 1,265V_s$$

dove la velocità è espressa in m/s. Successivamente, abbiamo stimato  $V_p$  e  $V_s$  partendo rispettivamente da  $V_s$  e  $V_p$ . Questo ha confermato la presenza di fratture sature di acqua.

Le due sezioni stack delle onde P e delle onde S e l'immagine "multi-refractor" sono state convertite in profondità al fine di poter comparare i risultati utilizzando il campo di velocità ottenuto dalle analisi di stack. L'interpretazione congiunta delle tre sezioni ha evidenziato la presenza di un'alternanza di ghiaie, sabbie ed argille. È evidente che l'immagine "multi-refractor" mostra una maggiore risoluzione rispetto alle altre due, in quanto caratterizzato da una più elevata risoluzione (dovuta alle più alte frequenze).

In conclusione, l'analisi integrata proposta permette di caratterizzare il sottosuolo sia da un punto di vista geometrico che petrofisico. In particolare, l'analisi congiunta delle  $V_p$  e  $V_s$  può essere applicata per individuare la presenza di fratture che possono agevolare la migrazione degli inquinanti negli acquiferi sia superficiali che profondi.



**ACQUA 2011**

## Considerazioni sulla vulnerabilità di sistemi sorgentiferi carsici complessi: il caso delle Sorgenti del Timavo nel Carso Classico.

**Luca Zini, Luca Visintin, Barbara Grillo, Franco Cucchi**

*Dipartimento di Geoscienze, Università degli Studi di Trieste*

A causa dell'elevata permeabilità e delle caratteristiche di trasmissione dell'acqua, gli acquiferi carsici sono in genere estremamente vulnerabili dal punto di vista dell'inquinamento. Nell'ambito delle valutazioni della vulnerabilità degli acquiferi, l'analisi delle problematiche relative alle aree fortemente carsificate è stata spesso messa da parte a causa della complessità che un sistema idrogeologico di questo genere presenta, e all'intera area veniva semplicemente assegnato il massimo grado di vulnerabilità, senza ulteriori approfondimenti. Soltanto negli ultimi anni l'attenzione sui complessi idrogeologici carsici è aumentata, poiché si è evidenziata l'opportunità di salvaguardare questi acquiferi così delicati.

Si affronta il problema della vulnerabilità intrinseca dell'acquifero carsico del Carso nel settore sorgentizio ove insistono le opere di presa dei due acquedotti, uno italiano uno sloveno, che forniscono acqua agli abitanti dell'altopiano.

Il "Carso Classico" è quella vasta area al confine nord-orientale d'Italia con la Slovenia, che si estende dalla sinistra del fiume Isonzo e dal Golfo di Trieste fino a Postumia (Postojna) e a San Canziano (Skocjan), caratterizzata dalla presenza in superficie ed in profondità di morfotipi carsici particolarmente evoluti, frequenti e vari. Dal punto di vista idrogeologico, l'idrostruttura può essere considerata comprensiva di più settori, quelli in cui le acque passano da epigee -in quanto defluenti in valli non carsiche- a ipogee -in quanto inghiottite in profondità- e vanno ad alimentare le acque di fondo carsiche, quello in cui le acque scorrono con articolati percorsi lungo vie di drenaggio più o meno incarsite e sono ulteriormente alimentate dalle precipitazioni, il settore sorgentifero, in cui le acque vengono alla luce o defluiscono in mare.

Il settore di alimentazione per inghiottitoi borda a settentrione ed a oriente il Carso Classico e va diviso dal punto di vista idrodinamico in due sottosezioni, uno "pun-

tuale” di Skocjan -pochi km<sup>2</sup> in Slovenia- ove viene inghiottita la Notranjska Reka, uno “lineare” del Carso isontino settentrionale lungo 5-6 km a contatto con i fiumi Isonzo e Vipacco. A Skocjan le portate in ingresso sono mediamente di 8.3 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> con minime di 0.2 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> e massime di 2100 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>. Il settore lineare del Carso isontino contribuisce a sua volta al sistema, in base a recentissime stime, mediamente con 2 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> al chilometro.

Le condizioni di ricarica da infiltrazione efficace diretta insistono, con precipitazioni comprese tra 1000 e 1800 mm, su circa 900 km<sup>2</sup> di rocce carbonatiche a varia carsificazione. In un mezzo carsico maturo e dalle caratteristiche litologico-strutturali come quelle del Carso Classico, nel tempo si è sviluppata una rete di vuoti collegati eterogenea e non uniforme. Si ha la presenza di una articolata rete a dreni dominanti, cui fanno capo localmente numerosi dreni interdipendenti. Ne consegue la presenza di variegata vie di drenaggio, alcune delle quali importanti, con una circolazione semidispersiva nella rete di condotti e fratture con tratti sifonanti e più zone sature interdipendenti.

La parte epifreatica del corso sotterraneo del fiume Timavo può essere direttamente raggiunta solamente attraverso cinque cavità profonde circa 300 m: Kačna Jama, Jama 1 v Kanjaducah e Brezno v Stršinkni dolini in Slovenia; Abisso di Trebiciano e Grotta Lazzaro Jerko in Italia.

Le acque del sistema sorgentifero, una ventina di chilometri quadrati in tutto, sono drenate principalmente dalle Risorgive del Timavo e quindi dai laghi di Doberdò e Pietrarossa, da alcune sorgenti minori che alimentano i

canali Lisert e Moschenizze -sorgenti Moschenizza Locavaz, sorgenti del Lisert e del Sardos-Randaccio-. A San Giovanni di Duino le risorgive consistono in più polle raccolte in tre “rami” da cui fuoriesce gran parte delle acque del bacino carsico del fiume: in media 35 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>, con minime di 10 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup> e massime di 150 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>. Indagini speleosubacquee hanno messo in luce un articolato e complesso sistema di cavità allagate che sono state rilevate fino a -83 metri sul livello del mare e per più di 1500 metri di sviluppo.

Si tratta di acque che provengono da acquiferi diversi ma interconnessi, con una portata complessiva media stimata in 40 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>, massima di circa 175 m<sup>3</sup>s<sup>-1</sup>.

Il rapporto dei diversi contributi di alimentazione è di difficile definizione anche a causa della loro variabilità nel tempo indotta dai differenti regimi idrici. Comunque in piena prevalgono le acque della Notranjska Reka, in regime normale prevalgono le acque di percolazione, in magra è rilevante l'apporto delle acque isontine.

La vulnerabilità intrinseca del Carso triestino ed isontino è stata definita in via preliminare anni fa, seguendo il protocollo SINTACS ed utilizzando quali supporti informatici la release 4 di SINTACS e il GIS IDRISI 2.

Sulla base dei risultati delle più recenti prove con traccianti e degli studi sull'idrodinamica delle acque ipogee basati sul confronto delle registrazioni in continuo in una dozzina di stazioni di monitoraggio, si definisce la vulnerabilità del settore sorgentizio e si prospettano gli interventi di tutela diretta ed indiretta delle opere di presa degli acqueotti italiano e sloveno.



ACQUA 2011

## Sorgenti e ciclo del ferro nel Sito Inquinato di Interesse Nazionale “Laguna di Grado e Marano” (Regione FVG): una prospettiva isotopica

**A. Galic<sup>(1)</sup>, F. Castorina<sup>(2,3)</sup>, A. Lutman<sup>(4)</sup>, E. Pezzetta<sup>(4)</sup>, R. Petrini<sup>(1)</sup>**

(1) Dipartimento di Geoscienze, Università di Trieste

(2) Dipartimento di Scienze della Terra, Università “La Sapienza”, Roma

(3) IGAG/CNR- Istituto di Geologia Ambientale e Geoingegneria, sezione di Roma “La Sapienza”

(4) ARPA-FVG, Settore Laboratorio Unico – Laboratorio di Udine

La concentrazione di Fe nelle acque naturali è generalmente inferiore a 200 µg/l, principalmente a causa della bassa solubilità della specie stabile Fe(III) (Pham et al., 2006). Il ciclo geochimico del Fe nel sistema acqua-sedimento-suolo è dominato dalle condizioni di ossidoriduzione, che governano gli equilibri tra la forma Fe(II), solubile e presente in soluzione come ione libero o sotto forma di complessi con leganti organici ed inorganici (Liu et al., 2002), e la forma Fe(III), con formazioni di

ossidi e idrossidi insolubili spesso presenti come colloidali nelle condizioni di pH delle acque naturali (Millero, 1985). Il processo di ossidazione del Fe(II) prevede reazioni di idrolisi con trasferimento di elettroni, con conversione del Fe(II) in una serie di complessi di transizione Fe(II) e Fe(III) in fase acquosa prima della precipitazione come idrossido, generalmente in forma amorfa. Le principali specie di Fe(II) nelle acque naturali sono Fe<sup>2+</sup> e le forme idrolizzate Fe(OH)<sup>+</sup>, Fe(OH)<sub>2</sub>, Fe(OH)<sub>3</sub><sup>-</sup>, e per il

Fe(III) le specie  $\text{Fe}^{3+}$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})^{2+}$ ,  $\text{Fe}(\text{OH})_2^+$ .

Nel caso di acquiferi costieri, le abbondanze di Fe disciolto sono controllate dal comportamento non-conservativo di questo elemento nei processi di mescolamento tra acque dolci e marine, in particolare per il ruolo della materia organica e per le variazioni dello stato di ossidazione a causa della intrusione salina. Le elevate concentrazioni di Fe spesso riscontrate nei sedimenti sono in relazione alla formazione di fasi insolubili quali idrossidi, solfuri amorfi ed alla precipitazione di altri composti a seguito dell'instaurarsi di condizioni ossigenate e di elevato pH associate alla intrusione. Gli apporti naturali di Fe agli acquiferi costieri avvengono prevalentemente attraverso i fiumi, come forme colloidali stabilizzate dalla materia organica (Boyle et al., 1977) e da altre sorgenti litogeniche quali la dissoluzione o alterazione di fasi minerali silicatiche presenti nel sedimento. Quando le acque dolci si mescolano con l'acqua di mare, le fasi colloidali reagiscono rapidamente con i cationi formando dei precipitati. La successiva rimobilizzazione del Fe può avvenire per una serie di reazioni nell'ambiente riducente del sedimento, ed in questo caso il Fe nella forma Fe(II) si partiziona nelle acque di poro e può diffondere nella falda. Anche gli effetti di ossidazione dell'acqua marina sulla materia organica ed associata riduzione di Fe(III) provocano il rilascio del Fe(II) alla fase acquosa (Pedersen et al., 2005).

In questo contesto, la sistematica isotopica del Fe rappresenta uno strumento innovativo nello studio del ciclo del Fe nell'ambiente supergenico e nella stima degli apporti da sorgenti geogeniche e antropiche (Escoube et al., 2009; Flament et al., 2008), a causa dei frazionamenti isotopici associati a reazioni di ossido-riduzione. In queste trasformazioni la specie isotopicamente pesante del Fe si partiziona preferenzialmente nella forma ossidata. La composizione isotopica del Fe è data dal rapporto  $^{56}\text{Fe}/^{54}\text{Fe}$ , espresso come  $\delta^{56}\text{Fe}$  in termini di deviazioni da uno standard di riferimento. Le sorgenti ignee di Fe hanno valori di  $\delta^{56}\text{Fe}$  omogenei ( $\pm 0.05\%$ ) (Beard et al., 2003); le acque fluviali sono comprese tra  $\sim 0$  e  $-1\%$  (Escoube et al., 2009). A partire da questi riferimenti, valori progressivamente negativi del  $\delta^{56}\text{Fe}$  si sviluppano nella fase acquosa per cicli ripetuti di precipitazione-dissoluzione (Rouxel et al., 2008).

Nel presente lavoro la sistematica isotopica del Fe è stata applicata a 15 campioni di acque del Sito Inquinato di Interesse Nazionale (SIN) "Laguna di Grado e Marano" (Regione FVG), per il quale l'ARPA-FVG ha posto valori di fondo per la concentrazione di Fe di 5000 mg/l, nel caso in cui la concentrazione dello ione cloruro sia minore di 100 mg/l, e 20000 mg/l per  $\text{Cl}^- > 100$  mg/l. Le acque studiate variano tra la facies bicarbonato-calcica e la facies cloruro-alcalina, evidenziando il progressivo mescolamento tra acque dolci e marine. Gli effetti della salinizzazione sono stati quantificati usando gli isotopi

conservativi di O-H, suggerendo apporti fino ad un massimo del 98% circa in volume di componente marina che si mescola con acque dolci di prevalente origine dai corsi d'acqua di risorgiva e secondariamente da precipitazioni locali. Gli isotopi dello Sr confermano il ruolo della intrusione, evidenziando ulteriori processi di scambio ionico e possibili effetti di alterazione di fasi silicatiche anche nel rilascio di Fe alla falda. I campioni studiati non mostrano correlazioni univoche tra contenuto in Fe e componente marina, espressa in termini di contenuto normalizzato dello ione cloruro. I dati isotopici di Fe mostrano valori molto variabili di  $\delta^{56}\text{Fe}$ . In particolare si è evidenziato un andamento di progressiva negativizzazione del  $\delta^{56}\text{Fe}$  al decrescere della concentrazione di Fe, interpretabile come evidenza di ripetuti cicli naturali di dissoluzione-precipitazione del Fe con arricchimento della componente isotopicamente leggera nelle acque di poro, attraverso equilibri di ossido-riduzione. A questi andamenti si sovrappone in alcuni dei campioni una componente con  $\delta^{56}\text{Fe}$  positivo che devia da questi processi ciclici, anche in termini di pH della fase acquosa, di possibile origine antropica. In particolare questo è stato riscontrato sia in aree legate alla lavorazione di leghe di ferro, ma anche in aree storicamente non inerenti ad attività antropiche ferro correlate e pertanto la cui interpretazione va ulteriormente approfondita.

E' stato infine osservato come il ciclo ossido-riduttivo del Fe condizioni la distribuzione di elementi potenzialmente tossici nell'area studiata del SIN, in particolare per quanto riguarda As e Ni.

### Riferimenti

- Beard, B.L., Johnson, C.M., Skulan, J.L., Neelson, K.H., Cox L., Sun, H. (2003). Applications of Fe isotopes of tracing the geochemical and biological cycling of Fe, *Chem. Geol.* 195, 87-117
- Boyle, E.A., Edmond, J.M., Sholkovitz, E.R. (1977). The mechanism of iron removal in estuaries, *Geochim. Cosmochim. Acta* 41, 1313-1324
- Escoube, R., Rouxel, O., Sholkovitz, E., Donard, O. (2009). Iron isotope systematic in estuaries: The case of North River, Massachusetts (USA), *Geochim. Cosmochim. Acta* 73, 4045-4059
- Flament, P., Mattielli, N., Aimo, L., Choël, M., Deboudut, K., de Jong, J., Rimetz-Planchon, J., Weis, D. (2008). Iron isotopic fractionation in industrial emissions and urban aerosols, *Chemosphere* 73, 1793-1798
- Liu, X., Millero F.J. (2002). The solubility of iron in seawater, *Marine Chemistry* 77, 43-54
- Millero, F.J. (1985). The effect of ionic interactions on the oxidation of metals in natural waters, *Geochim. Cosmochim. Acta* 49, 547-553
- Pedersen, H.D., Postma, D., Jakobsen, R., Larden, O. (2005). Fast transformation of iron oxyhydroxides by the catalytic action of aqueous Fe(II), *Geochim. Cosmochim. Acta* 69, 3967-3977
- Pham, A.N., Rose, A.L., Feitz, A.J., Waite, T.D. (2006). Kinetics of Fe(III) precipitation in aqueous solutions at pH 6.0-9.5 and 25°C, *Geochim. Cosmochim. Acta* 70, 640-650
- Rouxel, O., Sholkovitz, E., Charette, M., Edwards, K.J. (2008). Iron isotope fractionation in subterranean estuaries, *Geochim. Cosmochim. Acta*, 72, 3413-3430



## Applicazione della sistematica isotopica del cromo allo studio delle sorgenti e ciclo del cromo esavalente in acquiferi contaminati: il caso di Pavia di Udine (Regione Friuli Venezia Giulia)

R. Petri<sup>(1)</sup>, A. Lutman<sup>(2)</sup>, A. Felluga<sup>(2)</sup>, E. Pezzetta<sup>(2)</sup>, F.F. Slejko<sup>(1)</sup>, G. Cavazzini<sup>(3)</sup>, F. Marafatto<sup>(1)</sup>

(1) Dipartimento di Geoscienze, Università di Trieste

(2) ARPA-FVG, Sezione di Udine (3) IGG-CNR, Padova

L'applicazione della sistematica isotopica del cromo nello studio di ecosistemi contaminati da cromo esavalente è in rapida espansione (Blum and Bergquist, 2007). Il Cr nella forma trivalente [Cr(III)] ha una funzione attiva nel metabolismo di numerose specie animali (e.g. Mertz, 1969), ed assume il ruolo di elemento micronutriente essenziale in una dieta corretta per l'uomo. Nella forma esavalente [Cr(VI)] è tossico per le specie viventi, e nell'uomo è alla base di gravi patologie.

La parziale riduzione del Cr(VI) a Cr(III) che avviene nell'intestino, in casi di ingestione prolungata o per dosi elevate, non è sufficiente a ridurre la tossicità (e.g. Singh et al., 1998). Il Cr è presente nei minerali che costituiscono le varie litologie (ossidi, idrossidi e silicati) nella forma Cr(III), con una forte preferenza per la coordinazione ottaedrica. Sorgenti naturali di Cr(VI) possono generarsi in sequenze ofiolitiche (Fantoni et al., 2004), ma nella prevalenza dei casi il cromo esavalente è immesso nell'ambiente attraverso una serie di attività antropiche. Nelle condizioni di pH delle acque naturali, il Cr(VI) è presente come ossianione cromato ( $\text{CrO}_4^{2-}$ ) e, secondariamente, come bicromato ( $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ ). Entrambe le forme costituiscono specie solubili in fase acquosa e con bassa tendenza ad essere adsorbite sulla superficie di idrossidi, fasi argillose e sostanze umiche, anche per la competizione con altri anioni quali  $\text{SO}_4^{2-}$ . In presenza di Fe(II),  $\text{H}_2\text{S}$  e vari composti organici, il Cr(VI) tende a ridursi naturalmente e rapidamente a Cr(III) (Pettine et al., 1998), ed in questa forma è poco solubile e viene fortemente adsorbito in suoli e sedimenti (Sass and Rai, 1987). Questa tendenza all'abbattimento naturale ha fatto supporre che la contaminazione da cromo esavalente rimanesse confinata ad aree ristrette e si manifestasse in maniera transitoria. Tuttavia, la presenza di particolari ossidanti, principalmente ossidi-idrossidi di Mn nel sedimento o in sospensione, possono favorire l'ossidazione del Cr(III) a Cr(VI) come evidenziato da esperimenti di laboratorio (Silvestre et al., 1995) e da osservazioni di sistemi naturali, includendo acquiferi costieri e zone di estuario dove sono state osservate variazioni del rapporto Cr(III)/Cr(VI) con ciclicità giornaliera ed associate a processi di ossidazione e riduzione del Fe.

Durante le reazioni di ossido-riduzione gli isotopi del Cr variano la loro abbondanza relativa; in particolare

l'isotopo pesante si partiziona nella specie ossidata. Ciò comporta una variazione della composizione isotopica del Cr, espressa dal rapporto  $^{53}\text{Cr}/^{52}\text{Cr}$ , e del corrispondente valore  $\delta^{53}\text{Cr}$  che ne misura le deviazioni rispetto ad uno standard naturale.

In questo studio la sistematica isotopica del Cr è stata applicata all'acquifero freatico nell'Alta Pianura Friulana, in prossimità del centro abitato di Pavia di Udine. L'area è stata oggetto di forte contaminazione da Cr(VI) di origine industriale nel 1985. In seguito allo sversamento, il Cr(VI) si è progressivamente ridotto a Cr(III), rimanendo trattenuto dalla matrice solida che costituisce l'acquifero con conseguente abbattimento delle concentrazioni nella falda. Nonostante la messa in sicurezza degli impianti, nel Luglio-Novembre 1997 e Gennaio-Novembre 2000 sono state nuovamente osservate elevate concentrazioni di Cr(VI) in una serie di piezometri nella zona, fino a 3400  $\mu\text{g}/\text{l}$ . Dal 2008 ad oggi sono stati manifestati ulteriori incrementi di concentrazione di Cr(VI) che hanno raggiunto valori di 2000  $\mu\text{g}/\text{l}$ .

I dati isotopici di Cr su campioni di acque mostrano valori di  $\delta^{53}\text{Cr}$  variabili e negativi. Questi sono stati interpretati come evidenza di fenomeni di ossidazione del Cr(III) prodotto della riduzione del Cr(VI) immesso dalla attività industriale. Se confermate da ulteriori analisi, queste conclusioni indicherebbero che i retaggi della contaminazione da Cr(VI) possono, in particolari condizioni, generare un rischio ambientale nel tempo e che tramite cicli di ossidazione-riduzione la contaminazione può estendersi su aree vaste.

### Riferimenti

- Blum JD, Bergquist BA (2007). *Anal. Bioanal. Chem.* 388, 353-359.  
Fantoni, D.; Brozzo, G.; Canepa, M.; Cipolli, F.; Marini, L.; Ottonello, G. and Vetuschi Zuccolini, M. (2004). *Environ. Geol.* 42, 871-882  
Mertz W. (1969). *Physiol. Rev.*, 49, 163-239.  
Pettine, M.; D'Ottone, L.; Campanella, L.; Millero, F.J. and Passino, R. (1998). *Geochim. Cosmochim. Acta* 62, 1509-1519.  
Sass, B.M. and Rai, D. (1987). Solubility of amorphous chromium(III)-iron(III) hydroxide solid solutions. *Inorg. Chem.* 26, 2228-2232  
Silvestre, E.; Chalet, L. and Manceau, A. (1995). *J. Phys. Chem.* 99, 16662-16669  
Singh J. et al. (1998). *Oncol. Rep.*, 5, 1307-1318.



## Contaminazione naturale di un acquifero alluvionale continentale per la risalita di acque ad elevata mineralizzazione di origine profonda: il caso dell'Oltrepò Pavese (Lombardia meridionale)

**ACQUA 2011**

**Giorgio Pilla, P. Torrese, M. Bersan**

*Dipartimento di Scienze della Terra – Università degli Studi di Pavia – Via Ferrata, 1 – 27100 Pavia*

Il settore di pianura dell'Oltrepò Pavese (Lombardia meridionale) è contraddistinto da locali risalite, all'interno dell'acquifero alluvionale, di acque fortemente mineralizzate, caratterizzate da una idrofacies clorurato-sodica, la cui origine è imputabile ad un mescolamento tra acque dolci di origine superficiale ed acque ad elevata salinità derivanti dalla lisciviazione delle salamoie della Pianura Padana, che rappresentano i residui di acque marine parzialmente evaporate nel corso della crisi messiniana (CONTI *et alii*, 2000).

Tali fluidi ad elevata salinità sono rimasti intrappolati nei depositi marini terziari e costituiscono la base di tutto il sistema acquifero padano. Nei settori centrali della pianura padana lombarda l'interfaccia acqua dolce-acqua salata si rinviene ad oltre 700 m di profondità (REGIONE LOMBARDIA & ENI DIVISIONE AGIP, 2002), ma procedendo verso il margine appenninico essa si solleva, fino a raggiungere poche decine di metri di profondità dal piano campagna in corrispondenza dell'Oltrepò Pavese.

L'intrusione di tali acque ad elevata mineralizzazione all'interno della falda dell'Oltrepò Pavese si configura come un vero e proprio inquinamento di origine naturale che limita, o addirittura arriva a precludere totalmente, lo sfruttamento delle risorse idriche. Lo spessore molto ridotto di gran parte dell'acquifero alluvionale dell'Oltrepò Pavese limita, inoltre, l'effetto di diluizione da parte delle acque "dolci" superficiali su quelle salate di origine profonda. Affinché il fenomeno si possa verificare è, inoltre, condizione necessaria, l'esistenza di discontinuità tettoniche all'interno del substrato terziario in grado di facilitare la risalita delle acque ad elevata salinità verso l'acquifero superficiale.

In Oltrepò Pavese, responsabile del fenomeno è un'importante discontinuità tettonica sepolta al di sotto dei depositi alluvionali, conosciuta in letteratura come "Faglia Vogherese" (BONI, 1967). Tale discontinuità si sviluppa, in direzione SW-NE, grossomodo dalla zona vogherese fino al Colle di San Colombano, ed è responsabile dell'abbassamento del substrato marino nel settore posto a nord rispetto ad essa, laddove l'acquifero alluvionale passa dalle poche decine di metri del blocco meridionale, fino ad oltre un centinaio di metri in quello settentrionale (BRAGA & CERRO, 1988).

La presente ricerca, tutt'ora in atto, ha l'obiettivo di delimitare le aree nelle quali si verifica tale fenomeno, di

quantificarne la sua entità e di valutare la sua evoluzione nel tempo, con lo scopo di comprendere i meccanismi che regolano la risalita delle acque salate profonde e la loro diffusione nell'acquifero alluvionale dell'Oltrepò Pavese.

Per raggiungere tale scopo sono state utilizzate sia tecniche idrogeologiche e idrochimiche, sia prospezioni geofisiche.

Le indagini idrogeologiche ed idrochimiche hanno interessato prevalentemente le acque provenienti da circa un centinaio di pozzi localizzati nell'intorno della "Faglia Vogherese". Tali indagini hanno permesso di individuare tre aree, localizzate a ridosso del medesimo disturbo tettonico, contraddistinte da elevate e diffuse contaminazioni saline dell'acquifero alluvionale (concentrazioni in Cloruri anche superiori a 1500÷2000 mg/l).

Le acque di falda intercettate da alcuni pozzi sono state, inoltre, monitorate per un periodo di 3 anni, attraverso periodiche campagne di misura dei livelli piezometrici e campionamenti per la determinazione delle variazioni nel tempo delle loro caratteristiche chimiche. Dal monitoraggio del chimismo delle acque è emerso, in realtà, che il fenomeno d'intrusione di acqua salata in falda non si mantiene costante durante le diverse stagioni dell'anno, ma subisce delle variazioni legate ai maggiori o minori apporti di acque "dolci" di ricarica.

Gli eventi di ricarica della falda condizionano, infatti, anche la profondità dell'interfaccia acqua dolce-acqua salata/salmastra nei vari periodi dell'anno all'interno dell'acquifero alluvionale, come messo in evidenza da log di conducibilità elettrica realizzati in molti pozzi in concomitanza dei campionamenti.

Al fine di monitorare in maniera continua sia le variazioni del livello piezometrico che quelle della mineralizzazione delle acque sotterranee, è stato allestito un sistema di monitoraggio automatico tramite sonde multiparametriche ubicate in alcuni pozzi. Dai dati sin'ora raccolti si nota una buona correlazione inversa tra la variazione dei livelli piezometrici e la mineralizzazione delle acque. In particolare sono stati osservati forti incrementi della mineralizzazione delle acque di falda in funzione dei prelievi antropici di acque sotterranee e variazioni stagionali di mineralizzazione delle acque più contenute, ma comunque significative, legate ai momenti di ricarica-discardica della falda.

Lo studio idrochimico è stato integrato da una serie di

indagini geofisiche a carattere sia estensivo che di dettaglio, finalizzate alla ricostruzione della geometria del substrato, dei differenti corpi idrogeologici e della distribuzione delle acque salate/salmastre anche in quelle zone caratterizzate da mancanza di pozzi di controllo. Lo studio estensivo (PILLA *et alii*, in stampa; TORRESE *et alii*, 2009) si è avvalso di 17 sondaggi elettrici verticali per la ricostruzione della geometria del substrato e di profili VLF-EM per una lunghezza totale di circa 50 km, per il riconoscimento speditivo e la relativa mappatura su vasta area dei corpi conduttivi sub-verticali legati alla risalita di acque ad elevata salinità lungo la zona di faglia.

Lo studio di dettaglio è stato realizzato in un sito campione contraddistinto dalla presenza della “Faglia Vogherese” selezionato sulla base della presenza di acque ad elevata salinità e di forti anomalie di conducibilità riscontrate dalle prospezioni estensive. Esso è consistito inizialmente con la realizzazione di un profilo di resistività orizzontale (lunghezza di 2160 m), per l’individuazione delle eterogeneità laterali di resistività, e di 5 sondaggi elettrici verticali di taratura (PILLA *et alii*, in stampa). In una seconda fase della ricerca sono state realizzate 5 tomografie di resistività elettrica 2D della lunghezza di 470 m ciascuna, un’ulteriore tomografia elettrica 2D ad alta risoluzione della lunghezza di 94 m. Le indagini tomografiche hanno permesso, in particolare, di affinare notevolmente le conoscenze con una dettagliata descrizione delle variazioni di resistività elettrica del sottosuolo sia in termini di anisotropie verticali che di disomogeneità orizzontali.

Lo studio geofisico ha permesso di affinare il quadro conoscitivo emerso dalle indagini idrogeologiche e idrochimiche evidenziando l’andamento articolato del substrato, interessato anche da discontinuità tettoniche secondarie più o meno importanti, in grado di facilitare la risalita delle acque salate in superficie, ma anche di individuare all’interno dell’acquifero alluvionale l’interfaccia acqua dolce-acqua salata/salmastra e determinare pertanto la sua complessa geometria.

L’estrema puntualità con cui il fenomeno si manifesta nell’intorno della “Faglia Vogherese”, unita alla sua va-

riabilità verticale, oltre che areale, ha indotto gli autori a formulare un modello concettuale del fenomeno che vede la presenza di più “pennacchi” di risalita delle acque ad elevata salinità, che raggiungendo l’acquifero superficiale, si diffondono e si mescolano con le acque “dolci” presenti, dando così origine ad un differente grado di salinità delle acque all’interno del medesimo acquifero.

In corrispondenza di ogni pennacchio, impostato su discontinuità tettoniche, si osserva, anche nelle porzioni meno profonde dell’acquifero, la presenza di acque fortemente mineralizzate; al contrario, nelle porzioni di acquifero più lontane dai “pennacchi” di risalita, la contaminazione è minore e coinvolge solo le porzioni più profonde dell’acquifero.

### **Bibliografia**

- Bersan M., Pilla G., Dolza G., Torrese P. & Ciancetti G. (2010) – The uprising of deep saline waters into the oltrepò pavese aquifer: early results. Italian Journal of Engineering Geology and Environment, Special Issue 1, 7-22.
- Boni A. (1967) – Note illustrative della Carta Geologica d’Italia. F. 59 Pavia, 68 pp., Roma.
- Braga G. & Cerro A. (1988) – Le strutture sepolte della pianura pavese e le relative influenze sulle risorse idriche sotterranee. Atti Tic. Sc. Terra, 31, 421-433.
- Conti A., Sacchi E., Chiarle M., Martinelli G. & Zuppi G.M. (2000) – Geochemistry of the formation water of the Po plain (northern Italy): an overview. Applied Geochemistry, 15, 51-65.
- Pilla G., Sacchi E. & Ciancetti G. (2007) – Studio idrogeologico, idrochimico ed isotopico delle acque sotterranee del settore di pianura dell’Oltrepò Pavese (Pianura lombarda meridionale). Giornale di Geologia Applicata, 5, 59-74.
- Pilla G., Torrese P. & Bersan M. (in stampa) – Application of hydrochemical and preliminary geophysical surveys within the study of the saltwater uprising occurring in the Oltrepò Pavese plain aquifer. Boll. Geof. Teor. Appl.
- Regione Lombardia & Eni Divisione Agip (2002) – Geologia degli acquiferi padani della Regione Lombardia. A cura di Carcano C, Piccin A (eds), S.E.L.C.A. Firenze.
- Torrese P., Pilla G., Bersan M., Rainone M. L., Ciancetti G. (2009) - Mapping the uprising of highly mineralized waters occurring along a fault zone in the “Oltrepò Pavese” plain upper aquifer (Northern Italy) using VLF-EM survey. Proceeding of SAGEEP 22<sup>nd</sup> Annual Meeting, 749-760, Fort Worth, TX, 29 March-2 April 2009.



ACQUA 2011

## Salinization processes in the delta Po aquifer system

**Dimitra Rapti-Caputo**

*Università di Ferrara, Dipartimento di Scienze della Terra, Via Saragat 1, blocco B, stanza 314, 44100 Ferrara, Italy ([cpr@unife.it](mailto:cpr@unife.it))*

*(<sup>2</sup>)Ter.Am.Ec. S.r.l.*

Actually, about 50% of the world population lives within 60 km of the shoreline and many coastal aquifers are affected by salt water intrusion due to natural and anthropogenic causes. The salinization of these natural systems can lead to a severe deterioration of the quality of existing fresh groundwater resources. In coastal aquifers, the hydrochemical recognition of the salinization processes is very complex due to superposition of different processes like the marine intrusion, the occurrence of continental salt water lagoons and diverse pollution phenomena. The delta Po river (Northern Italy) is a good example of this general and worldwide problem. In particular, the humid area of the delta is a fragile ecosystem characterised by a high biodiversity extremely sensible to even small environmental changes. The area has been deeply managed during the Este Family dynasty (XV-XVI century) and up to the XX century due to the several land reclamation performed on large sectors therefore drying up marshy zones that nowadays are mainly below sea level. During the last decades, the progressive decay of the water resources starts creating severe problems to the delicate ecosystem of the delta and to all the human activities that require such a natural good. In order to define the hydrodynamic and geochemical evolution of the coastal aquifer between the Po of Volano and the Reno rivers and especially the behaviour of the local unconfined aquifer, geomorphological, lithological, hydrogeological and geochemical data have been analysed.

The analyses of the historical series of the monthly precipitations (1960-2005) measured in the stations located within the delta region document an important variation of the annual precipitations as well as of their distribution during the hydrological cycle. In particular, during the period 1980-2000 we observe a decrease of the annual values of about the 20% with respect to the previous period (1960-1980) and an increase of the monthly precipitations that became more intense and concentrated

during August. These latter phenomenon together with the high temperatures of the period enhance the evapotranspiration therefore critically decreasing the amount of water available for infiltration. As a final effect, also the erosion of the soils is increased.

The observed hydrodynamic parameters of the unconfined aquifer during the period 1889-1992 and 1996-2008 emphasised the strong correlation between the altitude trend and the depth of the groundwater level. Also, the piezometric surface along the coastal zone suffered a lowering from 6 cm, to the North, to 32 cm, to the South, with a mean value of about 20 cm corresponding to 2 cm/a.

Moreover, the time series analyses of a) the hydrodynamic and chemico-physical parameters of the unconfined aquifer system and b) the geochemical and isotopical composition of the ground water resources, integrated with vertical measurements of salinity of the aquifer, allowed to infer the following major points. Firstly, the relationships between the present-day stretches of water (Bertuzzi Valley, Nazioni Lake and Comacchio Valleys) and the unconfined aquifer can now be defined. Secondly, the complex role played by the numerous channels of the artificial hydrographic network, and especially of the irrigation channels, relative to the underground water resources has been defined. Thirdly, it is now possible to better constrain the areas characterised by high geochemical risk potentially associated with intrusion phenomena of salty water or to the high pollution degree as induced by the increase of urban areas and human activities. Eventually, the integrated analysis of all collected data allowed to better evaluate which are the principal efficiency issues for installing and operating a monitoring network dedicated to the qualitative and quantitative characterisation of the underground water resources along the investigated coastal sector.



ACQUA 2011

## Processi chimico-fisici in acquiferi costieri: il caso studio della Pialassa della Baiona (Ravenna)

U. Aviani<sup>(1)</sup>, R. Petrini<sup>(1)</sup>, R. Cidu<sup>(2)</sup>, L. Vittori Antisari<sup>(3)</sup>, G. Vianello<sup>(3)</sup>

(1) Dipartimento di Geoscienze, Università di Trieste

(2) Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Cagliari

(3) Dipartimento di Scienze e Tecnologie Agroambientali, Università di Bologna

La Pialassa della Baiona è un sistema lagunare artificiale di circa 1000 ettari formatosi a seguito di opere di regimazione dei corsi d'acqua a partire dal XVIII secolo. È costituita da specchi d'acqua poco profondi e da una pineta antistante che recentemente sta soffrendo degli effetti della salinizzazione degli acquiferi.

La pressione antropica è notevole, essendo presenti un'area agricola immediatamente ad ovest della pineta e un'area industriale a sud. In passato l'area è stata interessata da inquinamento da metalli pesanti ed è attualmente protetta da numerosi vincoli ambientali e paesaggistici in quanto rappresenta un habitat per numerose specie animali e vegetali. Una delle cause della salinizzazione degli acquiferi è stato il pompaggio delle acque di falda per uso agricolo-industriale, che oltre a favorire l'ingressione marina ha accentuato i tassi di subsidenza già esistenti.

Sulla base di analisi chimico-fisiche e isotopiche è stata caratterizzata l'area e sono stati osservati andamenti attribuibili a diversi processi che verranno in seguito descritti. I processi chimico-fisici che regolano l'evoluzione idrogeochimica del sistema si possono riassumere in: mescolamento di corpi acquiferi diversi, interazione con la fase solida (precipitazione-dissoluzione di minerali), interazione con la fase gassosa, processi biologici, scambi ionici, adsorbimento e rilascio di metalli dalle matrici.

Il chimismo delle acque rispecchia principalmente i processi di mescolamento tra l'acqua di mare (cloruro-sodica) e due o più termini di acqua dolce (calcio-bicarbonatica). Sono sovrapposti processi di scambio ionico e di equilibrio con fasi minerali, che portano ad una notevole variabilità composizionale delle acque, raggiungendo nei termini estremi chimismo sodio-bicarbonatico oppure cloruro-calcico-magnesiaco.

Tutte le acque risultano sovrassature in calcite, che talvolta precipita insieme agli idrossidi ferrici.

Il pH delle acque sotterranee è prossimo alla neutralità, compatibilmente con la presenza di carbonati nei sedimenti. Il pH delle acque superficiali dei canali è mediamente più alto, raggiungendo in alcuni casi valori decisamente basici. Questo è stato attribuito, oltre a equilibri con i carbonati e con la fase gassosa, a reazioni biotiche di fotosintesi-respirazione, legate allo sviluppo algale nella rete stessa dei canali. Queste reazioni sono state modellizzate tramite il codice PHREEQC.

Le stesse acque mostrano valori di alcalinità (misurata come concentrazione di ione bicarbonato) elevati, che talvolta superano i 1000 mg/L, suggerendo la produzione di notevoli quantità di anidride carbonica biologica in

presenza di carbonati. Altri processi comprendono scambi ionici, fenomeni di alterazione, reazioni ossidoriduttive.

Il contenuto in ferro delle acque è spesso elevato (10-60 mg/L) ed è legato alla frazione colloidale non eliminata per filtrazione con porosità dei filtri di 0.4  $\mu\text{m}$ . Questi colloidali possono essere immobilizzati nei sedimenti all'interfaccia con l'acqua salmastra, per variazioni di pH e soprattutto per l'aumento della forza ionica che causa flocculazione delle particelle.

Il potenziale di ossidoriduzione mostra una distribuzione bimodale, indicando mediamente prossimità con il punto di equivalenza di una ipotetica curva di titolazione redox. Variazioni anche modeste del potenziale di ossidoriduzione per effetto di agenti ossidanti (e.g. ossigeno disciolto) o riducenti (e.g. reazioni biotiche) hanno implicazioni riguardo l'adsorbimento o il rilascio dei metalli pesanti e nella precipitazione o dissoluzione degli idrossidi ferrici stessi. Variazioni cicliche dovute ad andamenti stagionali causano l'accumulo degli idrossidi precipitati nella fascia salmastra. La presenza di minerali di ferro amorfi nel sedimento è confermata sia dalla colorazione del sedimento stesso che dalle proprietà magnetiche.

Scambi ionici sono attivi in questo ambiente complesso, nella fascia che risente di variabilità stagionale, e consistono principalmente nella sostituzione sodio-calcio nelle matrici fini dei sedimenti, in funzione della caratteristica marina o più marcatamente bicarbonatico-calcica dell'acqua circolante. I valori di  $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta\text{D}$  indicano una componente meteorica di origine dai bacini appenninici nelle acque del sito e confermano l'andamento di mescolamento con l'acqua di mare.

I valori misurati di  $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$  sono compresi nell'intervallo 0.70860-0.70940 e non mostrano correlazioni con la conducibilità elettrica. La composizione isotopica dello stronzio indica come necessari, oltre all'acqua di mare, almeno altri due componenti per giustificare la variabilità osservata. Per le caratteristiche della sistematica isotopica dello Sr, le variazioni misurate sono da attribuirsi esclusivamente a mescolamenti di corpi idrici diversi oppure a reazioni con fasi minerali di tipo dissolutivo, in aggiunta a possibili apporti antropici. La componente a più basso rapporto isotopico in particolare non è giustificabile sulla base dei primi due processi, e cade nel campo delle composizioni isotopiche dei fertilizzanti utilizzati nell'area coltivata.



## Ortofosfati nelle acque sotterranee derivanti dall'ossidazione di suoli torbosi: risultati preliminari dall'area del Lago di Massaciuccoli

R. Rossetto<sup>(1)</sup>, R. Basile<sup>(1)</sup>, P. Cavallaro<sup>(2)</sup>, E. Menichetti<sup>(2)</sup>, S. Pistocchi<sup>(1)</sup>, C. Sabbatini<sup>(1)</sup>, T. Silvestri<sup>(3)</sup>, N. Bonari<sup>(3)</sup>

<sup>(1)</sup>Scuola Superiore Sant'Anna, Land Lab, Via S. Cecilia 3, 56127 Pisa, Italy ([r.rossetto@sss.up.it](mailto:r.rossetto@sss.up.it));

<sup>(2)</sup>ARPAT, Agenzia per la Protezione dell'Ambiente della Toscana, Via N. Porpora 22, 50144 Firenze;

<sup>(3)</sup>Dipartimento di Agronomia e Gestione dell'Agroecosistema, Università degli Studi di Pisa - Via S. Michele Scalzi 2, 56124 Pisa.

Sebbene la concentrazione di ortofosfati nelle acque sotterranee sia comunemente bassa (<0.1 mg/l) e la letteratura tradizionale consideri che il fosforo potenzialmente mobile venga trattenuto negli strati superficiali del suolo da processi di sorbimento, precipitazione e coprecipitazione, recentemente in studi sull'eutrofizzazione si è posta l'attenzione sulla presenza ed il movimento del fosforo nelle acque sotterranee (SNIFFER, 2008).

Durante una ricerca sull'eutrofizzazione del Lago di Massaciuccoli è stato effettuato il rilevamento idrologico quantitativo e qualitativo delle acque sotterranee e superficiali nel periodo Giugno-Luglio 2009. Le aree umide contermini al Lago di Massaciuccoli furono definitivamente bonificate (con la realizzazione di sei bacini di bonifica, di superficie pari a circa 32 km<sup>2</sup>) a scopo agricolo tra il 1920 ed il 1930, dopo circa 2000 anni di tentativi. La bonifica fu realizzata per mezzo di un esteso reticolo di drenaggio (*canali di acque basse*), le cui acque vengono ancora oggi convogliate in un collettore che termina con un impianto idrovoro. Quest'ultimo le solleva in *canali di acque alte* che defluiscono nel Lago di Massaciuccoli. Non appena la bonifica idraulica ebbe inizio, cominciarono fenomeni di subsidenza (quantificati in 2-3 m in 70 anni; Autorità di Bacino del Fiume Serchio e Consorzio di Bonifica Versilia-Massaciuccoli, 2009), che hanno portato il Lago ad una quota superiore al piano campagna e richiesto la realizzazione di 16 km di argini.

I dati raccolti, unitamente a quelli relativi a monitoraggi pregressi effettuati dall'Agenzia di Protezione Ambientale della Toscana mostrano concentrazioni di ortofosfato nelle acque sotterranee nelle aree torbose subsidenti variabili tra 5.5 e 0.3 mg/l, valori superiori anche un ordine di grandezza rispetto a quelli determinati nelle acque superficiali.

Si ipotizza che oltre ad una origine agricola legata alla fertilizzazione, la presenza di fosforo nelle acque sotterranee sia da porre in relazione all'esposizione subaerea delle torbe ed alla loro mineralizzazione. Infatti, il drenaggio delle zone umide insistenti su suoli torbosi, oltre a comportare fenomeni di compattazione, ha modificato le iniziali condizioni anaerobiche in aerobiche, che, a loro

volta, implicano fenomeni di mineralizzazione della materia organica causa di subsidenza (Gambolati et al., 2006), rilascio di nutrienti ed emissioni di gas serra (Andriess, 1988; EUROPEAT, 2006). Le pratiche di lavorazione agricola dei terreni possono inoltre aumentare il rilascio di fosforo aumentando l'ossidazione della materia organica.

Poiché nell'area di studio i suoli torbosi mostrano alti contenuti in materia organica (fino al 40%), le quantità di fosforo mineralizzato calcolate utilizzando tassi di mineralizzazione annua tipici in condizioni climatiche mediterranee suggeriscono importanti contributi nelle acque sotterranee.

Di conseguenza in presenza di acquiferi freatici superficiali a bassa soggiacenza in terreni torbosi e idraulicamente connessi con il reticolo delle acque superficiali, la presenza di ortofosfati nelle acque sotterranee pone problematiche dal punto di vista ecologico. Infatti, i periodi in cui il deflusso di base è il contributo principale al deflusso superficiale generalmente coincidono con l'optimum delle temperature per la produzione primaria (*bloom* algali).

### Bibliografia

Andriess, J.P. 1988. Nature and Management of Tropical Peat Soils. FAO Soils Bulletin 59, Rome. ISBN 92-5-102657-2

Autorità di Bacino del Fiume Serchio and Consorzio di Bonifica Versilia-Massaciuccoli, 2009. Problematiche da subsidenza indotta nel bacino del Lago di Massaciuccoli., [http://www.autorita.bacinoserchio.it/pianodigestione/partecipazione/incontri/approfondimento\\_1\\_massaciuccoli](http://www.autorita.bacinoserchio.it/pianodigestione/partecipazione/incontri/approfondimento_1_massaciuccoli)

EUROPEAT, 2006. Tools and scenarios for sustainable management of European peat soils to protect associated landscapes and natural areas in relation to agricultural production., [http://www.europeat.alterra.nl/p\\_frameset\\_small.htm](http://www.europeat.alterra.nl/p_frameset_small.htm)

Gambolati, G., Putti, M., Teatini, P., Gasparetto Stori, G., 2006. Subsidence due to peat oxidation and impact on drainage infrastructures in a farmland catchment south of the Venice Lagoon. Environmental Geology 49: 814-820

SNIFFER, 2008. WFD-85. An improved understanding of phosphorous origin, fate and transport within groundwater and the significance for associated receptors., [http://www.epa.ie/downloads/pubs/research/water/sniffer\\_phosphorousgroundwater\\_execsum1.pdf](http://www.epa.ie/downloads/pubs/research/water/sniffer_phosphorousgroundwater_execsum1.pdf)



## Il sito contaminato di interesse nazionale della Bassa Valle del Fiume Chienti: dal modello idrogeologico concettuale al modello numerico

*Eva Pacioni<sup>(1)</sup>, Marco Petitta<sup>(1)</sup>, Giovanni Corvatta<sup>(2)</sup>, Marco Fanelli<sup>(2)</sup>,  
Valentina Carucci<sup>(1)</sup>, Valerio Saladini<sup>(1)</sup>, Chiara Sbarbati<sup>(1)</sup>, Ramon Aravena<sup>(3)</sup>*

*(1) Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Roma "La Sapienza"*

*(2) Dipartimento provinciale A.R.P.A.M. di Macerata*

*(3) Earth and Environmental Sciences, University of Waterloo, ON, Canada*

### **Introduzione**

L'acquifero alluvionale del Basso Bacino del fiume Chienti risulta attualmente interessato da una diffusa contaminazione da solventi clorurati. L'area, inserita nel 2001 nell'elenco dei siti contaminati di interesse nazionale, si estende per 26 km<sup>2</sup> tra le province di Macerata e Fermo.

Nel corso degli anni è stato condotto dall'A.R.P.A.M. di Macerata un intenso lavoro finalizzato a caratterizzare l'entità della contaminazione e a monitorarne l'evoluzione nel tempo.

Il presente lavoro si inserisce nell'ambito di un progetto di collaborazione tra il suddetto Ente e l'Università La Sapienza di Roma. L'obiettivo dello studio passa attraverso l'allestimento di un modello concettuale evoluto della circolazione idrica sotterranea e lo sviluppo di un modello numerico previsionale del flusso.

### **Metodologia**

I depositi alluvionali della bassa valle del Chienti ospitano un importante acquifero alluvionale costituito prevalentemente da ghiaie in matrice sabbioso-limosa sostenuto alla base da depositi argillosi plio-pleistocenici (Nanni, 1985).

Al fine di meglio chiarire le caratteristiche idrodinamiche e idrochimiche dell'acquifero sono state realizzate diverse indagini di sito tra cui campagne piezometriche, log verticali delle caratteristiche chimico-fisiche della falda, verifica della dinamica verticale del flusso idrico tramite flow-meter test (Pacioni et alii, 2010; Paillet, 2004), analisi della variazione isotopica di C e Cl ( $\delta^{13}\text{C}$  e  $\delta^{37}\text{Cl}$ ), campionamenti multilivello. Tutte le informazioni così ottenute, unitamente a quelle acquisite durante le fasi di monitoraggio eseguite dall'A.R.P.A.M. e a quelle derivanti da bibliografia, hanno permesso di dedurre il modello concettuale della circolazione idrica sotterranea nonché di impostare un modello numerico di flusso attualmente in fase di implementazione.

Per lo studio della variazione isotopica di C e Cl nei solventi clorurati sono stati prelevati 20 campioni di acque. Questo tipo di indagine definita "fingerprinting" consente di individuare chiaramente diverse sorgenti di contaminazione e di ottenere informazioni sui processi di degradazione che i composti in analisi possono avere subito in falda (van Warmerdam et alii, 1995). Dato infatti

uno stesso composto organoalogenato, il valore del rapporto isotopico di C e Cl varia in funzione dei diversi processi di lavorazione che ha subito durante la sua sintesi e/o del suo grado di degradazione.

Il campionamento multilivello invece è stato eseguito in due piezometri (SC3 e SI3) utilizzando il sistema "Multilevel Sock-Packersystem". Tale sistema consente di separare efficacemente diverse porzioni della stessa falda, campionando solo alla profondità desiderata. La finalità di questa indagine è quella di verificare una possibile stratificazione verticale dei composti inquinanti in contesti idrogeologici complessi.

Per quanto riguarda la realizzazione del modello numerico di flusso si è utilizzato un software agli elementi finiti (FeFlow). Il modello è costituito attualmente da un solo layer e ha un dominio di estensione pari a circa 68 km<sup>2</sup>. È caratterizzato da un limite settentrionale e uno meridionale a flusso nullo corrispondenti ai limiti geologici definiti dai terrazzi che bordano la valle; si è inoltre imposto un potenziale piezometrico fisso (constant head) pari a zero lungo la linea di costa e una portata in entrata proveniente da monte di circa 0,05 m<sup>3</sup>/s. Nella realizzazione del modello è stato necessario tenere conto dei principali parametri idrodinamici dell'acquifero, che risultano dell'ordine di 10<sup>-2</sup> m<sup>2</sup>/s e 10<sup>-3</sup> rispettivamente per i parametri di trasmissività e coefficiente di immagazzinamento e dell'ordine di 10<sup>-3</sup> m/s per la conducibilità idraulica. Nella successiva fase di implementazione si prevede di realizzare un modello più complesso che tenga conto delle condizioni di eterogeneità stratigrafiche riscontrate nell'area. Il modello così ipotizzato prevede la simulazione di un acquifero multifalda caratterizzato da due livelli acquifero e un livello aquitard.

### **Risultati e discussione**

I risultati delle analisi isotopiche hanno messo in evidenza che la zona sud-orientale del sito (Porto S. Elpidio) presenta segnali isotopici diversi rispetto ad altre zone nonché fenomeni di degradazione ben evoluti, fino a cloruro di vinile. Interessante anche la zona definita come potenziale sorgente di contaminazione E (bordo centro settentrionale del sito): l'analisi dei rapporti isotopici infatti mette in evidenza una buona correlazione tra le acque prelevate in questa zona ( $\delta^{13}\text{C}$  PCE: -24,7) e quelle campionate nella zona dell'acquedotto di Civitanova

Marche ( $\delta^{13}\text{C PCE}$ : -25,4). Si ritiene quindi probabile che la qualità di quest'ultime possa essere correlata alla potenziale sorgente di contaminazione E piuttosto che alla più vicina F ( $\delta^{13}\text{C PCE}$ : -29).

I risultati dei campionamenti multilivello attualmente disponibili sono relativi al punto di campionamento SC3. Essi mettono in evidenza un fenomeno di stratificazione del 1,2 DCE che è stato ritrovato in concentrazioni di 13,19  $\mu\text{g/L}$  a 8 m di profondità dal piano campagna, 49,6  $\mu\text{g/L}$  a 11 m e 26,96  $\mu\text{g/L}$  a 14 m. Significativi anche i dati relativi alle caratteristiche chimico-fisiche delle acque campionate: tra gli altri si ricordano i valori di conducibilità idraulica variabili tra 1205  $\mu\text{S/cm}$  a 8m e 2560  $\mu\text{S/cm}$  a 14 m, i cloruri variabili tra 160 mg/L e 680 mg/L a 8m e 14 m rispettivamente e l'azoto nitroso (nitriti) variabile tra 334 e 1518  $\mu\text{g/L}$  alle stesse profondità. Questa diversità nei dati mette in evidenza la bontà del campionamento, confermando l'effettivo prelievo a diverse profondità e la stratificazione dei composti presenti in falda.

Interessante è anche la correlazione dei dati chimici ottenuti da questa indagine con quelli relativi allo studio della dinamica di flusso verticale, eseguito tramite sonda flowmeter nello stesso punto di monitoraggio. Confrontando i due set di dati infatti si può osservare come tra circa 9 m e 12 m di profondità una condizione di flusso verticale dal basso verso l'alto favorisca una maggiore concentrazione di inquinante a queste profondità, piuttosto che una sua persistenza più in basso.

Le indagini eseguite hanno in definitiva evidenziato la presenza di un acquifero ad elevata trasmissività localmente intercalato da setti a bassa permeabilità che possono dare origine, quando presenti, a più falde sovrapposte semiconfiniate. Ciò ovviamente condiziona le caratteristiche di flusso e la possibilità di mobilità verticale degli inquinanti, favorendo fenomeni di stratificazione degli stessi. Nella fase di implementazione del modello numerico di flusso risulterà quindi fondamentale riuscire a tenere in considerazione la presenza di queste eterogeneità locali.

Confrontando i risultati del modello di simulazione semplificato (ad un solo layer) attualmente realizzato con quelli dell'andamento piezometrico reale, si è potuto constatare che esso riesce a simulare in maniera piuttosto

realistica l'andamento regionale della falda. L'analisi del bilancio idrogeologico e la retta di correlazione livelli piezometrici misurati/livelli calcolati mettono in evidenza il buon grado di attendibilità del modello numerico.

Le successive fasi di implementazione del modello prevedono la necessità simulare la presenza dei setti a bassa permeabilità che, quando presenti, sono in grado di isolare localmente la falda e quindi di influenzare l'andamento del flusso e la distribuzione della contaminazione.

### **Conclusioni**

Tutte le indagini di campo realizzate confermano la locale presenza, all'interno dell'acquifero regionale, di livelli aquitard e il ruolo che essi svolgono isolando localmente porzioni di falda sovrapposte. I rilievi effettuati di natura idrodinamica, idrochimica e isotopica evidenziano la presenza di una stratificazione della contaminazione favorita, oltre che dalla presenza locale di setti a bassa permeabilità, anche dall'instaurarsi di particolari regimi di flusso verticale.

Il lavoro fino ad oggi eseguito ha permesso di ricostruire il modello concettuale della circolazione idrica sotterranea nell'area e di sviluppare un modello matematico di flusso monostrato, in grado di simulare adeguatamente la situazione idrogeologica a scala di sito. Le evidenze riscontrate dalle indagini dirette richiedono altresì l'implementazione di un modello multistrato che potrà essere utilizzato in futuro a scopo gestionale per la progettazione e/o il monitoraggio della bonifica del sito.

### **Bibliografia**

- Nanni T., 1985. Le falde di subalveo delle Marche: inquadramento idrogeologico, qualità delle acque ed elementi di neotettonica, Ed. Regione Marche, Ancona, pp.115.
- Pacioni E., Petitta M., Corvatta G., Fanelli M., 2010. Caratterizzazione idrodinamica di falde idriche contaminate da solventi clorurati: il caso del Basso Bacino del fiume Chienti, ECOMONDO 2010
- Paillet, F.L., 2004. Borehole flowmeter applications in irregular and large-diameter boreholes. *Journal of Applied Geophysics* 55, 39–59.
- van Warmerdam E. M., Frapet S. K., Aravena R., Drimmie R. J., Flatt H., Cherry J. A., 1995. *Stable chlorine and carbon isotope measurements of selected chlorinated organic solvents*. *Applied Geochemistry*, Vol. 10, pp. 547-552.



# I geo-indicatori nella redazione di carte del rischio di inquinamento da nitrati nelle acque sotterranee

**Daniela Ducci**

*Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Geotecnica e Ambientale (DIGA), Sezione Geologia Applicata, Università di Napoli Federico II, Piazzale Tecchio 80, 80125 Napoli, daniela@unina.it*

Sin dagli anni '80 si è osservato in Europa e in Italia un crescente inquinamento da nitrati nelle acque sotterranee, prevalentemente di origine agricola e zootecnica, ma anche di origine civile (perdite di fognature e pozzi neri).

Proprio per tale motivo, è stata emanata la direttiva 91/676/CEE (direttiva "nitrati") con l'obiettivo di proteggere la qualità delle acque in Europa, anche incoraggiando il ricorso a buone pratiche agricole. Da un primo screening effettuato nell'ambito di tale direttiva, mediante l'individuazione delle "zone vulnerabili ai nitrati", il 20% delle acque sotterranee dell'Unione risulta contaminato.

In tal senso anche la comunità scientifica sia italiana che internazionale si è sforzata di mettere a punto metodologie in grado di discriminare il territorio, non solo in base alle reali concentrazioni dei nitrati, ma anche al differente rischio potenziale di contaminazione.

A livello internazionale esistono alcune interessanti proposte come ad esempio quella di alcuni autori portoghesi che hanno redatto carte di probabilità di distribuzione dei nitrati (Mendes e Ribeiro, 2010). In campo nazionale è stato sviluppato il metodo parametrico IPNOA, Indice di Pericolosità da Nitrati di Origine Agricola (Padovani & Trevisan, 2002), che valuta la pericolosità sulla base dei "fattori di pericolo" e dei "fattori di controllo".

Tale metodologia, che consente di valutare il rischio di nitrati di origine agricola e zootecnica ed è stata ampiamente testata sul territorio dando ottimi risultati (Capri et al., 2009), di recente è stata integrata con un'altra metodologia, l'IPNOC (Frullini e Pranzini, 2008), che consente di valutare il rischio potenziale di inquinamento da nitrati di origine civile, sulla base delle caratteristiche della rete fognaria e della presenza di case sparse.

I metodi qui brevemente citati, se da un lato sono ben collaudati, dall'altro utilizzano elementi il cui reperimento è abbastanza laborioso, prevedendo la redazione di cartografia di vulnerabilità ad hoc e sono particolarmente indicati per studi dettagliati, in scala 1:25.000-1:50.000.

La metodologia che invece qui si propone è applicabile a scala minore (provinciale-regionale) e utilizza strati informativi che possono essere di diversa provenienza e nella quasi totalità dei casi sono già disponibili presso l'ISTAT, nell'ambito dei Piani di tutela delle acque (Carte di Vulnerabilità intrinseca all'inquinamento) o in progetti nazionali e internazionali (es. il Corine Land Cover del progetto Image & Corine Land Cover 2000, portato avanti dall'APAT, oggi ISPRA).

La metodologia, in parte derivata da un precedente studio (Ducci et al., 2007), è basata sull'uso dei geo-indicatori. I geo-indicatori individuati quali utili ai fini della definizione del rischio di inquinamento da nitrati delle falde, corrispondenti ad altrettanti tematismi di base, vengono pesati in maniera differenziata e quindi sovrapposti secondo criteri di tipo algebrico (Fig. 1).

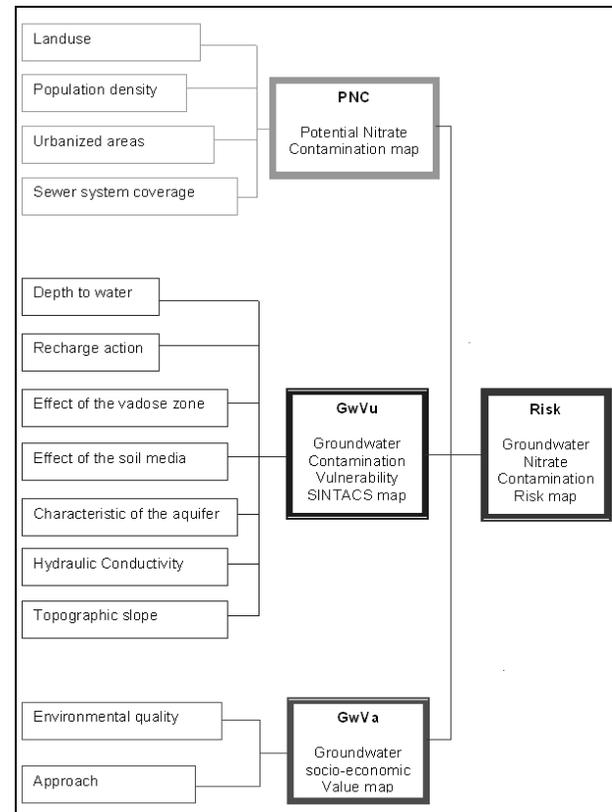


Figura 1: Schema di lavoro per la redazione della carta del rischio di inquinamento da nitrati. Nel caso in esame è stata utilizzata una carta di vulnerabilità redatta con il metodo SINTACS (Civita e De Maio, 2000).

La carta del rischio di inquinamento deriva dalla sovrapposizione pesata di tre carte tematiche di base: la carta di contaminazione potenziale da nitrato (PNC), la carta di vulnerabilità all'inquinamento delle falde (GwVu) e il valore socio-economico delle acque sotterranee (GwVa).

La metodologia è stata applicata in una vasta pianura dell'Italia meridionale (Piana Campana), con concentrazioni molto alte in NO<sub>3</sub> (Ducci, 2009). L'applicazione ha

evidenziato nel valore socio-economico dell'acqua sotterranea il punto più difficile da valutare ed ha evidenziato come esso non possa essere definito univocamente, in quanto dipende dal contesto locale, sulla base dell'uso che se ne fa, dell'entità dei prelievi, della qualità e delle ricadute sull'ecosistema.

In conclusione, la semplicità delle procedure seguite e la buona coincidenza delle carte risultanti con la contaminazione in atto confermano la validità del metodo in aree a scala medio-piccola, laddove non è possibile adottare metodologie di maggiore dettaglio (es. IPNOA).

### **Bibliografia**

Capri E., Civita M., Corniello A., Cusimano G., De Maio M., Ducci D., Fait G., Fiorucci A., Hauser S., Pisciotta A., Pranzini G., Trevisan M., Delgado Huertas A., Ferrari F., Frullini R., Nisi B., Offi M., Vaselli O., Vassallo M. (2009) Assessment of nitrate contamination risk: The Italian experience, *Journal of Geochemical Exploration* 102, 71-86 DOI: 10.1016/j.gexplo.2009.02.006

Civita, M., De Maio M (2000) SINTACS R5 - Valutazione e cartografia automatica della vulnerabilità degli acquiferi all'inquinamento con il

sistema parametrico. Ed. Pitagora. Bologna, 226 pp.

Ducci D. (2009) - The combined usage of gis and geo-indicators for evaluating and mapping groundwater pollution risk. *Proceeding of the 6th European Congress on Regional Geoscientific Cartography Systems EUREGEO*, 1, 148-151.

Ducci D., Massone H., Bocanegra E. (2007) - Linkage of social and natural variables to nitrate groundwater contamination in multiple-use areas: Naples province (Italy) and Mar del Plata (Argentina). In Ribeiro L., Chambel A., Condesso de Melo M. T. (Eds.) *Proceedings of the XXXV IAH Congress "Groundwater and Ecosystems"*. Paper 143, 10 pp., ISBN 978-989-95297-3-1.

Frullini R., Pranzini G. (2008) - L'indice di pericolo d'inquinamento delle falde da nitrati di origine civile (I.P.N.O.C.). *Rendiconti online Soc. Geol. It.*, 84° Congr. Naz., Sassari 15-17 Sett. 2008, Vol. 2,1-3.

Mendes M.P., Ribeiro L. (2010) Nitrate probability mapping in the northern aquifer alluvial system of the river Tagus (Portugal) using Disjunctive Kriging *Science of The Total Environment* ,408 (5), 1021-1034.

Padovani L., Trevisan M. (2002) - I nitrati di origine agricola nelle acque sotterranee. *Quaderni di tecniche di protezione ambientale* 75. Pitagora Editrice, XV, 103 pp., Bologna.



ACQUA 2011

## L'utilizzo di interpolazioni geostatistiche tridimensionali nei modelli matematici di flusso

*Paola Canepa, Tullia Bonomi*

*Dipartimento di Scienze dell'Ambiente e del Territorio, Università di Milano Bicocca. canepa@unimib.it*

Il presente lavoro illustra una procedura per l'elaborazione di modelli matematici di flusso che si basa sull'utilizzo di ricostruzioni geostatistiche tridimensionali delle tessiture e delle proprietà idrauliche dell'acquifero, che sfruttano le informazioni stratigrafiche legate ai pozzi per acqua. Il procedimento seguito è di tipo a feedback iterativo come illustrato in figura: i risultati delle ricostruzioni tridimensionali vengono integrate nel modello di flusso, le cui soluzioni, sottoposte a calibrazione, portano all'individuazione delle modifiche da apportare nelle ricostruzioni.

Per elaborare un modello matematico di flusso è necessario definire le geometrie del sistema idrogeologico in analisi (attraverso l'impostazione di una griglia tridimensionale di calcolo), le sue proprietà idrauliche e le condizioni al contorno che definiscono il flusso idrico sotterraneo. Nella procedura presentata, le ricostruzioni tridimensionali vengono utilizzate per impostare la griglia di calcolo, soprattutto per quanto riguarda la discretizzazione verticale del sistema da indagare. In tal modo non si utilizza una rigida suddivisione del sistema in esame in unità idrogeologiche permeabili o impermeabili, bensì si attribuiscono valori di conducibilità idraulica variabili da cella a cella che simulano la forte eterogeneità presente nel terreno. Il grado di dettaglio della distribuzione di conducibilità idraulica è legato alla discretizzazione scelta per la griglia di calcolo.



L'area di studio considerata è la pianura lombarda compresa tra il Fiume Ticino ad Est ed il Fiume Oglio ad Ovest, delimitata a Nord dal limite tra pianura e primi rilievi prealpini e a Sud dal Fiume Po per un'estensione totale di 6900 Km<sup>2</sup>. Il sistema acquifero considerato è il cosiddetto "Acquifero tradizionale" lombardo suddiviso in due gruppi acquiferi principali (A e B) nel lavoro di Regione Lombardia in collaborazione con ENI-AGIP, 2001; le superfici che delimitano il sistema sono il piano campagna e la superficie di base del gruppo acquifero B

che si estende tra quote di 170 m s.l.m. a nord dell'area di studio a quote di -620 m s.l.m. verso sud. Lo spessore acquifero indagato varia tra circa 0,40 m a nord dell'area di studio e circa 630 m verso sud.

Per realizzare il modello di flusso sono state definite le geometrie del sistema, i parametri idraulici che lo caratterizzano e le condizioni al contorno:

### **Geometrie**

Per definire le geometrie sono state utilizzate le ricostruzioni tridimensionali (3D) che si basano su un ricco database stratigrafico relativo ai pozzi per acqua censiti nell'area di studio (8429 pozzi georeferenziati e con stratigrafia) e gestiti in un database stratigrafico (TANGRAM), sviluppato in anni di attività di ricerca presso il Dipartimento di Scienze dell'Ambiente e del Territorio dell'Università Milano-Bicocca. Le geometrie del sistema sono state discretizzate secondo una griglia pienamente 3D con celle di 500 x 500 m di ampiezza e spessore variabile. La dimensione della cella è stata scelta per mediare tra la dimensione totale dell'area di studio e l'esigenza di riuscire a riprodurre in modo adeguato i limiti fisici del modello che costituiscono le condizioni al contorno (fiumi principali dell'area di studio). La discretizzazione verticale dipende direttamente dalle ricostruzioni tridimensionali; lo spessore è stato suddiviso in 45 strati di spessore variabile tra 1 m e alcune decine di metri in funzione della base del sistema e delle superfici deposizionali intermedie.

### **Parametri idraulici**

La distribuzione della conducibilità idraulica è stata ricavata dalle ricostruzioni tridimensionali ed è stata importata nel modello di flusso. Essa riproduce bene il passaggio tra depositi grossolani a permeabilità maggiore della porzione Nord dell'area di studio e depositi della bassa pianura a bassa permeabilità, che influenza il flusso idrico sotterraneo determinando la risalita della falda che si manifesta sotto forma di fontanili. La variazione di conducibilità idraulica si osserva sia da Nord-Ovest verso Sud-Est sia dal piano campagna in profondità. Nel complesso, quindi, si ottiene una distribuzione di conducibilità idraulica che riproduce correttamente la struttura dell'acquifero: a Nord i depositi costituiscono un corpo indifferenziato contenente una falda libera che passa ad una compartimentazione di sconfinamento sempre maggiore verso valle con il sovrapporsi di falde confinate.

### **Condizioni al contorno**

L'approccio utilizzato per definire le condizioni al contorno è di tipo fisicamente basato perché sono stati utilizzati gli elementi che costituiscono il reticolo idrico superficiale (fiumi e fontanili). I fiumi considerati sono, da ovest verso est, il Fiume Ticino, il Fiume Olona – Lambro meridionale, il Fiume Lambro, il Fiume Adda con i suoi affluenti (Fiume Brembo e Fiume Serio) e il Fiume Oglio; tali corsi d'acqua sono stati inseriti nel modello come condizioni al contorno del terzo tipo (carico dipendente dal flusso). A sud dell'area di studio, invece, è stato inserito il Fiume Po come limite al contorno del primo tipo (carico costante); la scelta di questo tipo di limite è legata al fatto che il Po è il fiume principale della pianura lombarda e in esso confluiscono tutti gli altri corpi idrici superficiali. I fontanili sono stati modellizzati, come la maggior parte dei corsi d'acqua, come condizioni al contorno del terzo tipo. E' stata inoltre inserita la ricarica al sistema come distribuzione variabile nell'area di studio in funzione delle precipitazioni; essa rappresenta per il modello una condizione al contorno del secondo tipo (flusso costante).

Una volta impostato, il modello ha simulato l'andamento del carico idraulico, i vettori di flusso e il bilancio di massa del sistema. La validità dei risultati ottenuti è stata verificata confrontando la piezometria simulata dal modello con quella ricostruita partendo dai dati di monitoraggio e confrontando il carico idraulico simulato con quello misurato presso i pozzi della Rete di Monitoraggio Regionale (inseriti come target di calibrazione). La differenza di carico presso i target è definita residuo di calibrazione. L'analisi dei residui fornisce una stima quantitativa della bontà delle soluzioni ottenute dal modello. Analizzando l'andamento della conducibilità idraulica rispetto ai vettori di flusso, si osserva come queste siano strettamente correlate tra loro.

E' stato inoltre valutato il peso dell'uso di una distribuzione eterogenea di conducibilità idraulica sui risultati finali del modello di flusso confrontandoli con i risultati di un modello con una distribuzione di conducibilità idraulica semplificata e gestita a zone. Il range di conducibilità idraulica totale dell'area di studio è stato suddivi-

so nelle seguenti 6 classi (2 per i termini fini, 2 per i termini medi e 2 per i termini grossolani):

- $\leq 0.00864$  m/g
- da 0.00864 a 0.0864 m/g
- da 0.0864 a 0.864 m/g
- da 0.864 a 69.12 m/g
- da 69.12 a 259.2 m/g
- da 259.2 a 432 m/g

Inoltre, le zone di conducibilità idraulica sono state sottoposte ad analisi di sensibilità. Essa consiste nel perturbare uno alla volta i valori attribuiti a ciascuna zona per una serie di fattori moltiplicativi comuni. I risultati di ciascuna simulazione sono confrontati tra loro rappresentando la variazione della somma dei quadrati dei residui di ciascuna simulazione in funzione del fattore moltiplicativo, per ciascun parametro considerato nell'analisi. Questo consente di individuare la classe di conducibilità idraulica più importante nel controllo del flusso a scala regionale e che è necessario definire nel modello con maggiore precisione.

Il metodo proposto è utile per introdurre all'interno di un modello matematico di flusso ricostruzioni geostatistiche tridimensionali delle geometrie e dei parametri idraulici di acquiferi fortemente eterogenei. Il metodo può essere applicato a scala regionale e si basa sull'utilizzo di una dettagliata banca dati stratigrafica (TANGRAM). In particolare, viene presentato il caso studio della pianura lombarda compresa tra il Fiume Ticino ed il Fiume Oglio. A scala regionale, il calcolo del bilancio di massa di un sistema idrogeologico mediante un modello di flusso non risente in modo evidente dell'utilizzo di una distribuzione di conducibilità idraulica di elevato dettaglio; analizzando le linee di flusso, però, si osserva la forte correlazione tra queste e la distribuzione della conducibilità idraulica. Questo risulta molto importante nel momento in cui da un modello di flusso si passa ad un modello di trasporto. Le analisi effettuate evidenziano, inoltre, che per caratterizzare al meglio l'andamento del flusso idrico sotterraneo nell'area di studio è importante caratterizzare in dettaglio la distribuzione della conducibilità idraulica al passaggio tra i depositi grossolani dell'alta e media pianura a quelli più fini della bassa pianura.



# Modellazione della risposta degli acquiferi attraverso tecniche data driver: potenzialità e prospettive

A. Doglioni, A. Galeandro, V. Simeone

ACQUA 2011

Politecnico di Bari – Facoltà di Ingegneria di Taranto – Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente e per lo Sviluppo Sostenibile

La modellazione della risposta dei livelli idrici sotterranei alle precipitazioni e l'analisi dei meccanismi attraverso cui avviene la ricarica è un problema di grande rilevanza ai fini della gestione sostenibile delle risorse idriche sotterranee, specialmente per le regioni prive o povere di significative risorse idriche superficiali come l'Italia Meridionale.

Solo una corretta caratterizzazione dei meccanismi attraverso cui avviene la ricarica può consentire di pianificare le azioni di tutela e mitigazione degli impatti sulla risorsa idrica (Custodio, 2002). Il classico bilancio idrogeologico pur rappresentando un utile strumento di valutazione qualitativa del volume che di acqua che alimenta un acquifero, non rappresenta uno strumento adeguato alle moderne esigenze di carattere gestionale. È indispensabile che la gestione sia basata su un monitoraggio continuo degli acquiferi, affiancato da una attenta analisi ed interpretazione della risposta della falda alle precipitazioni.

La risposta degli acquiferi alle precipitazioni è profondamente differente per i diversi tipi di acquifero (Doglioni et al. 2011) e molto spesso risente oltre che degli effetti di breve e medio termine anche di effetti di fenomeni a carattere pluriennale (Doglioni, 2011).

Gli autori hanno recentemente proposto un approccio per la modellazione della risposta della falda alle precipitazioni (Giustolisi et al., 2008; Mancarella & Simeone, 2008; Doglioni et al., 2010) basato su un approccio data-driven attraverso una tecnica di modellazione evolutiva EPR (Evolutionary Polynomial Regression) (Giustolisi & Savic, 2006; 2009) che è stata applicata con successo a molti problemi di ingegneria e di modellazione ambientale. Attraverso questa tecnica è possibile costruire equazioni esplicite che esprimano le relazioni esistenti fra gli afflussi (precipitazioni) ed i livelli della falda. In particolare questa tecnica permette di ricostruire un insieme di espressioni simboliche che esprimono il modello di risposta della falda attraverso un polinomio che correla il livello di falda ad un determinato istante di tempo al livello di falda agli istanti precedente ed alle precipitazioni dei mesi antecedenti.

Poter disporre di una equazione esplicita, basata sulla risposta reale della falda, che correla il livello di falda alle precipitazioni oltre ad essere un utilissimo strumento previsionale e gestionale, rappresenta anche uno strumento attraverso il quale interpretare i meccanismi della ricarica. L'analisi ex-post della struttura dell'equazione con-

sente infatti di chiarire le componenti di pioggia più significative ai fini della ricarica ed i tempi di ritardo, oltre che il ritardo con cui si sviluppa la ricarica rispetto alle precipitazioni, costituendo così un utile strumento di analisi.

Nel presente lavoro, dopo aver illustrato potenzialità e prospettive delle tecniche data driven ed in particolare della tecnica EPR, vengono posti a confronto i risultati ottenuti per due distinti acquiferi porosi dell'Italia meridionale. Vengono in particolare evidenziati i meccanismi di risposta individuati per i due acquiferi correlandoli alle caratteristiche idrogeologiche dei due acquiferi. In particolare vengono posti a confronto i risultati già ottenuti per l'acquifero poroso superficiale di Brindisi (Giustolisi et al., 2008; Mancarella & Simeone, 2008) con quelli ottenuti per l'acquifero poroso dell'area di Metaponto (Polemio et al. 2003; Fidelibus M.D. Al. 2004). Per quest'ultimo acquifero si è fatto riferimento alla serie storica di circa 25 anni di misure di livello di falda misurati in due diverse stazioni di misura freaticometriche del Servizio Idrografico e Mareografico poste lungo la fascia costiera ionica. Attraverso il confronto fra i risultati ottenuti vengono posti a confronto i meccanismi della ricarica nei due diversi casi. Da ultimo la risposta della falda viene confrontata con quella dell'acquifero carsico dell'area Salentina (Doglioni, 2010, Doglioni et al. 2011).

## Bibliografia

- Custodio, E. (2002). *Aquifer overexploitation: what does it mean?*. Hydrogeol. J., 10(2), 254-277.
- Doglioni, A., Mancarella, D., Simeone, V. and Giustolisi O. (2010). *Inferring groundwater system dynamics from time series data*, Hydrological Sciences Journal, IAHS press, Vol. 55, n. 4, pp. 593-608, doi: 10.1080/026266661003747556. ISSN 0262-6667.
- Doglioni, A., Simeone, V., and Giustolisi, O. (2011) *Karst and porous aquifer dynamic analysis by EPR*, Proceedings of the 4th ASCE-EWRI International Perspective on Water Resources & the Environment Singapore January 4-6, 2011.
- Doglioni, A., 2010: *Analisi della risposta dinamica alle precipitazioni di un acquifero carsico*, VIII Convegno Nazionale dei Giovani Ricercatori di Geologia Applicata, Perugia, 18-19 febbraio 2010
- Fidelibus M.D. Caporeale F., Spilotro G. (2004) *Studies on different kinds of salinisation in the ground waters of the Ionian coastal plain of the Basilicata region* – 18 SWIM Cartaghena
- Giustolisi, O., e Savic, D.A. (2006). A Symbolic Data-driven Technique Based on Evolutionary Polynomial Regression. J. Hydroinform., IWA, 8(3), 207-222.
- Giustolisi, O., Doglioni, A., Savic, D.A., e di Pierro, F. (2008). An Evolutionary Multi-Objective Strategy for the Effective Management of Groundwater Resources. Water Resour. Res., AGU, 44, W01403.

Giustolisi, O., e Savic, D.A. (2009). Advances in data-driven analyses and modelling using EPR-MOGA. *J. Hydroinform.*, IWA, 11(3-4): 225-236.

Mancarella, D. e Simeone, V. (2008). "Modellazione e previsione nei sistemi idrogeologici mediante la tecnica E.P.R.. (Evolutionary Pol-

ynomial Regression)". *Giornale di Geologia Applicata*, 8, 8-16.

Polemio M., Dragone V., Limoni P.P., Mitolo D., Santaloia F. (2003) *Caratterizzazione idrogeologica della piana di Metaponto, qualità e rischi di degrado delle acque sotterranee*. *Acque Sotterranee* n. 83 giugno 2003, 35-49



## Il flusso attraverso pozzi abbandonati

*Matteo Cultrera, Renzo Antonelli*

*Dipartimento di Geoscienze, Università degli Studi di Padova (Italy), Via Grandenigo 6, 35131 Padova.  
cultrera@geologiatecnica.com Skype: matteo.cultrera*

### ACQUA 2011

Le attività antropiche condizionano e modificano in modo significativo la naturale evoluzione dei sistemi idrici sia superficiali che sotterranei. L'idrogeologia è in grado di descrivere, quantificare e prevedere tutte le alterazioni dirette o indotte sugli equilibri naturali della circolazione idrica sotterranea.

L'osservazione e la descrizione mediante gli strumenti analitico-matematici di tali processi è di fondamentale importanza per la valutazione delle risorse idriche, ma anche per la loro gestione e salvaguardia.

Negli ultimi decenni sono stati messi a punto gli strumenti analitici e numerici in grado di descrivere nel dettaglio i movimenti naturali o indotti (complessi) dei fluidi nel sottosuolo.

Nell'ultimo secolo e con maggiore intensità a partire dal secondo dopoguerra, il numero delle perforazioni idriche nelle varie unità territoriali è cresciuto in modo quasi esponenziale; solo negli ultimi decenni si osserva un rallentamento di tale attività, oltre ad un maggior controllo e gestione delle opere di presa.

Le aree pianeggianti più industrializzate del Veneto sono caratterizzate da una densità particolarmente elevata di terebrazioni idriche. In particolare nell'area industriale e portuale di Mestre-Marghera si stima che siano state realizzate alcune centinaia di pozzi idrici profondi su un'area di alcuni chilometri quadrati.

Dopo la chiusura dei pozzi imposta dal Magistrato alle Acque di Venezia all'inizio degli anni '70, della maggior parte di questi si è persa ogni traccia né sono noti i dettagli stratigrafici e costruttivi.

Si è dunque in presenza di un considerevole numero di perforazioni idriche distribuite su un'area relativamente ristretta che interessano la serie acquifera multi-strato più superficiale e quella profonda fino ad oltre 300m di profondità

Gli effetti di una comunicazione verticale, attraverso pozzi spesso non sigillati in modo corretto o più spesso abbandonati, tra acquiferi profondi ad elevata pressione e quelli più superficiali a più basso potenziale, rappresentano, per un sito di salvaguardia di interesse nazionale, un

problema non trascurabile di gestione e protezione.

I dati bibliografici e le osservazioni sistematiche nel sito di interesse da un lato evidenziano un incremento generalizzato dei potenziali (superiore ai 10 m) nelle varie unità acquifere profonde a partire dall'arresto dello sfruttamento, dall'altro significative anomalie del campo di flusso nel sistema acquifero superficiale confinato o semiconfinato. In sostanza nelle aree portuali, lungo la linea di costa lagunare, le quote piezometriche delle varie unità acquifere posizionate nei primi 20-30 m di sottosuolo risultano sistematicamente superiori, in alcuni casi di oltre un metro, rispetto alle aree interne immediatamente retrostanti.

Se si assume un flusso di ricarica non trascurabile proveniente dalle parti più profonde del sistema acquifero verso quelle più superficiali attraverso i pozzi abbandonati, è possibile stimarne l'entità utilizzando le equazioni standard che governano il flusso sotterraneo verso un pozzo in pompaggio.

È stato assunto un modello geometrico e idrodinamico semplificato sulla base degli aggiornamenti idrostratigrafici e delle misure recentemente eseguite nell'area in oggetto. Sulla base delle soluzioni analitiche proposte da altri autori in contesti differenti, il lavoro ha elaborato alcune procedure specifiche per la stima del flusso di *leakage* attraverso un singolo pozzo passivo collegante due acquiferi: uno profondo ed uno superficiale separati da un *aquitard*.

I risultati ottenuti sono discretamente realistici e compatibili con quelli riportati in bibliografia sia imponendo al contorno condizioni di potenziale costante (moto stazionario) sia di potenziale iniziale (moto transitorio).

È evidente che la possibilità di raggiungere una stima affidabile dell'entità di una eventuale interferenza tra un dominio acquifero profondo ed uno superficiale attraverso pozzi dimessi, può rappresentare in alcuni contesti territoriali, anche più complessi rispetto al modello adottato nel presente lavoro, uno strumento di verifica e approfondimento indispensabile in svariati campi dell'idrogeologia applicata.



ACQUA 2011

## Modellazione numerica di flusso per la progettazione di un sistema di emungimento con pozzi a raggiera

Leonardo Piccinini<sup>(1)</sup>, Valentina Vincenzi<sup>(2)</sup>, Alessandro Gargini<sup>(1)</sup>

(1) Dipartimento di Scienze della Terra – Università degli Studi di Ferrara.

(2) Geotema S.r.l., via Piangipane 141/5, 44121 Ferrara

### **Abstract. Groundwater flow modelling to plan a human water supply system with radial wells**

In the city of Ferrara (Italy) water for human supply is mainly exploited from the Po River and only 1/7 of the total comes from groundwater of the first confined aquifer of the multilayered flow system of the Po plain. Problems related to low hydraulic levels in the river during dry season and to the high vulnerability of shallow waters to contaminant events, addressed the public authorities to evaluate and plan new exploiting strategies.

The best solution is represented by two radial wells extending below the river, that allows to solve dryness problems and to lower the depuration costs taking advantage of the natural riverbank filtration. This strategy is here evaluated in relation to hydrogeological issues: a groundwater flow model has been developed with Feflow 5.3 in order to size the pumping rates and to predict the piezometric drawdown.

Model has been set up collecting and organizing all the available data in the study area and particularly the detailed geological and hydrogeological data near the river in the supply area. Calibration has been performed both at steady state (with two different data-sets corresponding to 2003 and 2010) and at transient state (on 2 aquifer tests).

### **Introduzione**

L'approvvigionamento idropotabile della città di Ferrara è attualmente garantito per 6/7 dalla derivazione diretta di acque superficiali del Fiume Po e solo per 1/7 dall'emungimento di acque sotterranee.

La diminuzione delle portate estive causata dall'aumento dei periodi siccitosi e l'estrema vulnerabilità del fiume agli eventi di inquinamento hanno indotto ATO n.6 e l'ente gestore del servizio idrico integrato (HERA SpA) ad esaminare ed approfondire soluzioni di captazione indiretta delle acque superficiali.

La scelta progettuale più adeguata è stata individuata nella realizzazione di due pozzi a raggiera al di sotto dell'alveo attivo del fiume, in prossimità dell'attuale campo pozzi golenale. La realizzazione di tali opere sarà in grado di garantire la continuità dell'approvvigionamento anche nei periodi di maggiore criticità del fiume provvedendo ad una efficiente "depurazione naturale" (*Riverbank filtration*) in grado di ridurre i costi di depurazione delle acque. I pozzi dreneranno le acque del principale acquifero della pianura ferrarese e cioè il sistema acquifero A1-I (Molinari *et alii*, 2007) che

a nord della città si trova in connessione idraulica diretta con il Fiume Po.



Figura 1 – Schema planimetrico dei pozzi a raggiera (in blu parte del campo pozzi esistente).

L'acquifero, noto anche come I acquifero confinato, è costituito da sabbie del Pleistocene superiore di origine alluvionale che presentano buona continuità orizzontale e spessori compresi tra 10 e 30 m.

Il progetto prevede la realizzazione di due manufatti circolari in calcestruzzo armato aventi diametro interno di 6 metri, infissi nel terreno attraverso dei martinetti idraulici. Lateralmente al manufatto verranno infisse 9 tubazioni orizzontali disposte a semicerchio sotto l'alveo del fiume (Figura 1). I raggi saranno lunghi 130 metri ed avranno un tratto filtrante di 110 m, costituito da filtri di tipo *Johnson Muni-Pak*. Allo scopo di prevedere le portate di emungimento e di valutare gli effetti ambientali dell'opera è stato realizzato un modello numerico agli elementi finiti, in grado di riprodurre l'interazione tra il Fiume Po ed il I acquifero confinato.

### **Implementazione del modello numerico**

Per l'implementazione del modello numerico è stato utilizzato il codice *Feflow* (Diersch, 2005) nella versione 5.3 (*WASY GmbH*), che risolve tridimensionalmente l'equazione di flusso secondo il metodo degli elementi finiti.

Il dominio di modellazione individuato è un quadrato di 20 km di lato centrato in corrispondenza del campo pozzi golenale di Pontelagoscuro, a nord della città di Ferrara.

Il modello è costituito da 5 *layers* (definiti spazial-

mente da 6 *slices* di nodi) che rappresentano: 1) livello acquifero superficiale costituito da depositi prevalentemente limoso-argillosi di spessore variabile tra 2 e 30 m (*layers* 1 e 2); 2) acquifero confinato, costituito da sabbie fini-grossolane di spessore variabile tra 10 e 33 m (*layers* 3, 4, e 5).

Ciascuna *slice* è composta di 17966 nodi che danno luogo a 213618 elementi prismatici a base triangolare; la densità dei nodi è maggiore in corrispondenza dell'area d'intervento e lungo il corso del Fiume Po. La geometria delle *slices* è basata sull'analisi dei dati litostratigrafici reperibili sul dominio di modellazione (Banca Dati Geognostici del Servizio Geologico, Sismico e dei Suoli della Regione Emilia-Romagna, AIPO, AdB PO, Comune di Occhiobello e ARPAV Sezione di Rovigo), integrati dai risultati di 3 sondaggi a carotaggio continuo realizzati in alveo al fiume nel 2009 nell'ambito del presente studio.

I valori di conducibilità idraulica assegnati ai complessi idrogeologici sono rispettivamente  $1.0-5.0 \times 10^{-4}$  m/s per il I acquifero confinato e  $5.0 \times 10^{-6}$  m/s per l'acquifero superficiale; per tutti i *layers* è applicato un fattore di anisotropia verticale ( $K_{x,y}/K_z$ ) pari a 10. Si tratta di valori derivati dai test di pozzo/acquifero reperiti da bibliografia in un altro studio di modellazione del medesimo complesso acquifero (Colombani *et alii*, 2007).

Nelle simulazioni allo stato transitorio per il I acquifero confinato sono utilizzati valori di *storage compressibility* ( $S_s$ ) di  $1 \times 10^{-5}$  1/m e di *storativity* ( $S_y$ ) di 0.2.

Il Fiume Po è simulato attraverso una condizione al contorno del 3° tipo (*TRANSFER*) applicata al layer 1. Il battente idrico del fiume è derivato dai dati AIPO di monitoraggio idrometrico presso le stazioni di Sermide, Pontelagoscuro e Polesella. Il *transfer rate* abbinato alla *boundary* di 3° tipo presenta valori compresi tra 864 e 432000 l/g in relazione alla granulometria dell'alveo del fiume.

Il flusso regionale nel I acquifero confinato è riprodotto attraverso condizioni di 1° tipo (*HEAD*) applicate ai limiti occidentale ed orientale del dominio. L'infiltrazione efficace all'acquifero superficiale è simulata come flusso applicato alla *slice* 1 (*In/outflow on top/bottom*).

L'emungimento presso i principali centri di prelievo della zona (campo pozzi HERA di Pontelagoscuro, campo pozzi Polesine Acque di Occhiobello, Stabilimento Petrolchimico Multisocietario di Ferrara) è simulato con condizioni di 4° tipo (*WELL*).

#### **Calibrazione del modello e simulazioni previsionali**

Per una prima calibrazione allo stato stazionario è stata utilizzata una ricostruzione della superficie piezometrica del I acquifero confinato realizzata nel giugno 2003 su 81 pozzi/piezometri ubicati in destra idrografica al Fiume Po. Si tratta di una piezometria dinamica rilevata in condizioni idrologiche di magra, in cui sono ben evidenti i conii di emungimento indotti dal campo pozzi golenale HERA di Pontelagoscuro (200 L/s da 13 pozzi) e dello Stabilimento Petrolchimico Multisocietario di Ferrara (18 L/s circa da 6 pozzi). Nel giugno 2003 il fiume si trova in

condizioni alimentanti rispetto al I acquifero confinato, in cui il carico idraulico è compreso tra 5 e 1 m s.l.m.

Per la verifica della calibrazione allo stato stazionario (*post-audit*) è stata utilizzata una campagna piezometrica del novembre 2010 su 45 pozzi/piezometri ubicati su entrambe le sponde del fiume. Si tratta ancora di una piezometria dinamica realizzata in condizioni idrologiche di morbida. Infine, per l'affinamento dei parametri di *storage*, è stata effettuata una calibrazione allo stato transitorio che riproduce i dati di 2 *tests* di acquifero di lunga durata (72 ore) realizzati nell'ottobre 2003 nei pressi del campo pozzi di Pontelagoscuro. Sulla base delle indicazioni progettuali sono stati implementati 4 scenari previsionali con le raggie ubicate a profondità di: -13 e -18 m s.l.m. Le raggie sono simulate con condizioni del 4° tipo (*WELL*) applicate a 5 nodi equamente distribuiti lungo la traccia dei dreni (45 nodi per ciascuna raggia). Le simulazioni previsionali sono state realizzate sia allo stato stazionario in condizioni di magra del fiume per simulare la massima interferenza dell'opera e sia allo stato transitorio, utilizzando per il Po un battente idrico medio (periodo 1990-2010), per simulare l'evoluzione temporale del cono di depressione piezometrica.

#### **Risultati**

Le simulazioni allo stato stazionario confermano la possibilità di emungere la portata di 1000 L/s ipotizzata in sede di progetto sia da due raggie e sia da una sola raggia. Rispetto alle condizioni di prelievo attuali (200 L/s da 13 pozzi) si prevedono abbassamenti compresi tra 0.1 e 4 metri su un'area molto vasta che arriverà a lambire la porzione più settentrionale della città di Ferrara. A parità di portata emunta la configurazione in grado di indurre gli abbassamenti minori è quella costituita da due raggie poste a profondità di -13 m s.l.m. Il raggiungimento delle condizioni stazionarie avviene in tempi compresi tra 3000 e 6000 giorni dall'inizio dell'emungimento a seconda della configurazione di prelievo, anche se la maggior parte della depressurizzazione di realizza entro i primi 3 anni (1095 giorni).

Le maggiori criticità connesse alla realizzazione dell'opera sono individuabili dall'aumento dei tassi di subsidenza indotti dalla depressurizzazione dell'acquifero e dal rischio del richiamo di acque inquinate provenienti dallo Stabilimento Petrolchimico Multisocietario di Ferrara ubicato circa 3 km più a sud dell'area di intervento.

#### **Referenze**

- Colombani N., Gargini A., Mastrocicco M., Messina A. (2007) - L'acquifero di Settepolesini di Bondeno: una risorsa idrica potenzialmente alternativa per l'attingimento idropotabile della provincia di Ferrara. Monitoraggio idrogeologico e modellazione numerica per la verifica della produttività del sistema. In: Risorse idriche sotterranee della Provincia di Ferrara. Regione Emilia-Romagna, DB-MAP. Firenze, Italia, pp 62-80.
- Diersch H.J.G. (2005) - Feflow Reference Manual. WASY GmbH, Berlino, pp 292.
- Molinari F.C., Boldrini G., Severi P., Dugoni G., Rapti-Caputo D., Martinelli G. (2007) - *Risorse idriche sotterranee della Provincia di Ferrara*. Regione Emilia-Romagna, DB-MAP. Firenze, Italia, pp 5-61.



**ACQUA 2011**

## Modellazione di un acquifero a porosità fissurale: il complesso vulcanico del M. Amiata (Toscana meridionale)

*M. Nocchi & M. Salleolini*

Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Siena

Il complesso vulcanico del M. Amiata è uno dei più importanti serbatoi idrici naturali della Toscana; tali rocce sono altamente permeabili per fessurazione (e subordinatamente per porosità) e contengono un acquifero freatico particolarmente suscettibile ad ingerire e diffondere inquinanti fluidi e idrovelcolati, in un territorio dove l'attività umana realmente e potenzialmente inquinante grava sui settori per loro natura più vulnerabili. L'assetto geometrico e la distribuzione spaziale delle fratture determinano le caratteristiche idrauliche dell'acquifero e pongono problemi teorici ed applicativi connessi all'elevata velocità di flusso, all'anisotropia del mezzo, alle limitate possibilità di attenuazione del carico inquinante ed alle difficoltà di quantificazione dei parametri. Il rilievo amiatino è interessato da indagini finalizzate ad approfondire le problematiche connesse alla modellazione dei mezzi anisotropi fratturati, con particolare attenzione alla caratterizzazione del flusso idrico e quindi ai diversi approcci modellistici utili a descrivere, alla grande scala, le condizioni di flusso all'interno di una rete di fratture; vengono presentati i primi risultati ottenuti con l'utilizzo di un programma di simulazione agli elementi finiti e sulla base di una definizione dettagliata dello stato di fratturazione.

L'approccio adottato può essere definito continuo del mezzo poroso equivalente anisotropo; l'anisotropia generata dai diversi sistemi di fratturazione è stata rappresentata mediante il tensore della conducibilità idraulica sulla base di una campagna di rilevamento finalizzata alla creazione di una banca dati sulle principali caratteristiche delle discontinuità presenti nel complesso vulcanico ed all'identificazione delle famiglie di fratture che presiedo-

no alla circolazione idrica. La modellazione numerica del flusso è stata realizzata con il software FEFLOW, operando in condizioni stazionarie; è stata utilizzata una strategia a complessità crescente partendo dal calcolo del tensore di conducibilità per l'intero dominio, per poi passare ai tensori delle zone a fessurazione simile. La calibrazione del modello numerico è stata basata sulle serie temporali di portata sorgiva a causa dell'assoluta mancanza di misure piezometriche adeguatamente distribuite.

I risultati della modellazione effettuata con un unico tensore di conducibilità evidenziano una significativa anisotropia del mezzo lungo l'allineamento NNE-SSW, coincidente con le principali zone di recapito delle acque sotterranee, con una buona convergenza tra flussi misurati e calcolati. La suddivisione del dominio in zone, ognuna con i relativi tensori, ha consentito di individuare una realistica distribuzione del campo di conducibilità idraulica e di ridurre gli scarti tra flussi misurati e calcolati, ma la maggiore complessità dell'approccio rende comunque difficoltosa la modellazione accurata dei fenomeni locali.

Il programma di ricerca prevede l'approfondimento delle conoscenze sulla geometria del sistema, in particolare del substrato e di eventuali significative variazioni nelle vulcaniti, e sulle sue caratteristiche idrogeologiche; verranno anche realizzate campagne di rilevamento di maggiore dettaglio sulla rete di fratture dell'intero apparato vulcanico. La corretta rappresentazione del comportamento idrodinamico dell'acquifero costituisce infatti il fondamento necessario per ricavare valide simulazioni del trasporto di eventuali inquinanti, per gestire correttamente il suo sfruttamento e, in particolare, per delimitare le aree di salvaguardia delle relative opere di captazione.



ACQUA 2011

## Modellazione delle interazioni tra acque superficiali e la zona insatura/satura

**Iacopo Borsi<sup>(1)</sup>, Rudy Rossetto<sup>(2)</sup>, Claudio Schifani<sup>(3)</sup>**

<sup>(1)</sup>University of Firenze, Dept. of Mathematics, Viale Morgagni 67/A, 50134 Firenze, Italy (borsi@math.unifi.it);

<sup>(2)</sup>Scuola Superiore Sant'Anna, Land Lab, Via S. Cecilia 3, 56127 Pisa, Italy (r.rossetto@sssup.it);

<sup>(3)</sup>Istituto ISTI - CNR, Via G. Moruzzi 1, 56124 Pisa, Italy (Claudio.Schifani@isti.cnr.it)

Il progetto di ricerca SID&GRID, con inizio Aprile 2010 e finanziato dalla Regione Toscana nel programma POR FSE 2007-2013, svilupperà un modello a scala di bacino, basato su soluzioni *open source* e *public domain*, con il quale sarà possibile simulare il deflusso superficiale e sotterraneo nelle tre dimensioni (Rossetto et al., 2010).

La struttura del modello è derivata dalla combinazione di MODFLOW2005-LGR (Mehl and Hill, 2005) con una nuova versione del codice MODFLOW2000-VSF (Thoms et al., 2006). Mentre il primo permette il raffinamento locale della griglia, il secondo da la possibilità di simulare in tre dimensioni la zona insatura utilizzando l'equazione di Richards.

All'interno di un modello a scala di bacino sarà quindi possibile definire sotto-modelli (*child models*) connessi al "modello madre" attraverso la compilazione delle opportune condizioni al contorno. Ciò permetterà di raggiungere la discretizzazione richiesta per simulare la distribuzione dell'acqua nella zona insatura in aree di circa 25-50 km<sup>2</sup>. Su domini più ampi, la zona insatura sarà risolta utilizzando un approccio semplificato 1D basato sull'approssimazione di soluzione in forma di onda viaggiante per mezzo dello UZF package (Niswonger et al., 2006).

All'interno della struttura e dei codici sopra menzionati, sono in sviluppo e/o modifica moduli che permettono la simulazione dei principali processi che comportano l'interazione tra le acque superficiali e la zona insatura/satura.

Le attuali attività di ricerca sono incentrate nella definizione della ricarica efficace degli acquiferi attraverso la simulazione dei processi di intercettazione, evapotraspirazione, *ponding*, ruscellamento superficiale, deflusso ipodermico interazioni tra acque superficiali e sotterranee.

L'intercettazione è simulata attraverso lo sviluppo di nuove subroutines con le quali calcolare evaporazione dalla copertura vegetale (*wet canopy evaporation*) e i volumi di acqua che, immagazzinati sulle chiome e lungo il fusto della vegetazione, raggiungono il suolo in tempi successivi alle precipitazioni. In ciascun passo di tempo, queste quantità verranno calcolate per ottenere la pioggia netta al suolo.

Il processo di *cascading flow* è implementato, e modi-

ficato rispetto ai codici UZF e VSF, con un nuovo algoritmo per il calcolo della redistribuzione, in condizioni di suolo saturo, del flusso eccedente in ciascuna cella del dominio considerando la pendenza e l'esposizione della cella stessa.

Per quanto riguarda invece le interazioni tra zona satura e le acque superficiali, un ulteriore nuovo algoritmo sviluppato permette il calcolo del deflusso superficiale incanalato e degli scambi con le acque sotterranee attraverso letti semipermeabili. Il nuovo modulo è basato sulla soluzione numerica 1D dell'equazione di Saint-Venant, in cui il termine di drenanza è considerato come un termine di pozzo/sorgente per l'equazione stessa. Tale procedura (ampiamente utilizzata in altri codici, quali ad es. PARFLOW-CLM; Maxwell and Miller, 2005) è stata implementata in una nuova versione del MODFLOW SFR2 package (Niswonger and Prudic, 2005). Test svolti dimostrano un comportamento corretto della soluzione.

Gli aggiornamenti sugli sviluppi del codice sono pubblicati sul sito web: <http://ut11.isti.cnr.it/SIDGRID/>

### Bibliografia

Mehl, S.W., and Hill, M.C., 2005. MODFLOW-2005, The U.S. Geological Survey modular ground-water model—Documentation of shared node Local Grid Refinement (LGR) and the Boundary Flow and Head (BFH) package: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A12, 78 p.

Maxwell, R. M. and N. L. Miller, 2005. Development of a coupled land surface and groundwater model, *J. Hydrometeorol.*, 6(3), 233 – 247

Niswonger, R.G. and Prudic, D.E., 2005. Documentation of the Streamflow-Routing (SFR2) Package to include unsaturated flow beneath streams—A modification to SFR1: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A13, 50 p.

Niswonger, R.G., Prudic, D.E., and Regan, R.S., 2006. Documentation of the Unsaturated-Zone Flow (UZFI) Package for modeling unsaturated flow between the land surface and the water table with MODFLOW-2005: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A19, 62 p.

Rossetto, R., Borsi, I., Schifani, C., Bonari, E., Mogorovich, P., Primicerio, M., 2010. SID&GRID: hydroinformatics system for the management of the water resource. Società Geologica Italiana 85° Congresso Nazionale Bonaccorsi, E., Carmina, B., Marchetti, D. & Pappalardo, M. (Eds.). Rendiconti Online Società Geologica Italiana. Vol.11/2010 Fascicolo 1.

Thoms, R.B., Johnson, R.L., and Healy, R.W., 2006. User's guide to the Variably Saturated Flow (VSF) Process for MODFLOW: U.S. Geological Survey Techniques and Methods 6-A18, 58 p.

# La vulnerabilità delle sorgenti del Ciane per cause naturali ed antropiche

**Aurelio Aureli<sup>(1)</sup>, Mario Dipasquale<sup>(2)</sup>**

<sup>(1)</sup>Già Ordinario di Geologia Applicata, Università di Palermo

<sup>(2)</sup>Dip. di Geologia e Geodesia Università di Palermo; m.dipasquale@unipa.it

La nota vuole evidenziare la vulnerabilità delle sorgenti del Ciane che, nell'ambito del bacino idrogeologico Anapo-Cavadonna, risultano esserne l'elemento preminente.

La vulnerabilità delle sorgenti si è palesata negli ultimi decenni, con un peggioramento quali-quantitativo della risorsa, per il sovrapporsi di cause diverse: 1) gli ingenti prelievi, specie per uso irriguo, e 2) il concomitante generalizzato ridursi, nel periodo storico considerato (1918-2000), delle precipitazioni, specie in concomitanza dei prolungati periodi di magra, che nel tempo si sono verificati.

Il trend pluviometrico, come riscontrato dall'analisi dei dati di pioggia analizzati (periodo 1918-2000), consente di constatare una generale riduzione dell'aliquota di pioggia annua da: circa 700 mm/annui, ad inizio del 900, a, circa 500 mm/annui (vedasi diagramma Fig. 1), alla fine degli anni '90.

La situazione si aggrava in concomitanza dei prolungati periodi di magra che periodicamente si verificano nell'area (1967-68, 1980-81, 2001-02).

Idrogeologicamente, la risorgiva delle sorgenti del Ciane si verifica poiché i calcari, che in profondità, contengono una rilevante falda idrica, affiorano per cause

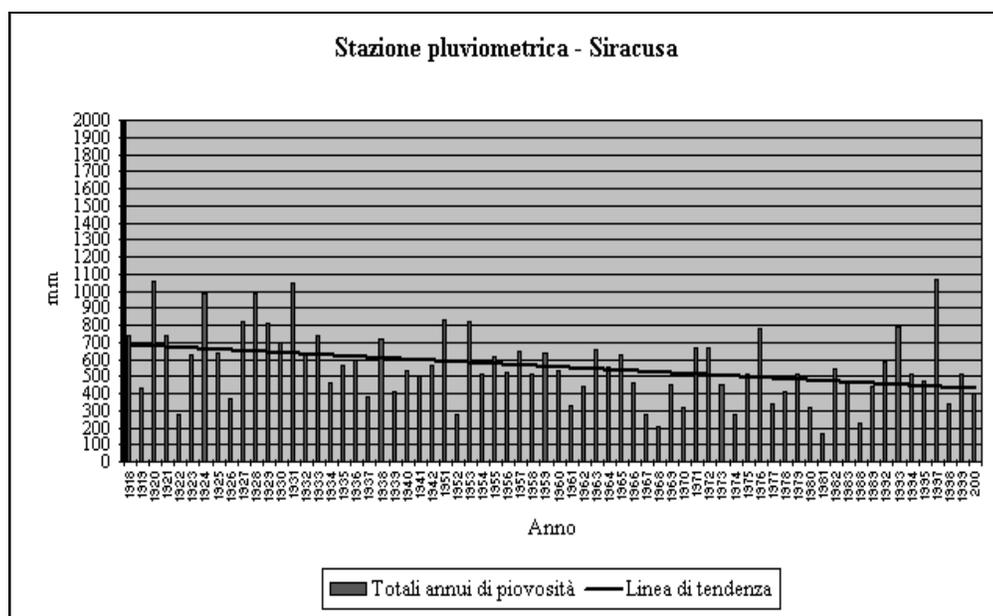
tettoniche presso l'Horst di Cozzo Pantano, ove le acque, risalgono, per carico idrostatico creando i due laghetti, circondati, da tutti i lati (salvo una stretta bocca di scarico) da argille (Aureli et alii, 1987, 1988).

Le argille pleistoceniche costituiscono l'acquicluda intermedio, con permeabilità compresa tra  $10^{-9}$  e  $10^{-10}$  m/s.

L'acquifero superiore, freatico, è dato dalla serie dei terreni permeabili (quaternari), a varia permeabilità, di limitato spessore, ove è contenuta una modesta falda, sfruttata, in passato, con diversi pozzi a largo diametro, detti "romani", oggi abbandonati quasi del tutto o, in alcuni casi, ulteriormente approfonditi.

Le due sorgenti Pisima e Pisimotta alimentavano, in origine, le acque del Fiume Ciane che dava luogo alle paludi Lisimelie; le opere di bonifica, realizzate sul finire del 1800, permisero, canalizzando artificialmente il tratto terminale del fiume, di creare un più continuo collegamento col mare.

Il Testo del Regolamento dell'epoca, "Per le acque dell'Anapo," datato 1857, all' n. 80 cita "nella periferia della fonte, compresa la più piccola, della Pismotta, si apriranno due grandi canali per l'irrigazione, l'uno al braccio destro del fiume, e l'altro a sinistra."



Trend pluviometrico, stazione di Siracusa (periodo 1918-2000)

Le portate delle sorgenti sono passate nel tempo da circa 1400 l/s nel 1906 a circa 1200-1300 l/s nel 1930 (misure del S.I.I), rimanendo praticamente costanti sino agli anni '60.

Nel 1962 numerose misure di portata furono condotte ai fini di una utilizzazione industriale delle acque e la costanza delle portate (risultate praticamente uguali a quelle misurate nel '30) fecero stimare, ai tecnici dell'epoca, di poter contare su una portata continua annua di 1.200 l/s.

Ciò portò alla costruzione di una centrale di sollevamento delle acque, ubicata presso Contrada Mezzabotte, a valle delle sorgenti, lungo il corso del Ciane.

La portata però negli anni a seguire diminuì sensibilmente con il seguente decremento (Aureli et alii, 2005): 1. 1966 (1067 l/s), 2. 1975 (786 l/s); 3. 1985 (250 l/s), 4. 1989 (237,5 l/s).

Pertanto già nel '66 non era possibile, derivare la portata in origine prevista, e successivamente negli anni '70 la portata edotta, venne ridotta a soli 500 l/s.

L'opera di derivazione venne chiusa definitivamente alla fine degli anni '80, per le portate ridotte riscontrate.

Tale forte decremento delle portate fu dovuto all'incremento, sovente incontrollato, del numero di pozzi, a prevalente utilizzo irriguo, che nella piana del Ciane, si stimavano, a fine anni '80, in circa 600.

La loro distribuzione risultava non uniforme, ma concentrata in alcuni settori della pianura, legata a fattori molto diversi: estensione delle proprietà terriere, natura dei terreni irrigati, caratteristiche di idroesigenza delle coltivazioni praticate creando una sollecitazione della falda più intensa in alcuni settori rispetto ad altri. Tale situazione portò, rispetto all'andamento piezometrico generale, il formarsi di coni di depressione localizzati richiamanti anche le acque della zona costiera più salate.

La permanenza dei prelievi contrastando con la varietà, positiva o negativa, della ricarica, specie negli anni più siccitosi, definì l'aumento dello stato di irregolarità dei rapporti tra disponibilità e sfruttamento.

Le risorse stagionali della falda risultarono non più sufficienti intaccando le riserve secolari profonde provocando forti depressioni della piezometrica che, a partire dal 1974, furono misurate nell'area.

La diminuzione delle portate, tra gli anni '70 e '80, provocò anche un aumento del tenore in Cl passato dai 550 mg/l, nel luglio 1964, ai 750 mg/l, nel settembre 1983 e raggiungendo un massimo di 999 mg/l nel giugno

del 1988 (Aureli et alii, 2005).

Dal 1983 in poi, l'Unità Operativa 4.17, del Gruppo Nazionale Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche, del CNR, ha iniziato lo studio, il rilievo e l'elaborazione cartografica dei fenomeni di "Vulnerabilità delle falde idriche sotterranee" anche di tale areale, che vide il concretizzarsi, degli studi condotti, con la pubblicazione, della "Carta di Vulnerabilità delle falde idriche" del "Settore Nord Orientale Ibleo (Aureli et alii, 1989).

Nel periodo: 2001-2003, la conoscenza delle caratteristiche delle zona si sono ulteriormente approfondite grazie ad una ricerca, promossa dall'UNESCO, in collaborazione con l'Agenzia Internazionale per l'Energia Atomica (IAEA), con lo studio dei rapporti tra "acqua dolce di falda e acqua salata del mare", lungo il tratto della costa siciliana, compresa tra Siracusa e Donnalucata (Aureli et alii, 2003).

I valori della salinità, riscontrati in tale periodo, nelle sorgenti, risultarono diminuiti, rispetto agli anni '80, con valori di circa 350 mg/l, da legare, con ogni probabilità, all'istituzione, nei primi anni '90, della Riserva Orientata del Ciane.

La nota, pertanto, vuole evidenziare la vulnerabilità di uno sistema sorgentizio, noto in tutto il mondo per ragioni letterarie, a causa del sovrapporsi dell'impatto antropico, e delle variate condizioni climatologiche, che si sono verificate nell'ultimo secolo, con conseguente depauperamento quali-quantitativo di tale importante risorsa; certificando che solo un'adeguata valorizzazione di tale bene ne ha impedito la possibile completa scomparsa.

### **Bibliografia**

Aureli et alii (1987). Caratteristiche delle linee di flusso dell'intrusione salina influenzate dalla tettonica in area costiera ove gli acquiferi sono sovrasfruttati. Mem. Soc. Geol. Ital. n. 37, Roma 1987. Pubbl. n. 23 del G.N.D.C.I.

Aureli et alii (1988). Carta della Vulnerabilità all'inquinamento degli acquiferi nel settore nord-orientale ibleo (Sicilia Sud-Orientale). 1° Convegno Nazionale sulla protezione e gestione delle acque sotterranee, Marano sul Panaro (Modena) Sett., 1990.

Aureli et alii (2003). "L'intervention de Organismes intertionaux UNESCO-IAEA, dans l'etude du programme de gestion du risque eau en pays semi-aride. Project Sicile. Atti "GESTION DU RISQUE EAU EN PAYS SEMI-ARIDE" – Tunis, 20-22 Maggio 2003.

Aureli et alii (2003). Submarine springs and salt-water intrusion in fractured environment. Groundwater in Fractured rocks – Prague, Czech Republic.

Aureli et alii (2005); *Due dolci ninfe: Ciane e Aretusa Vulnerabili e violate*. Atti 4° National Congress on the Protection and Management of Graoundwater. Reggio di Colorno (Pr), 21-23 Settembre, 2005.



ACQUA 2011

## Exploration of groundwater reservoirs in the Tagliamento River basin (northern Italy)

**Dimitra Rapti-Caputo, Giovanni Santarato**

*University of Ferrara, Department of Earth Sciences, via Saragat 1, blocco, B, stanza 314, I-44100 Ferrara, Italy (cpr@unife.it)*

From a geological point of view, the Tagliamento River (northern Italy) is subdivided in two distinct sectors, the Higher and Lower basin. The Higher basin consists of coarse-grained clastic sediments, mainly gravels, irregularly cemented and locally forming conglomerate horizons.

In contrast, the Lower basin is characterised by sand and clay deposits alternating with gravel and peat horizons. The overall facies distribution strongly depends on the palaeogeographic evolution of the area characterised by a fluvio-glacial environment variably grading into marine, lagoon and marshy conditions. As a consequence, the fluvial dynamics of the Tagliamento River has influenced the geometric characteristics and vulnerability of groundwater resources.

We carried out the systematic analysis of the stratigraphic, geomorphological, hydrogeological and geochemical data that enabled to a) define the principal aquifer system of the area down to a depth of about 500 m; b) geometrically characterise the aquifers (thickness, depth); c) estimate the hydraulic parameters, through the implementation of different pumping test; d) evaluate the

influence of the human activities on the piezometric level; e) determine the chemical and isotopic composition of the underground resources; f) evaluate the role played by the palaeochannels on the vulnerability of the aquifer systems.

Moreover, in order to better calibrate the conceptual hydrogeological model, detailed and repeated three-dimensional resistivity surveys based on combined electrical resistivity tomography (ERT) and time-domain electromagnetic (TDEM) surveys have been carried out in a test area. In particular, ERT investigations were mainly used to constrain the geometry and porosity of the overburden and to calibrate the shallowest TDEM information.

The definition of the main physical and geometric parameters of the aquifers, of their hydraulic and hydrogeochemical characteristics down to a depth of about 500 m b.g.l. will certainly facilitate the local authorities responsible for territorial planning in formulating appropriate policies for the protection, management and use of the surface and groundwater resources.



ACQUA 2011

## Evoluzione dell'area urbana di Como: analisi stratigrafiche e idrogeologiche

**Francesca Ferrario, Fabio Brunamonte, Alessandro Maria Michetti, Livio Bonadeo**

*Università degli Studi dell'Insubria, Dipartimento di Scienze Chimiche e Ambientali, Via Valleggio 11, 22100, Como. francesca.ferrario@uninsubria.it*

L'area urbana della città di Como è caratterizzata da una situazione stratigrafica, geotecnica e idrogeologica molto peculiare: nel sottosuolo cittadino si riscontra infatti la presenza di sedimenti comprimibili in facies lacustre e paralicca, molto recenti (Pleistocene Superiore – Olocene), con spessori che superano il centinaio di metri (Comerci *et al.*, 2007), e storicamente soggetti a fenomeni di abbassamento del suolo, che si sono manifestati in modo particolarmente intenso nel corso degli Anni '60-'70 (vedi Relazione finale della Commissione per lo Studio dei Fenomeni di Subsidenza, 1980).

Pertanto, assume particolare rilevanza uno studio di dettaglio della geologia e idrogeologia dell'ambiente urbano della città, al fine di definire un modello del comportamento meccanico del sottosuolo nel tempo e di analizzare l'influenza dei parametri idrogeologici sui fenomeni di subsidenza in atto.

A partire dal 2002, il Dipartimento di Scienze Chimiche e Ambientali dell'Università degli Studi dell'Insubria ha avviato un'attività di ricerca multidisciplinare volta a studiare l'evoluzione recente dell'area.

Le oscillazioni freatiche e idrometriche nell'area urbana sono ovviamente legate alla dinamica di uno dei più importanti bacini lacustri in Europa, il Lago di Como, per cui la delimitazione dell'area di studio ha tenuto in considerazione l'entità dell'interazione con il bacino lacustre, e quindi la raccolta dei dati in alcuni casi, relativi ad esempio all'idrometria, idrologia e andamento delle precipitazioni, è stata opportunamente estesa a tutta l'area di interesse per il bilancio idrologico del Lario, vale a dire buona parte della Lombardia e del Ticino.

Sono stati presi in considerazione i seguenti aspetti scientifici e operativi: quello litologico - stratigrafico (raccolta stratigrafie, realizzazione di due sondaggi profondi in corrispondenza di Piazza Verdi, analisi di nuovi affioramenti nella zona di Borgovico), quello geotecnico (caratteristiche dei terreni e strumentazione di monitoraggio), quello idrogeologico (monitoraggio piezometrico e idrometrico) e quello relativo ai fenomeni ambientali in atto (subsidenza).

#### **Dati geotecnici e stratigrafici**

Un'accurata ricerca ha permesso di raccogliere oltre 100 stratigrafie di sondaggi effettuati nell'area urbana di Como, che sono state informatizzate attraverso il *software* CASPITA, sviluppato dalla Regione Lombardia; a partire da tutti i dati a disposizione sono stati sviluppati dei profili geologici che hanno permesso di caratterizzare l'andamento dei sedimenti presenti nel sottosuolo della convalle.

Le ricerche in corso hanno comportato la realizzazione nel 2004 di una livellazione geometrica di precisione da parte dell'APAT (Agenzia per la Protezione dell'Ambiente e i Servizi Tecnici, oggi ISPRA, Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale) e, nel novembre 2005, di due sondaggi a carotaggio continuo, della profondità di 70 metri ciascuno, ubicati in Piazza Verdi e attrezzati con un assestimetro magnetico e un piezometro per il monitoraggio della falda profonda.

Il sito di Piazza Verdi costituisce quindi il punto di riferimento per l'interpretazione di tutti i dati esistenti sul sottosuolo dell'area urbana di Como.

#### **Rilevamento geologico**

La realizzazione del Foglio Geologico "Como", affidata all'Università dell'Insubria, ha comportato un accurato rilevamento geologico in scala 1:10000 del substrato e dei depositi quaternari affioranti nell'area di studio.

Di notevole interesse sono i dati raccolti nella zona di Borgovico, dove recenti scavi edilizi hanno esposto una serie di sezioni in corrispondenza dell'affioramento del Retroscorrimento di Monte Olimpino (e.g., Bernoulli et al. 1989), un lineamento tettonico di importanza regionale che si estende tra Como e Varese.

È stato possibile osservare una sequenza appartenente alla Formazione di Chiasso, di età oligocenica, a contatto per faglia inversa su depositi quaternari lacustri e di spiaggia. Questo testimonia inconfutabilmente un'attività tardopleistocenica - olocenica del Retroscorrimento, in

accordo con quanto recentemente suggerito da Sileo et al. (2007), Chunga et al. (2007) e Livio et al. (2009).

#### **Dati idrologici**

Le ricerche condotte hanno permesso di analizzare, seppure in via semi-quantitativa, il regime idrologico del Lago di Como per un periodo temporalmente significativo: sono stati reperiti i dati pluviometrici di numerose stazioni ubicate nel bacino imbrifero dell'Adda prelacuale e nelle zone rivierasche del lago.

Le precipitazioni del periodo 1 luglio 2008 – 30 giugno 2009 sono state poi confrontate con le medie storiche dell'area e con i livelli idrometrici, gli afflussi e i deflussi, da cui risulta evidente la stretta relazione tra piogge e livello idrometrico.

#### **Dati idrogeologici**

A partire dal 2006 l'Università dell'Insubria misura la rete piezometrica comunale, costituita da oltre 30 strumenti ubicati nell'area urbana della città. In periodi particolarmente significativi, i rilevamenti, usualmente a cadenza circa mensile, sono molto ravvicinati e hanno consentito di individuare l'andamento della superficie piezometrica e i tempi di risposta ai fattori esterni.

I dati raccolti sono stati messi in relazione ai livelli lacustri e agli altri parametri idrologici: si è così potuto verificare che la falda freatica è fortemente influenzata dal livello idrometrico.

Alcuni strumenti, ubicati nelle vicinanze del Duomo cittadino, presentano serie piezometriche anomale, forse connesse alle deformazioni tettoniche recenti legate al Retroscorrimento di Monte Olimpino; sono in fase di sviluppo ulteriori studi con l'obiettivo di una valutazione più approfondita delle interazioni tra lineamenti tettonici e idrogeologia dell'area urbana.

#### **Subsidenza**

Sulla base di dati geologici, il tasso di subsidenza naturale negli ultimi ca. 15.000 anni nella zona più prossima alla sponda lacustre è stato stimato dell'ordine di 4-5 mm/anno, mentre la subsidenza accelerata da fattori antropici ha raggiunto valori di un ordine di grandezza superiori (Comerci et al., 2007).

L'analisi dei dati delle livellazioni geometriche di precisione, condotte tra gli Anni '20 e il 2004, e dei dati satellitari di interferometria porta a concludere che, attualmente, la subsidenza sta procedendo con tassi assimilabili a quelli naturali.

Un approccio alternativo per la stima dei tassi di subsidenza si basa sull'utilizzo di serie idrometriche storiche: confrontando i dati di idrometri collocati su sedimenti subattuali (Lungo Lago Trento), con quelli di altri strumenti fondati direttamente in roccia (Calcare di Moltrasio; Villa Geno, Malpensata, Malgrate), è possibile valutare l'entità dell'abbassamento del terreno. L'analisi dei dati contenuti negli Annali Idrologici e di alcune serie inedite relative all'idrometro "Como Lungo Lago", ha permesso di quantificare l'abbassamento del suolo in 3,65 mm/anno, risultato del tutto comparabile con quanto

desunto da dati geologici ed archeologici.

Questa stima preliminare è la base per raffinare gli studi nell'ottica di identificare le tendenze evolutive del fenomeno di subsidenza e di valutare l'influenza dei lineamenti tettonici attivi e dell'assetto strutturale regionale.

La validità dei risultati finora ottenuti è testimoniata

dalla congruenza dei dati derivanti da metodologie di indagine radicalmente differenti tra loro; a partire da questi risultati, è possibile formulare delle ipotesi relative al comportamento meccanico e all'evoluzione nel tempo dei terreni nell'area di studio, da verificare sulla base di ulteriori indagini.



## Determinazione della velocità delle acque sotterranee in un sito della pianura vicentina con il metodo della diluizione in pozzo

**Mirta Ortombina, Paolo Fabbri**

Dipartimento di Geoscienze - Università degli Studi di Padova - Via Gradenigo 6, 35131 Padova- Italy

### Introduzione

Le indagini svolte rientrano all'interno del progetto strategico di Ateneo dell'Università di Padova denominato GEO-RISK. Le analisi riguardano lo studio idrogeologico di un sito sperimentale localizzato nella media pianura veneta, in Comune di Villaverla (VI) all'interno dell'area di approvvigionamento idrico ACEGAS-APS. Vengono qui presentati i primi risultati dell'applicazione del metodo della diluizione puntuale in pozzo (Ogilvi, 1958; Pitrak *et alii*, 2007) basato sull'immissione istantanea di un tracciante artificiale.

L'esperimento della diluizione in pozzo è stato effettuato il 15 settembre 2010. I risultati qui riportati sono solo una parte di quelli ottenuti durante l'esecuzione di una prova di tracciamento. (Perri *et alii*, 2010; Liuzzo Scorpo, 2010).

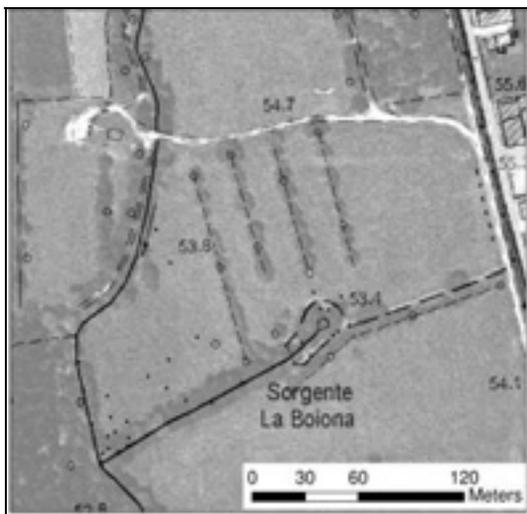


Figura 1 - Ortofoto e ctr della zona di studio con l'ubicazione del piezometro monitorato PS1

### Inquadramento geografico ed idrogeologico

L'area di studio è ubicata nella media pianura veneta all'interno della fascia delle risorgive. Dal punto di vista topografico, le quote del piano campagna variano tra 56,0 m e 50,0 m s.l.m., evidenziando pendenze decrescenti da NW a SE.

Per quanto riguarda l'idrografia locale, nelle immediate vicinanze dell'area di studio sono presenti una risorgiva denominata Boiona ed i canali Boiona e Beverara, che costituiscono il reticolo di drenaggio delle acque meteoriche nonché le aste di deflusso delle risorgive. La zona presenta un'elevata eterogeneità del sottosuolo e di conseguenza delle caratteristiche idrogeologiche, con la presenza di ghiaie intercalate da orizzonti sabbiosi, limosi ed argillosi.

In questa zona è presente una falda freatica superficiale alimentata essenzialmente dalle precipitazioni. Il piezometro denominato PS1, scelto per l'immissione del tracciante, è stato perforato appositamente con caratteristiche idonee allo scopo. La profondità è di 3 metri con un tubaggio in pvc da 3 pollici. La quota sul piano campagna della bocca del pozzo è 53,586 m s.l.m. ed il tratto filtrante è posizionato tra -1 e -3 m da b.p.. Come si può notare dalla stratigrafia (Fig.2) il materiale ghiaioso è prevalente, tuttavia si tratta di ghiaie con un'abbondante componente limosa o argillosa, che riduce la permeabilità delle ghiaie.

### Principi e metodi

La prova denominata "a pozzo singolo" consiste nell'immettere, in modo "puntuale" ed "istantaneo", un tracciante nel piezometro di misura per poi acquisire le variazioni di conducibilità dell'acqua nel tempo.

Ogilvi (1958) descrive la teoria e i principi di applicazione della tecnica della diluizione in pozzo, valida per tutti i tipi di traccianti:

$$(1) \quad \ln(C_i) = -\left(\frac{2V_a}{r}\right) + \ln(C_0)$$

Dove  $C_0$  è la concentrazione iniziale del tracciante,  $C_i$  la concentrazione al tempo  $t_i$ ,  $r$  è il raggio interno del piezometro e  $V_a$  è la velocità apparente di filtrazione. Per passare dalla velocità apparente alla velocità reale ( $V_r$ ), è necessario considerare il coefficiente di drenaggio  $\alpha$  (Pitrak *et alii*, 2007) e la porosità efficace ( $n_e$ ).

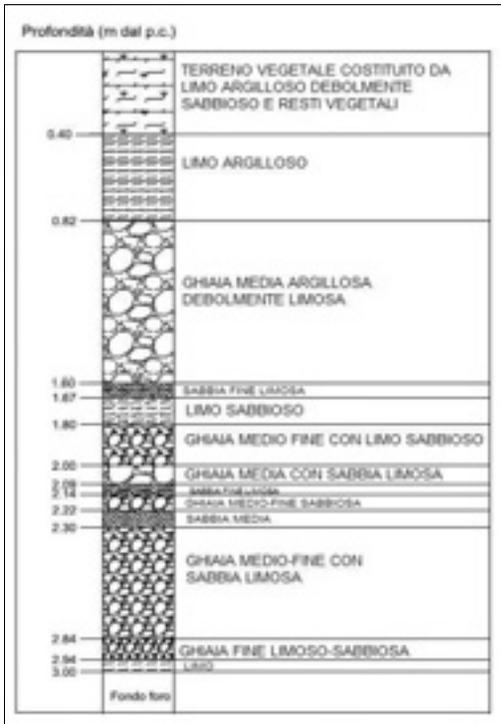


Fig.2 - Stratigrafia PS1

L'esperienza di tracciamento eseguito in questo sito, condotto secondo la pratica dell'immissione istantanea, è stato effettuato iniettando nel piezometro di misura una soluzione salina (NaCl) con concentrazione di 6 g/l.

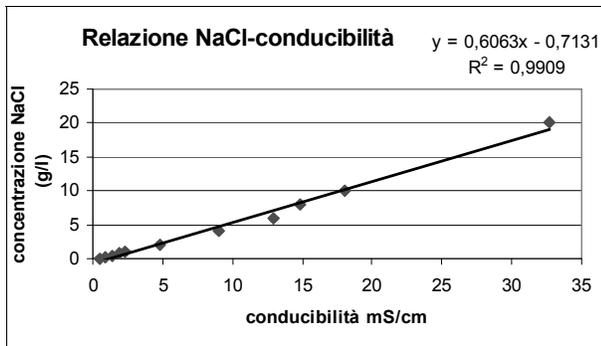


Fig.3 - Calcolo sperimentale della relazione tra conduttività e concentrazione di NaCl

La scelta della tipologia del tracciante è stata dettata, oltre che dalla sua semplice reperibilità, movimentazione e dal costo contenuto, anche dalla necessità di non

alterare la qualità delle acque sotterranee, poiché nelle vicinanze sono presenti alcuni pozzi per l'approvvigionamento idrico. Lo strumento di misura è stato installato ad una profondità di -2,65 m da bocca pozzo e la registrazione dei valori di conduttività è stata effettuata dal 15 al 23 settembre 2010. In questo intervallo di tempo sono stati acquisiti ogni 10 minuti i valori di conduttività, livello della tavola d'acqua e temperatura.

Per ottenere il valore della velocità reale di filtrazione è stato necessario in primo luogo passare dal valore di conduttività, preventivamente standardizzata a 25 °C, a quello della concentrazione del tracciante salino, attraverso un coefficiente di proporzionalità ricavato sperimentalmente (Figura 3).

Il calcolo della velocità di filtrazione è stato effettuato tramite una regressione lineare tra il logaritmo naturale della concentrazione del tracciante in mg/l e il valore corrispondente di tempo (Figura 4). (Pitrak *et alii*, 2007)

Il coefficiente angolare della retta è proporzionale alla velocità apparente di filtrazione in accordo con l'equazione (1). La velocità apparente è quindi calcolata secondo la relazione:

$$(2) \quad v_a = m \cdot \left(\frac{\pi r}{2}\right)$$

dove  $m$  è la pendenza della retta di regressione.

Sostituendo quindi il valore del coefficiente angolare nell'equazione (2) e successivamente dividendo per il coefficiente di drenaggio  $\alpha$  (assunto uguale a 2) (Pitrak *et alii*, 2007) e per la porosità efficace  $n_e$  (assunta pari a 0,15), si ottiene una stima della velocità reale della falda nell'intorno del piezometro di immissione. Il valore stimato della velocità reale è di circa 0,06 m/giorno.

L'esperienza descritto rappresenta uno dei metodi con cui è possibile ricavare la velocità di filtrazione, che rappresenta un'importante componente conoscitiva per una corretta gestione e protezione delle acque sotterranee. Sono inoltre in programma ulteriori prove di diluizione puntuale in altri piezometri presenti nel sito, per avere una visione complessiva delle caratteristiche di velocità dell'area indagata.

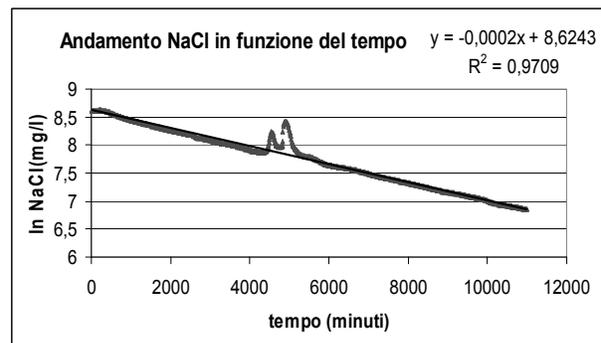


Fig.4 - Andamento del logaritmo della concentrazione di NaCl nel tempo; i valori anomali sono collegabili ad un intenso evento di precipitazione

### **Ringraziamenti**

Si ringraziano per la disponibilità il Dott. Franco Berti e il p.i. Walter Nicoletto dell'azienda ACEGAS-APS, e per la collaborazione durante le fasi operative il Prof. Giorgio Cassiani, la Dott.ssa Rita Deiana e la Dott.ssa Maria Teresa Perri.

### **Bibliografia**

Liuzzo Scorpo A. 2010. Caratterizzazione di un acquifero eterogeneo tramite misure non invasive e test con traccianti salini. Tesi di Laurea inedita.

Ogilivi N.A. 1958. Electrolytic method for the determination of the ground water filtration velocity (In Russian). Bull. of Science and Technology News, no. 4, Moscow, Russia: Gosgeoltekhizdat.

Perri M.T., Cassiani G., Deiana R., Fabbri P., Liuzzo Scorpo A., Ortombina M. 2010. Monitoraggio ERT and EM di un test con tracciante in un acquifero di risorgiva. 29° Convegno Nazionale: Gruppo nazionale di geofisica della terra solida. Prato 26-28 ottobre 2010, 440-442.

Pittrak M., Mares P., Kobr M. 2007. A Simple Borehole Dilution Technique in Measuring Horizontal Ground Water Flow. Ground Water 45, no. 1: 89-92.



## **Risorse idriche sotterranee nel Promontorio di Portofino (Italia)**

**Francesco Faccini<sup>(1)</sup>, Andrea Robbiano<sup>(2)</sup>, Alessandro Sacchini<sup>(1)</sup>**

<sup>(1)</sup>Università degli Studi di Genova, [faccini@unige.it](mailto:faccini@unige.it), [asacchini@unige.it](mailto:asacchini@unige.it)

<sup>(2)</sup>Dott. Geol. (Ph.D.), [geotecam@libero.it](mailto:geotecam@libero.it)

Il Promontorio di Portofino, ubicato circa 25 km ad E di Genova, interrompe la linea di costa fra Genova e Sestri Levante con una forma a trapezio e una netta elevazione orografica che supera 600 m s.l.m.

La porzione meridionale del Promontorio, esposta a SSO, presenta alte scarpate rocciose sottoposte ai venti prevalenti da SO e SE.

Il clima è di tipo submediterraneo, anche se fattori come altitudine ed esposizione determinano topoclimi differenti. Il massimo di piovosità si rileva in autunno, il minimo in estate: l'altezza di precipitazione media annua varia tra 1200 e 1700 mm; la temperatura media annua varia tra 13° e 15 °C, con massimo estivo di 23-24 °C e minimo invernale di 7-8 °C.

Nel territorio è stato condotto un rilevamento idrogeologico che ha permesso di censire una trentina di sorgenti perenni, la cui ubicazione è riconducibile a due differenti situazioni, in funzione dell'assetto geologico del Promontorio: la prima è lungo il contatto tra il conglomerato oligocenico a S e il flysch calcareo marnoso con intercalazioni argillitiche a N, mentre la seconda mostra una disposizione variabile, ma spesso in quota, anche in prossimità dello spartiacque.

Le sorgenti mostrano portate variabili tra 0,5-1 l/min fino a 5-20 l/min, con oscillazioni contenute nell'anno. Alcune di queste sorgenti, specie quelle sul versante S del

Promontorio, mostrano portate significative anche nel periodo estivo, siccitoso, e alimentano gli acquedotti di Camogli e Portofino. La temperatura dell'acqua sorgiva è generalmente costante nel corso dell'anno e presenta valori coerenti con la temperatura media dell'aria.

In considerazione dell'assetto idrogeologico e del ridotto contributo di pioggia in estate, è possibile affermare che un ruolo importante nell'alimentazione idrica del Promontorio di Portofino è legato ai fenomeni di condensazione. Le masse d'aria provenienti da S, calde e quasi sature di vapor d'acqua per aver fluito sul mare, risalgono lungo la falesia: l'abbassamento di temperatura dell'aria per effetto orografico comporta la condensazione dell'acqua nelle discontinuità della roccia.

Il fenomeno è rilevante se si tiene conto dei milioni di metri cubi d'aria che frangono sul conglomerato fratturato e che 1 m<sup>3</sup> d'aria a 25 °C e 75% di umidità relativa deposita fino a 5 gr d'acqua quando giunge a contatto con pareti rocciose tra 10° e 15 °C.

Considerato che la porzione meridionale del Promontorio presenta un'estensione superiore a 3 milioni di m<sup>2</sup>, si possono determinare per condensazione migliaia di litri d'acqua al giorno per fenomeni di condensazione, con maggiore effetto nel periodo estivo e genericamente al mattino.



ACQUA 2011

## Modello concettuale dell'acquifero carbonatico della Montagnola Senese (Toscana, Italy)

**Piero Barazzuoli, Jenny Migliorini, Fausto Capacci, Roberto Rigati**

*Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Siena*

L'acquifero della Montagnola Senese (conosciuto come "Luco") è considerato un importante serbatoio idrico strategico della Toscana meridionale.

Questo studio ha consentito l'approfondimento delle conoscenze per una giusta caratterizzazione geometrico-strutturale, idrodinamica e idrochimica dell'acquifero e restituisce i risultati di un lavoro che ha l'obiettivo di realizzare un modello concettuale dell'acquifero ai fini di una corretta valutazione e gestione delle risorse idriche sotterranee.

I nuovi dati relativi alla geometria dell'acquifero, costituito dalle formazioni carbonatiche del Calcere Cavernoso e della Breccia di Grotti, sono stati acquisiti attraverso sondaggi geoelettrici, tomografie, stratigrafie di pozzi ed analisi della nuova cartografia geologica al 10000.

Ciò ha permesso di stimare le profondità del substrato impermeabile, i limiti laterali dell'acquifero stesso e di definirne lo spessore.

La sua estensione è pari a circa 166,3 Km<sup>2</sup> a fronte di un'area di alimentazione (corrispondente alla superficie affiorante del complesso calcareo) pari a circa 91,6 Km<sup>2</sup>.

L'intero complesso risulta avere uno spessore medio di circa 178 m. Il calcolo del volume totale risulta pari a circa 29,5·10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>.

Questo dato non può che confermare l'elevata potenzialità d'immagazzinamento dell'acquifero; i dati presenti in letteratura gli assegnano una porosità efficace del 5-10 % pari ad un volume di vuoti efficaci interconnessi compreso tra 1,5·10<sup>9</sup> m<sup>3</sup> e 3,0·10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>.

Per la caratterizzazione idrodinamica dell'acquifero i risultati raggiunti sono influenzati da una disomogenea distribuzione dei punti di misura, ma che comunque hanno consentito di individuare elementi e limiti idrodinamici.

Anche per quanto riguarda la caratterizzazione

idrochimica, i risultati raggiunti hanno le stesse limitazioni. Si può asserire che, per quanto riguarda i parametri chimico-fisici analizzati, le acque della falda sono da definire di buona qualità per l'uso idropotabile.

La valutazione della ricarica dell'acquifero ha seguito due strade.

La prima, una volta definita la superficie dell'area di ricarica per infiltrazione, attraverso la valutazione indiretta dell'infiltrazione totale in relazione all'eccedenza idrica calcolata. Tale valutazione (dati medi del periodo 1967-2006) porta a stimare la ricarica in oltre 21 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/anno.

La seconda, basata sulle escursioni dei livelli piezometrici di falda misurati (Marzo 2009-Gennaio 2010), individua una risorsa dinamica che, in virtù di una porosità efficace del 5-10%, può essere valutata in circa 12-24·10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/anno.

Pur con tutti i limiti connessi a tale tipo di valutazione, i risultati ottenuti sono in pieno accordo con le valutazioni medie della ricarica per infiltrazione (21·10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/anno).

Per quanto concerne la riserva idrica, la sua valutazione è dell'ordine di 1-2·10<sup>9</sup> m<sup>3</sup>, vale a dire circa 100 volte superiore alla risorsa dinamica. Questo significa che tale falda, avendo un tasso di rinnovamento molto piccolo, ha riserve talmente importanti da consentire una elevata capacità regolatrice dell'acquifero, sia annuale che pluriennale e consente di programmarne l'utilizzo costante, seppure entro limiti di rinnovabilità.

Infine, se confrontiamo le valutazioni della risorsa rinnovabile con l'attuale domanda d'acqua ad uso idropotabile, si nota che a fronte di una ricarica media pari circa 21 10<sup>6</sup>·m<sup>3</sup>, i consumi ammontano a circa 11,7·10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>: risulta quindi teoricamente possibile un ulteriore uso dell'acquifero.



ACQUA 2011

## Idrogeologia del sistema acquifero multifalda della pianura di Grosseto (Toscana meridionale)

*M. Aldinucci, M. Leonini, M.R. Marchetti, M. Nocchi & M. Salleolini*

*Dipartimento di Scienze della Terra, Università degli Studi di Siena*

Indagini idrogeologiche sono in corso sul sistema acquifero multifalda contenuto nei sedimenti recenti della pianura di Grosseto con il principale obiettivo di conseguire un'adeguata base conoscitiva per la realizzazione di un consistente modello numerico di flusso e trasporto, strumento essenziale per il monitoraggio dei fenomeni di salinizzazione e per la gestione delle locali risorse idriche; vengono presentati i risultati ottenuti nella ricostruzione della configurazione geologica e del comportamento idrodinamico ed idrochimico.

L'interpretazione paleoambientale (ambiente di sedimentazione) delle litostratigrafie disponibili e la loro correlazione su basi stratigrafico-deposizionali ha consentito di pervenire ad un modello geometrico-strutturale del sistema idoneo all'individuazione delle principali unità idrostratigrafiche; esso è caratterizzato dalla suddivisione della successione sedimentaria in due sequenze deposizionali, separate da una *basal unconformity surface* formata durante la fase di stazionamento basso dell'ultima fase glaciale.

Il rilevamento piezometrico individua, nel periodo estivo, un'estesa depressione piezometrica all'incirca coincidente con la media e bassa pianura, anche a seguito di un periodo idrologico caratterizzato da una ricarica meteorica ben superiore alla media. Il movimento generale del flusso idrico avviene sempre verso il settore centrale della pianura; le varie direzioni di flusso si originano nei rilievi circostanti e proseguono poi insieme fino al mare seguendo sostanzialmente l'andamento delle paleovalle dei fiumi Ombrone e Bruna.

Il maggior gradiente idraulico presente alla base dei rilievi è dovuto alla consistente diminuzione di permeabilità nel passaggio tra ammassi litoidi e sedimenti quaternari, a cui devono probabilmente aggiungersi significati-

ve alimentazioni provenienti dalle formazioni carbonatiche nelle zone di Bagno Roselle e Alberese.

L'interpretazione idrogeochimica evidenzia che gli emungimenti primaverili-estivi causano modificazioni sostanziali dei caratteri fisico-chimici dell'acqua di falda che possono sintetizzarsi nell'aumento di salinità nel settore centro-settentrionale della pianura per il maggior richiamo di acque profonde di varia tipologia e nel fenomeno opposto in quello centro-meridionale per il maggior richiamo di acque continentali relativamente dolci; lo sfruttamento del sistema acquifero comporta anche il generale invecchiamento dell'età media dell'acqua estratta.

L'intrusione salina è originata da acqua marina recente nella zona di Castiglione della Pescaia e più a sud-est, favorita dalla sua risalita lungo il Bruna e l'Ombrone, mentre nel settore centrale della pianura è probabile un richiamo di acqua marina vecchia.

Lo studio ha infine consentito la definizione di un modello concettuale preliminare del sistema acquifero che è caratterizzato dalla coesistenza di sistemi di flusso di rango diverso, ognuno governato da specifiche relazioni ricarica/recapito e con la posizione dell'interfaccia acqua dolce/acqua salata in equilibrio dinamico con il carico idraulico della falda, e dal conseguente miscelamento in varie proporzioni di acque dolci e salate sia superficiali (recenti) che profonde (vecchie).

Il programma di ricerca prevede l'implementazione di nuovi dati litostratigrafici e di ulteriori rilevamenti piezometrici, idrometrici, fisico-chimici, ecc.; in particolare, saranno approfondite le conoscenze sugli interscambi idrici fiume-falda (soprattutto quelli relativi all'Ombrone), sul volume complessivo d'acqua estratto e sulle modificazioni fisico-chimiche dell'acqua di falda connesse allo sfruttamento.

## Schema idrogeologico della Conca di Acerno (Salerno)

**Alfonso Corniello<sup>(1)</sup>, Daniela Ducci<sup>(1)</sup>, Gennaro Maria Monti<sup>(2)</sup>**

<sup>(1)</sup>Dipartimento di Ingegneria Idraulica, Geotecnica ed Ambientale - Fac. Ingegneria, Università Federico II di Napoli

<sup>(2)</sup>ISPRA, Roma

### Premessa

L'area di interesse è la Conca di Acerno, una depressione intrappenninica ricadente nella porzione sud-occidentale dei Monti Picentini (SA – Fig. 1). La conca si sviluppa ad una quota altimetrica compresa tra i 700 e i 750 m s.l.m. in direzione NW-SE.

Nel passato la Conca di Acerno era sede di un bacino lacustre poi colmato da depositi fluvio-lacustri a loro volta re-incisi da corsi d'acqua. Ciò ha determinato l'attuale morfologia caratterizzata da superfici terrazzate, su una delle quali sorge l'abitato di Acerno, e da profonde incisioni vallive (del Fiume Tusciano a sud di Acerno e della Valle Isca della Serra che attraversa il paleobacino da nord a sud).



Figura 1

Lungo l'alveo del F. Tusciano e del Torrente Isca della Serra, in un'area limitrofa all'abitato di Acerno, si manifestano due importati fronti sorgivi (portata globale 800 l/s) captati dal Consorzio dell'Ausino.

Nel corso degli ultimi anni diversi studi idrogeologici hanno riguardato la zona (Budetta & de Riso, 1982; Piscopo et alii, 1993, 2001). Tuttavia la possibilità di disporre di tutti i dati pregressi e di quelli derivanti dalle indagini, condotte dal Consorzio alla fine degli anni novanta, per la captazione di importanti venute d'acqua in destra del F. Tusciano ha ravvivato l'interesse per le problematiche idrogeologiche dell'area.

Tutti questi elementi, integrati da nuove indagini piezometriche, idrochimiche ed isotopiche ( $\delta^{18}\text{O}$  e  $\delta^2\text{H}$ ), hanno consentito di meglio definire diversi aspetti connessi all'origine delle sorgenti e costituiscono la premessa per la modellazione, già in corso utilizzando il

codice di calcolo MODFLOW, del locale flusso idrico sotterraneo.

### Assetto idrogeologico

I litotipi più diffusi nell'area di studio, che si inseriscono in un contesto geologico-strutturale assai complesso (Fer-ranti & Pappone, 1992; 1995), sono rappresentati da rocce carbonatiche del Mesozoico. Queste comprendono dolomie di base (nella porzione sud-est dell'area) e termini calcarei affioranti nel settore orientale. Nell'ambito della Conca di Acerno si rinviene, al di sopra di un substrato dolomitico, una sequenza fluvio-lacustre (Pleistocene) comprendente breccie cementate alla base, un livello limoso-sabbioso intermedio (60-80 m) e una parte alta conglomeratica.

L'infiltrazione efficace nell'ambito del bacino idrogeologico trova recapito esterno in diverse, piccole sorgenti distribuite sull'intero territorio; la maggior aliquota della stessa contribuisce però ad alimentare una circolazione profonda attiva nel substrato dolomitico della Conca. Tale falda viene a giorno in corrispondenza dei due fronti sorgivi ricordati, ubicati uno a est di Acerno (gruppo Ausino, Ausinetto e Avella;  $Q_{\text{tot}}$  400 l/s e l'altro a sud dell'abitato (sorg. Olevano e Nuova Olevano).

Il primo gruppo di sorgenti, presente in sinistra del T. Isca della Serra tra le quote 563 e 569 m s.l.m., è dovuto all'affioramento della falda del substrato dolomitico che qui è relativamente poco profondo (circa 50 metri): ciò consente alla falda, mantenuta in pressione dai depositi lacustri della Conca, di aprirsi un varco verso l'esterno.

Sulla sponda destra del F. Tusciano (a circa 552 m s.l.m.) si rinvengono le sorgenti Olevano e Nuova Olevano ( $Q > 400$  l/s) alla base di un costone formato da breccie della parte basale della sequenza fluvio-lacustre. Anche queste ultime sorgenti sono connesse alla falda del substrato dolomitico e sono legate al "drenaggio" di tale falda operato dal livello grossolano della sequenza sedimentaria. Più a sud, linee tettoniche, su cui è impostato il corso del F. Tusciano, realizzano un complesso assetto geologico strutturale che, di fatto, segna il limite idrogeologico della struttura.

L'appartenenza di tutte le sorgenti allo stesso acquifero è peraltro rivelato:

- dai profili idrochimici, pressoché sovrapponibili, delle diverse scaturigini;
- dai dati isotopici del  $\delta^{18}\text{O}$  e del  $\delta\text{D}$ .

## Referenze

Budetta P. & de Riso R. (1982), Studio idrogeologico delle sorgenti della conca di Acerno (Monti Picentini). Memorie e Note dell'Istituto di Geologia Applicata, vol.XVI, pp. 7-27, Napoli.

Ferranti L. & Pappone G. (1992), Nuovi dati sui rapporti tettonici tra i terreni lagonegresi quelli della piattaforma carbonatica Campano-Lucana nei dintorni di Campagna (Salerno – Appennino meridionale). Rend. dell'Accademia Sc. Fis. e Mat., serie IV, **59**, 103-119.

Ferranti L. & Pappone G. (1995), Thrust tectonics in the Picentini mountains, Southern Apennines, Italy. Tectonophysics, **252**, 331 – 348.

Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale Carta Geologica d'Italia alla scala 1:50.000 – Foglio 468 "Eboli" (in stampa).

Piscopo V., Aquino S., Genco S. & Sciumanò E. (2001), Sulla presenza di falde sospese nel rilievo carbonatico del Monte Accellica (Campania). Memorie della Società Geologica Italiana», vol. 56, pp. 235-241, 6 ff., 6 tabb..

Piscopo V., Cavallaro G., Pace G., Vitiello P., & Aquino S. (1993) - Schema idrogeologico dei Monti Accellica e Licinici (Campania) in «Geologia Applicata e Idrogeologia», 28, pp. 611-617, Bari.



ACQUA 2011

## Caratterizzazione e modellazione idrogeochimica della sorgente termale di Monfalcone

*Umberto Aviani, Riccardo Petri*

(1) Dipartimento di Geoscienze, Università di Trieste

Citate già da Plinio il Vecchio, le Terme Romane di Monfalcone rappresentano la più importante manifestazione termale del Friuli Venezia Giulia. Le Terme sono state utilizzate per scopi terapeutici e ricreativi per molti secoli e hanno subito diverse vicissitudini, tra le quali la distruzione degli edifici durante la prima e la seconda guerra mondiale. Attualmente la sorgente è compresa nell'area industriale situata alla periferia della città.

Questo studio vuole caratterizzare le acque da un punto di vista geochimico ed isotopico e cercare di costruire un possibile modello idrogeologico.

L'area si sviluppa nella piattaforma carbonatica cretacea (litologia: calcari a rudiste) che risulta piegata ad anticlinale ed interessata da sovrascorrimenti ad orientazione dinarica SW-vergenti (linea di Panzano), a loro volta dislocati da faglie verticali, come la linea di Sistiana, orientate NE-SW. La sorgente emerge presso il contatto tra la piattaforma carbonatica e il flysch neogenico sovrastante.

La piattaforma carbonatica è sede di un complesso sistema acquifero di tipo carsico, direttamente alimentato dalle precipitazioni e le cui acque hanno chimismo calcio-bicarbonato.

Le acque della sorgente termale sono invece classificate come Na-Cl-SO<sub>4</sub> e rispecchiano la composizione tipica dell'acqua di mare, anche considerando i valori dei rapporti ionici. La temperatura all'emergenza è variabile, limitatamente al periodo di monitoraggio, tra 32.6 e

38.8°C, indicando possibili fenomeni di mescolamento con una dipendenza stagionale. La relazione tra temperatura e conducibilità elettrica è di tipo diretto, suggerendo che il componente freddo non può essere l'attuale acqua di mare ma probabilmente acqua proveniente dall'acquifero carsico superficiale. Il soluto della riserva termale profonda è quindi attribuito principalmente ad un'acqua marina "fossile". Analoghe relazioni dirette si osservano per la concentrazione degli ioni maggiori rispetto alla temperatura, eccettuati il calcio e lo ione bicarbonato che risentono dell'equilibrio con il calcare, di cinetica rapida.

Gli isotopi di ossigeno e idrogeno confermano in parte l'andamento di mescolamento di due componenti, dei quali il più negativo (in termini di  $\delta^{18}O$  e  $\delta D$ ) corrisponde alle tipiche acque carsiche superficiali.

La composizione isotopica dello stronzio indica equilibrio con i carbonati, a conferma delle rapide cinetiche di scambio delle acque in risalita con la matrice calcarea.

La possibile temperatura della riserva è stata stimata tramite un modello che prevede una temperatura costante per la riserva stessa e gli effetti di mescolamento superficiale in proporzione variabile dell'acquifero profondo con acqua carsica, a partire da valori iniziali di temperatura ottenuti tramite bilancio di massa tra i due termini ed usando il codice PHREEQC. La migliore convergenza tra i parametri sperimentali e calcolati si ottiene per una temperatura di circa 65 °C.



## Caratterizzazione idrogeochimica delle acque prossime alla Miniera di Salgemma di Valle Neto (Crotone - Calabria)

**Fabio Ietto. Carmine Apollaro**

*Dipartimento di Scienze della Terra, Università della Calabria, iettofabio@hotmail.com*

La miniera di salgemma di Belvedere Spinello, nella Valle del fiume Neto (Calabria), sfrutta i banchi salini messiniani intercalati nella successione sedimentaria evaporitica estesa dal Tortoniano al Pleistocene e trasgressiva sui complessi cristallini silani dell'Arco Calabro (Ogniben, 1973; Selli, 1962; Roda, 1965a, 1965b).

L'attività estrattiva fu iniziata nel 1969, con il sistema per dissoluzione (sistema Frash) dei banchi produttivi ubicati ad una profondità variabile di 250-300 m. Fino al 1984 fu adottata la tecnologia a "pozzi multipli", sostituita poi dal sistema a "pozzi singoli" fino al 2008, anno di chiusura dell'attività estrattiva. Entrambe le tecnologie, caratterizzate dall'impossibilità di controllare entità e percorsi della fratturazione e dissoluzione, hanno causato cospicue venute di salamoia in superficie, anche in zone lontane dai pozzi d'iniezione, con conseguente inquinamento delle risorse idriche. Altro effetto è stato una diffusa subsidenza del suolo e formazione di diversi "camini di collasso" con sprofondamento rapido dei terreni al tetto e risalita di fluidi fino al piano campagna (Ietto & Federico, 2007).

Alla luce dei dati appena esposti, l'attività di ricerca del presente lavoro ha valutato, a 2 anni dalla cessazione dell'attività estrattiva (2008), le condizioni d'inquinamento delle risorse idriche di Valle Neto. Sono stati quindi censiti: 7 campioni di acque di falda da pozzi ad uso agricolo (profondità media dei prelievi: 30-35m), lungo valle Neto, fino ad una distanza di circa 4 km dal perimetro minerario; 5 campioni di acque superficiali di cui: 2 lungo il fiume Neto (uno a monte della miniera e l'altro a valle della stessa), 2 lungo Fosso Barretta che drena in piena area mineraria e 1 lungo Fosso Malapezza, entrambi affluenti di sinistra del Neto. Inoltre è stato effettuato 1 prelievo da una sorgente, geograficamente e idrologicamente a monte dell'area mineraria, i cui valori geochimici sono stati presi come riferimento. Va evidenziato che nel perimetro minerario e nelle zone limitrofe, non affiora in superficie alcun livello di salgemma che

possa condizionare i valori geochimici delle acque campionate.

L'analisi dei dati geochimici denota come la chimica delle acque sia fortemente influenzata dalla dissoluzione di minerali evaporitici. Infatti quasi tutti i campioni censiti mostrano una composizione clorurato-sodica che deriva dalla dissoluzione di salgemma, mentre la sorgente presa come riferimento ed il campione di acqua superficiale Neto 1 (prelevato a monte dell'area mineraria) hanno una composizione bicarbonato-calcica che deriva dalla dissoluzione delle rocce silicoclastiche affioranti nell'area (Figura 1).

Dal momento che il corpo geologico sedimentario che contiene il giacimento salino sostiene anche i depositi alluvionali di Valle Neto, i travasi idrici tra i due complessi litologici sembrano avvenire lungo le faglie che costituiscono vie preferenziali di circolazione dei fluidi artificialmente immessi, causando così una migrazione sotterranea di salamoia ben oltre il perimetro minerario e all'interno della contigua falda freatica di Valle Neto.

Viene così evidenziato come l'estrazione mineraria di salgemma, possa continuare ad alterare e compromettere la qualità delle risorse idriche anche dopo la sua dismissione e per un'estensione che supera l'area di concessione.

### Bibliografia

Ietto F. & Federico M. (2007) – "The salt mine and resources of the Neto Valley (calabria, Italy): private utilities and environmental damage". *L'Acqua*, 5, pp. 55-64;

Ogniben L. (1973) – "Schema geologico della Calabria in base ai dati odierni". *Geol. Romana* XII.

Selli R. (1962) – "Il Paleogene nel quadro della geologia dell'Italia meridionale". *Mem. Soc. Geol. It.*, Vol.3.

Roda C. (1965) – "Geologia della Tavoletta di Belvedere Spinello". *Boll. Soc. Geol. It.*, 84, Fasc. 2, p.p. 1-131.

Roda C. (1965b) – "Sezione Pliocenica di Barretta (Bacino Crotone)". *Riv. It. Pal. Strat.*, Vol. 71, 2, p.p. 605-660.

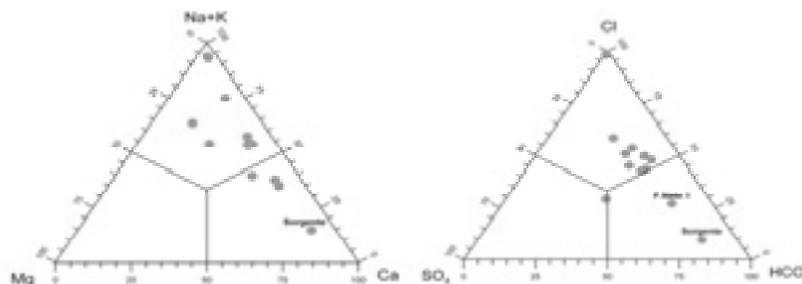


Figura 1 – I digrammi ternari evidenziano come l'anione più abbondante sia lo ione Cl ed il catione più abbondante sia lo ione Na+K, derivanti entrambi dalla dissoluzione di salgemma.



ACQUA 2011

## L'impatto ambientale della zona mineraria di Cave di Predil (Regione FVG): dati geochemici ed isotopici preliminari su alcune acque di drenaggio e superficiali

**Riccardo Petrini<sup>(1)</sup>, Rosa Cidu<sup>(2)</sup>, Francesca F. Slejko<sup>(1)</sup>, Luca Zini<sup>(1)</sup>**

*(1) Dipartimento di Geoscienze, Università di Trieste*

*(2) Dipartimento di Scienze della Terra, Università di Cagliari*

Il giacimento piombo zincifero di Raibl, situato nelle Alpi Giulie Occidentali presso l'abitato di Cave del Predil, rientra nella tipologia dei depositi Pb-Zn delle Alpi Meridionali e Orientali confinati all'interno di rocce carbonatiche Triassiche. Questi giacimenti sono stati classificati come "depositi di bassa temperatura di tipo alpino" (Schroll, 2005), ed appartengono alla più ampia categoria dei depositi tipo "Mississippi Valley" (Anderson and Macqueen, 1982) con i quali condividono molte caratteristiche. Tra queste, la mancanza di associazione diretta con l'attività ignea; la formazione di distretti all'interno di province metallogeniche estese; la bassa temperatura di deposizione della mineralizzazione, pur superiore a quella del gradiente crostale locale; il ruolo dominante di processi idrologici a scala regionale e la natura salina delle soluzioni mineralizzanti.

L'impatto ambientale che caratterizza questi tipi di giacimenti è generalmente considerato minore nel contesto del drenaggio acido di mineralizzazioni a solfuri (AMD), a causa dell'effetto tampone della acidità delle acque dato dalla presenza di carbonati. Questo riduce anche la mobilità in fase acquosa di una serie di elementi potenzialmente tossici (EPT), sia per fenomeni di adsorbimento-co-precipitazione associati a ossidi-idrossidi di Fe, che per la loro ridotta solubilità a pH circa neutro. Tuttavia, i flussi idrologici elevati che caratterizzano queste aree, la mobilità anche in condizioni di neutralità di una serie di EPT, la lisciviazione di sali solubili di neoformazione per reazioni solfuri-carbonati (Hammarstrom et al., 2005) e gli stessi effetti sulla capacità di attenuazione della acidità delle soluzioni da parte dei carbonati per fenomeni di incrostazione da parte di idrossidi di Fe-Al (Cravotta and Trahan, 1999) richiedono una attenta valutazione.

Nel presente studio sono stati analizzati dal punto di vista geochemico e isotopico dello Sr alcuni campioni di acque nella zona di Raibl, raccolti in due distinte campagne nel 2006 e 2010, a seguito dell'allagamento dei livelli più profondi della miniera. I campioni comprendono alcune acque di drenaggio e superficiali sia esterne all'area di esplorazione mineraria che limitrofe alla discarica di sterili e prodotti di laveria. Tutti i campioni rappresentano acque ossigenate, tranne un campione di acqua sulfurea da una emergenza di modesta portata. Nel diagramma di Piper i campioni mostrano una distribuzione lineare che suggerisce processi di mescolamento tra due termini di-

stinti. In particolare, l'andamento mostra la sovrapposizione di termini variamente arricchiti in ione solfato sulla facies dominante Ca-bicarbonatica rappresentata dal Rio del Lago, torrente di fondovalle, campionata a monte della zona di escavazione. L'effetto di arricchimento in solfato è particolarmente evidente per i campioni relativi alla prima campionatura, ed un arricchimento in solfato si nota nello stesso Rio del Lago immediatamente a valle della zona di discarica. Le maggiori concentrazioni di metalli disciolti si riscontrano nei campioni raccolti prima dell'allagamento, e sono associate ad incrementi nella abbondanza dello ione cloruro, confermando l'ipotesi che i metalli fossero preferenzialmente trasportati da fluidi ricchi in Cl<sup>-</sup> (Schroll, 2005).

E' da notare che i rapporti molari Na/Cl deviano da quelli caratteristici di minerali in formazioni evaporitiche verso un impoverimento in ioni Na, attribuibile a processi diagenetici tardivi.

La composizione isotopica dello Sr indica il contributo di una componente di acqua in equilibrio isotopico con Carbonati Triassici, che agisce come diluente per le concentrazioni degli EPT. La presenza di una ulteriore componente radiogenica dello Sr, non originata dalle litologie carbonatiche, e con i maggiori contenuti in K, Na, Li indica inoltre il possibile contributo di fluidi di reazione con fasi silicatiche. I drenaggi sono caratterizzati da concentrazioni di Fe al di sotto di 100  $\mu\text{g/l}$ , per la tendenza alla precipitazione del Fe nelle condizioni di ambiente ossidante e per il pH che caratterizza le acque. Porzioni di carbonato rappresentative delle zone di flusso degli acquiferi mostrano incrostazioni diffuse di idrossidi di Fe, con formazione di patine color ocra (Munsell 5YR3/3), conseguenza del processo di attenuazione della acidità associata al drenaggio ed ossidazione di solfuri per dissoluzione della calcite. Queste incrostazioni a contatto con l'atmosfera nelle zone di discarica generano ruggini.

Il contenuto di EPT eccede in alcuni casi i limiti imposti dal D.Lgs 152/2006, in particolare per il Tl che raggiunge concentrazioni di 30 e 12  $\mu\text{g/l}$  in alcuni campioni di drenaggio raccolti nel 2006 e 2010, rispettivamente. Nello stesso Rio del Lago la concentrazione di Tl aumenta da valori di fondo al di sotto della soglia di rilevanza strumentale a 5  $\mu\text{g/l}$  a valle della zona di discarica a cielo aperto. Il Tl, elemento ad elevata tossicità, è di probabile provenienza dalla ossidazione di blenda, in cui si trova come specie vicariante, o dei suoi solfosali secondari. In

aggiunta, si osservano concentrazioni talvolta elevate di Mo (330-150  $\mu\text{g/l}$  in alcuni prelievi delle due campagne, rispettivamente), ed in alcuni casi Pb.

Questi dati preliminari mettono in evidenza la necessità di un monitoraggio delle acque nell'area, anche per evidenziare eventuali effetti dovuti alla stagionalità, ed uno studio associato di valutazione del potenziale rischio ambientale associato agli OLD (Oxic Limestone Drainage).

#### **Riferimenti**

- Anderson, G.M. and Macqueen, R.W. (1982). *Geoscience Canada* 9, 107-117
- Cravotta, C.A. and Trahan, M.K. (1999). *Applied Geochemistry* 14, 581-606
- Hammarstrom, J.M.; Seal, R.R.; Mejer, A.L. and Kornfeld, J.M. (2005). *Chem. Geol.* 215, 407-431
- Schroll, E. (2005). *Mineral Deposit Research: Meeting the Global Challenge*, Ch 2-26, 175-178



## Hydrodynamic and geochemical evolution of a multiaquifer alluvial system

**Dimitra Rapti-Caputo**

*University of Ferrara, Department of Earth Sciences, via Saragat 1, blocco, B, stanza 314, I-44100 Ferrara, Italy (cpr@unife.it)*

In the present work, the results of the hydrodynamic, hydrochemical and isotopic analyses of the multiaquifer alluvial system existing in the eastern sector of the Po plain are presented allowing to define the evolutionary trend of the aquifer system. In particular, based on the analysis of the water depth, it is possible to measure the influence on the piezometric level of the pumping rate. It is also possible to observe strong fluctuations of the piezometric level in the bore-holes very near to the Po river, due to variation of the hydrometric level and of the pumping rate of the aquifer system. As a matter of fact, during the last years the bore-holes of the investigated area showed a

progressive and continuous increase of the piezometric level likely attributed to the decrease of the exploitation rate of the aquifer. Moreover, the analysis of the hydrochemical and isotopic data permits a) to define the principal geochemical *facies* of the underground water; b) to estimate the residence time of the water in the underground reservoir; c) to identify the occurrence of mixing phenomena between different water types and salinization processes; d) to characterise the natural ionic concentration of the water and e) the occurrence of contamination phenomena.



## Approccio metodologico nell'analisi di fenomeni di contaminazione da Arsenico, Ferro e Manganese nelle falde superficiali: il caso del territorio di Cremona

**Tullia Bonomi, Letizia Fumagalli, Marco Rotiroti**

*Università degli Studi di Milano Bicocca - Dipartimento di Scienze dell'Ambiente e del Territorio, Piazza della Scienza 1, Milano*

Il presente lavoro nasce all'interno di una collaborazione scientifica tra l'Università di Milano-Bicocca e la Provincia di Cremona. Lo studio prevede un'analisi di tipo idrogeologico ed idrochimico del sistema acquifero multistrato presente nel territorio cremonese, in relazione a fenomeni di contaminazione da As, Fe e Mn nelle acque sot-

terranee, in particolare in quelle superficiali.

L'obiettivo è quello di sviluppare un'adeguata metodologia di analisi in grado di identificare il grado di contaminazione presente, definendo gli scenari teorici sulle possibili dinamiche e le ipotesi sulla provenienza potenziale della contaminazione.

Lo studio emerge dalla necessità da parte dell'autorità pubblica di definire e comprendere il fenomeno di contaminazione analizzato, in modo da svolgere una corretta gestione e protezione della risorsa idrica sotterranea.

L'area specifica oggetto di studio è ubicata in prossimità della confluenza tra Adda e Po e comprende un territorio di circa 50 km<sup>2</sup>, esteso principalmente intorno alle zone industriali presenti ad ovest e a sud-est della città di Cremona. In queste aree produttive si concentra l'attenzione dell'autorità pubblica, visti i significativi livelli di contaminazione evidenziati negli ultimi anni (indicativamente dal 2005 ad oggi) nelle falde superficiali, interessata anche a verificare la possibile influenza, diretta e/o indiretta, dei processi antropici presenti nei meccanismi di contaminazione da As, Fe e Mn in atto.

L'intero territorio della provincia di Cremona è stato oggetto di studi idrogeologici ed idrochimici precedenti (Beretta et alii, 1992; Francani et alii, 1994; Zavatti et alii, 1995) che hanno messo in evidenza concentrazioni elevate di Arsenico, Ferro e Manganese generalmente in prossimità di falde profonde (indicativamente maggiori a 50 m di profondità), ipotizzando un'origine di tipo naturale. In particolare per l'elemento As sono state individuate concentrazioni elevate in prossimità del fiume Oglio (anche superiori a 200 µg/l) e in misura minore nel territorio oggetto del presente studio, con falde interessate comprese generalmente tra 50 e 120 m di profondità (Zavatti et alii, 1995).

La metodologia di analisi sviluppata ed applicata nel presente studio prevede la realizzazione delle seguenti fasi d'indagine:

- raccolta dei dati storici e delle informazioni esistenti riguardanti la geologia, l'idrologia, l'idrogeologia, la geochemica e i fenomeni di contaminazione pregressi e/o in atto nell'area di studio;
- individuazione di una rete di monitoraggio piezometrica ed idrochimica al fine di effettuare un campionamento di tipo sito-specifico e realizzazione di una campagna di monitoraggio sulla rete individuata;
- organizzazione ed interpretazione dei dati raccolti tramite banche dati specifiche, in particolare di tipo idrogeologico per pozzi e di tipo chimico, e sistemi informativi territoriali;
- ricostruzione delle caratteristiche idrogeologiche dell'area di studio sulla base dei dati stratigrafici disponibili;
- analisi delle caratteristiche idrauliche delle falde superficiali e profonde in base ai dati disponibili ed analisi della relazione idraulica tra la falda superficiale e quelle profonde, con possibile ricostruzione del deflusso tra i due sistemi.
- analisi spaziale e temporale dei dati chimici, sia di quelli storici disponibili che di quelli derivati dalla campagna sito-specifica, con l'individuazione delle variazioni idrochimiche in funzione dell'evoluzione piezometrica, considerando anche la struttura geologica e tessiturale dell'acquifero.

In base ad una analisi idrogeologica preliminare ed in funzione della pianificazione della campagna di monitoraggio specifica è stata effettuata una suddivisione del sistema idrogeologico considerato in 5 unità: freatico 1 (0-25 m di profondità), freatico 2 (30-50 m), semi-confinato 1 (65-85 m), semi-confinato 2 (100-150 m) e semi-confinato 3 (160-250 m). Questa suddivisione assume un significato esclusivamente a livello locale, in funzione della presenza di consistenti livelli limosi ed argillosi.

La raccolta ed acquisizione dei dati storici si è focalizzata principalmente intorno alle informazioni sugli eventi di inquinamento pregressi nel territorio considerato e sui pozzi pubblici e privati dell'area. Sono stati valutati 35 eventi di inquinamento archiviati nell'Ufficio Bonifiche della Provincia, 23 dei quali hanno coinvolto le acque sotterranee. Per questi siti sono stati individuati 302 piezometri di monitoraggio, rispetto ai quali sono stati raccolti complessivamente 917 rapporti di analisi chimiche, riferiti al periodo temporale 2000-2009.

Sono stati censiti 510 pozzi tra pubblici e privati su un'area di estensione maggiore (circa 500 km<sup>2</sup>), con raccolta delle informazioni strutturali, stratigrafiche, piezometriche e chimiche, dove presenti.

Questi dati storici sono stati organizzati nella banca idrogeologica per pozzi TANGRAM (Bonomi et alii, 1996) e nella banca idrochimica TANGCHIM, collegata a quella idrogeologica, al fine di gestire in un ambiente unico e in maniera strutturata le molteplici informazioni, con la possibilità di effettuare estrazioni specifiche. Il dato chimico storico è stato anche rappresentato con mappe tematiche di sintesi, elaborate attraverso l'uso di Sistemi Informativi Territoriali, che hanno raggruppato in un quadro complessivo le informazioni relative ai singoli siti.

La campagna di monitoraggio, eseguita nel mese di luglio 2010, è stata realizzata per avere un punto di riferimento temporalmente e spazialmente più omogeneo rispetto al dato storico. Sono stati identificati 73 punti d'indagine, tra i pozzi e piezometri censiti, sui quali è stata effettuata una campagna idrochimica ed una piezometrica, accompagnata da misure di quote e coordinate con strumentazione GPS. I punti d'indagine utilizzati sono stati classificati in base alla suddivisione del sistema idrogeologico effettuata, considerando la profondità dei filtri e anche le modalità di completamento dei pozzi, per supportare l'interpretazione del dato chimico rilevato.

Dai risultati della campagna di monitoraggio, ma anche dall'analisi dei dati storici, emergono significative concentrazioni di As, Fe e Mn nelle falde profonde e superficiali, per quest'ultime in particolare in prossimità di un ampio sito contaminato da idrocarburi.

L'elaborazione quantitativa di questi dati, attualmente in atto, e la loro interpretazione comprenderà quindi la verifica di un'ipotesi di correlazione tra elevate concentrazioni di As, Fe e Mn e presenza di idrocarburi in falda, ipotesi verificata in diversi studi internazionali (Berbenni,

2000; He, 2010).

Altra ipotesi da verificare per comprendere le elevate concentrazioni di As, sia in falde superficiali che profonde, è la sua correlazione con la presenza di torba. Ipotesi già presa in considerazione da Zavatti et alii (1995) ed evidenziata da McArthur et alii (2001) che definisce la torba come fattore primario di controllo della concentrazione di Arsenico. Il ruolo della torba è sottolineato anche dal lavoro di Francani et alii (1994), identificato per i meccanismi dell'azoto ammoniacale, ma che può essere anche valutato per le specie ridotte di Ferro e Manganese.

#### **Bibliografia consultata**

Berbenni P., Pollice A., Canziani R., Stabile L. & Nobili F. (2000) – *Removal of iron and manganese from hydrocarbon-contaminated groundwaters*. *Bioresource Technology* 74 (2), 109-114.

Beretta G. P., Francani V. & Fumagalli L. (1992) – *Studio Idrogeologico della Provincia di Cremona*. Pitagora Editrice, Bologna.

Bonomi T., Cavallin A. & De Amicis M. (1995) – *Un database per pozzi: Tangram*. *Quaderni Geologia Applicata*, suppl. n. 3, 461-465.

Francani V., Beretta G. P., Bareggi A., Nobile A., Cremonini Bianchi M. & Cattaneo F. (1994) – *Aspetti idrogeologici del problema della presenza di azoto ammoniacale nelle acque sotterranee della provincia di Cremona*. Pitagora Editrice, Bologna.

He Y. T., Fitzmaurice A. G., Bilgin A., Choi S., O'Day P., Horst J., Harrington J., Reisinger H. J., Burris D. R. & Hering J. G. (2010) – *Geochemical processes controlling arsenic mobility in groundwater: A case study of arsenic mobilization and natural attenuation*. *Applied Geochemistry* 25 (1), 69-80.

McArthur J. M., Ravenscroft P., Safiulla S. and Thirlwall M. F. (2001) – *Arsenic in groundwater: Testing pollution mechanisms for sedimentary aquifers in Bangladesh*. *Water Resources Research* 37 (1), 109-117.

Zavatti A., Atramini D., Bonazzi A., Boraldi V., Malagò R., Martinelli G., Naldi S., Patrizi G., Pezzera G., Vandini W., Venturini L. & Zuppi G. M. (1995) – *La presenza di Arsenico nelle acque sotterranee della Pianura Padana: evidenze ambientali e ipotesi geochimiche*. *Quaderni di geologia Applicata*, suppl. n. 2, 301-325.



## Impatto sulle risorse idriche e terreni dell'utilizzo dei fanghi di depurazione come ammendante in agricoltura

**Dimitra Rapti-Caputo<sup>(1)</sup> e Fabiano Campi<sup>(2)</sup>**

<sup>(1)</sup>Università di Ferrara, Dipartimento di Scienze della Terra, Via Saragat 1, blocco B, stanza 314, 44100 Ferrara, Italy ([cpr@unife.it](mailto:cpr@unife.it))

<sup>(2)</sup>Ter.Am.Ec. S.r.l.

Nella presente ricerca vengono discussi i risultati preliminari relativi al riutilizzo dei fanghi di depurazione in agricoltura come ammendanti per i terreni agricoli in alternativa ai fertilizzanti chimici. L'efficienza del riutilizzo di tali fanghi di depurazione andrebbe valutata in base al rapporto costi/benefici/rischi. Attualmente, purtroppo, l'unico aspetto valutabile è il basso costo della materia prima (fango) rispetto ai fertilizzanti chimici ampiamente utilizzati in agricoltura. Per quanto riguarda gli altri due aspetti relativi ai benefici ed ai rischi è possibile effettuare una stima solo per periodi di tempo prolungati, essendo legati a fenomeni che avvengono molto lentamente, come gli accumuli di elementi e composti nel terreno e negli acquiferi. In un campo sperimentale, localizzato nella provincia di Ferrara, l'analisi integrata di dati pedologici, stratigrafici, idrogeologici e geochimici relativi a fanghi, terreni e risorse idriche sotterranee ha permesso di fare alcune considerazioni per quanto riguarda la tipologia del fango utilizzata e di valutare gli effetti dello spandimento

sugli acquiferi e terreni. In particolare, l'analisi integrata dei dati ha messo in evidenza tre aspetti principali. In primo luogo, la presenza di fanghi 'non stabilizzati chimicamente' potrebbe compromettere il loro uso, nel caso in cui le oscillazioni composizionali nel tempo provocassero il superamento dei limiti ammissibili per legge e, di conseguenza, causassero l'inquinamento del suolo. In secondo luogo, la somministrazione di fanghi di depurazione ha contribuito ad un lieve aumento delle concentrazioni di zinco nei sedimenti del settore sud-orientale dell'area investigata, la quale passa, ad una distanza di 4 mesi, dai 110 mg/kg pre-spargimento ai 180 mg/kg post-spargimento, mentre non si osserva nessuna variazione delle concentrazioni in mercurio, rame e piombo. Infine, nell'acquifero a falda libera si è osservato, subito dopo lo spargimento, un aumento delle concentrazioni in nitrati, solfati, cloruri, cobalto, rame, arsenico e cadmio, che diminuiscono, però, nell'arco di un mese.

# Idrogeologia dell'isola di Ortigia, centro storico di Siracusa

*Aurelio Aureli<sup>1</sup>, Mario Dipasquale<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Già Ordinario di Geologia Applicata, Università di Palermo, Italia

<sup>2</sup>Dip. di Geologia e Geodesia, Università di Palermo, Italia; m.dipasquale@unipa.it

La nota vuole esporre le caratteristiche idrogeologiche di Ortigia, denominazione dell'antico centro urbano di Siracusa, nota, da scrittori e poeti, per la presenza di una delle maggiori sorgenti del Mediterraneo, la Fonte Aretusa.

L'isola geologicamente è un horst di natura calcarea, di età miocenica, interamente circondato, e tamponato, dalle argille azzurre del Pleistocene.

Idrogeologicamente l'acquifero carbonatico si prolunga e sviluppa, anche oltre i limiti della pianura costiera dell'Anapo, sin sotto il mare, a Porto Grande, sempre ricoperto, e isolato, dalle argille azzurre, per poi risalire per movimenti tettonici.

La faglia che borda ad Ovest l'isola permette che i calcari di Ortigia comunichino con i calcari dell'acquifero artesiano, ove avviene la risalita dell'acqua, in pressione, generando la rilevante portata dell'Aretusa, impregnando, anche, tutto il basamento carbonatico dell'isola (Aureli et alii, 1987).

Nell'isola esistono numerosi punti d'acqua che consentono di verificare i livelli attuali della falda tra cui si menzionano (si veda la figura qui a fianco): 1) la Sorgente Aretusa; 2) la Fonte degli Schiavi; 3) le Concerie di età romana; 4) l'antico, e probabile, Mitreo presente nei sotterranei della Chiesa di S. Filippo 5) il "Bagno degli ebrei" realizzato nel medioevo per le abluzioni rituali, e 6) a Sud, all'estremità dell'isola, il "Bagno della Regina", presente presso il Castello Maniace.

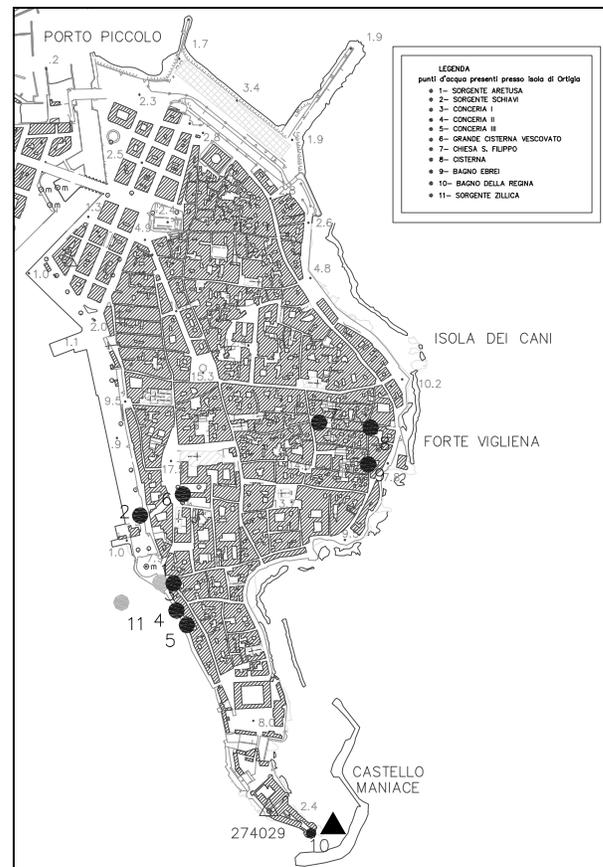
Ulteriori notizie sul livello idrico sono state ricavate da dati delle perforazioni geognostiche disponibili.

La misura dei livelli ha consentito di verificare che lungo la faglia, per il residuo carico che ancora la falda ha nell'acquifero carbonatico, l'acqua dolce risale a quota 0.65 msm, quota di sfioro della Sorgente Aretusa. La piezometrica perde progressivamente di carico idrostatico e, quindi, di quota, riscontrandosi una lieve prevalenza sul livello del mare nei punti sopra descritti e, in corrispondenza del bagno della Regina, si trova poco al di sopra della quota di marea (0,20-0,30 msm).

Il livello piezometrico della falda idrica, presente nel basamento calcareo dell'isola varia, con una certa regolarità, sia in corrispondenza delle fasi lunari che generano le modeste maree locali, e, più segnatamente, per le variazioni legate all'alimentazione e sfruttamento della falda (Aureli A., Dipasquale M., 2008) nei calcari nell'area della pianura dell'Anapo che è la zona che,

idrogeologicamente, si connette con Ortigia e con le acque sotterranee in essa presenti (Aureli et alii, 1987, 1988).

La falda si presenta freatica lungo tutto il perimetro del bacino e diviene artesianiana nella pianura, là ove l'acquifero calcareo è ricoperto dalle argille azzurre pleistoceniche, impermeabili, ove la presenza di modeste strutture tettoniche, "horst", a Cozzo Pantano, porta a luce i calcari di fondo, in mezzo alle argille, permettendo l'affioramento della falda, contenuta nell'acquifero stesso, in corrispondenza delle sorgenti del Ciane (Aureli et alii, 1987, 1988).



Ubicazione punti d'acqua isola di Ortigia: 1 .Aretusa, 2. Fontana degli Schiavi, 3.-4.-5. Concerie, 6. Cisterna vescovato, 7. Mitreo di San Filippo, 8. Cisterna, 9. Bagno degli Ebrei, 10 Bagno della Regina

Gli studi condotti negli anni hanno inoltre permesso

di censire i punti d'acqua presenti e le modifiche delle portate (Aureli et alii, 2005) e del chimismo nel tempo (Aureli et alii, 2010), consentendo di avere una conoscenza dettagliata delle caratteristiche idrogeologiche del quartiere storico di Ortigia, presente nell'isola omonima.

### Bibliografia

Aureli et alii, (1987). Caratteristiche delle linee di flusso dell'intrusione salina influenzate dalla tettonica in area costiera ove gli acquiferi sono sovrasfruttati. Mem. Soc. Geol. Ital. n. 37, Roma 1987. Pubbl. n. 23 del G.N.D.C.I.

Aureli et alii (1988). Carta della Vulnerabilità all'inquinamento degli acquiferi nel settore nord-orientale ibleo (Sicilia Sud-Orientale). 1° Convegno Nazionale sulla protezione e gestione delle acque sotterranee,

Marano sul Panaro (Modena) Settembre, 1990.

Aureli et alii (2003). Submarine springs and salt-water intrusion in fractured environment. Groundwater in Fractured rocks – Prague, Czech Republic.

Aureli et alii (2005) Due dolci ninfe: Ciane e Aretusa Vulnerabili e violate. Atti 4° National Congress on the Protection and Management of Groundwater. Reggio di Colorno (Pr), 21-23 Settembre, 2005.

Aureli A. & Dipasquale M. (2008). Hydrogeological and Hydrochemical Characteristics of the Anapo River Basin (Aretusa-Ciane spring system). 84° Congresso Nazionale della Società Geologica Italiana – 15-17 Settembre 2008 – Sassari.

Aureli et alii (2010). Hydrogeochemical study of water point and springs in Ortigia Islands. Proceedings of the 3° International Symposium Karst Evolution in the South Mediterranean Area.



## Studio e modellazione dell'acquifero carsico della Nurra settentrionale (Sassari, Sardegna)

**Giulio Barbieri, Monica Casu**

Università degli Studi di Cagliari, Dipartimento di Ingegneria del Territorio, Sezione Geologia Applicata e Geofisica applicata, Piazza D'Armi, 09127 Cagliari, tel. +39 070.675 5168, fax +39 070 275281, [barbieri@unica.it](mailto:barbieri@unica.it).

L'obiettivo del lavoro in oggetto consiste nello studio e nella modellazione matematica del sistema idrogeologico relativo all'area industriale di Porto Torres, localizzato nella Nurra settentrionale (SS – Sardegna), finalizzati ad individuare i potenziali percorsi dei contaminanti nel sottosuolo dell'area di studio, a partire dai possibili centri di pericolo.

L'intera area industriale di Porto Torres è stata oggetto di caratterizzazione ambientale a seguito dei fenomeni di contaminazione di origine industriale che hanno interessato il sottosuolo.

La caratterizzazione e la modellazione idrogeologica dell'area risultano estremamente difficoltosa principalmente a causa della complessità del sistema acquifero, costituito da un mezzo carsico in cui, per via della discontinuità, dell'anisotropia e delle relative proprietà idrauliche, la circolazione idrica avviene attraverso cavità carsiche e/o fratture e faglie e in cui anche i meccanismi di ricarica risultano variabili localmente nel bacino e spesso di difficile valutazione.

L'acquisizione dei dati necessari a scala di bacino idrogeologico è iniziata con il reperimento della cartografia topografica (DB10K della Regione Sardegna) e geologica (disponibile dal SITR della Regione Sardegna) e successivamente di ulteriori dati di interesse quali i fattori di caratterizzazione idrogeologica e geomorfologica del mezzo carsico, la cui rappresentazione in ambiente GIS è stata di ausilio alla comprensione della struttura dell'acquifero. I livelli informativi acquisiti sono stati quelli comprendenti sia gli elementi connessi alla morfologia superficiale del bacino

sia gli elementi rappresentativi della circolazione idrica profonda: inghiottitoi e pozzi carsici, affioramenti rocciosi con microforme assorbenti, sorgenti, corsi d'acqua superficiali, faglie e fratture. La gestione integrata di tali elementi georeferenziati e delle informazioni annesse, contenute nelle tabelle associate, ha facilitato la comprensione della circolazione idrica nell'acquifero.

La catalogazione dei dati relativi alle indagini di campo, quali quelli relativi alla litologia e ai livelli piezometrici relative a sondaggi, piezometri e pozzi eseguiti in tempi e per finalità differenti nel bacino idrogeologico in esame, oltre a permettere successive analisi spaziali finalizzate a rappresentare la distribuzione di eventuali parametri di interesse, ha consentito anche di organizzare i dati richiesti in tabelle aventi un formato predefinito di acquisizione per il software GMS.

Tuttavia, la finalità del presente studio è realizzare un modello numerico di flusso dell'acquifero carsico, difficilmente implementabile mediante GMS per via del fatto che il codice idrogeologico supportato è costituito da MODFLOW, largamente utilizzato per la modellazione degli acquiferi porosi, ma di difficile applicazione per la simulazione del comportamento di acquiferi permeabili per fratturazione e/o carsismo. Conseguentemente, l'utilizzo dell'interfaccia GMS è stata finalizzata esclusivamente alla realizzazione di schemi geolitologici del sottosuolo, per via delle potenzialità nella gestione e visualizzazione dei dati stratigrafici del relativo modulo borehole. La modellazione idrogeologica dell'acquifero è stata invece implementata

mediante software agli elementi finiti più specifico per il caso in esame, appropriato per la simulazione del flusso in mezzi dual porosity.

In seguito alla definizione del modello concettuale idrogeologico, sono stati raccolti i dati idrologici necessari per stimare l'infiltrazione efficace nell'area di studio, la cui conoscenza risulta fondamentale per la simulazione del comportamento dell'acquifero. A partire dai dati termo-pluviometrici disponibili dalle stazioni meteorologiche presenti nell'area studio, mediante procedure di interpolazione dei dati in ambiente GIS, si sono ottenuti i raster delle celle che forniscono per ogni relativa cella il valore di interpolazione della grandezza pluviometrica o termometrica per tutto il territorio di studio.

Successivamente, dall'informazione pluviometrica e termometrica in formato raster, è stata successivamente calcolata per ogni cella l'evapotraspirazione reale e quindi la precipitazione efficace. Infine, mediante l'utilizzo dei coefficienti di infiltrazione presunta si può ottenere l'infiltrazione efficace in formato raster.

Il codice matematico utilizzato per la modellizzazione idrogeologica dell'area di studio utilizza il metodo agli elementi finiti, in cui la discretizzazione spaziale della grandezza considerata (il carico idraulico) avviene

mediante la creazione di una griglia composta da elementi triangolari, per ognuno dei quali la grandezza stessa viene stimata e approssimata a seguito di calcoli iterativi. Di conseguenza, per ogni nodo della maglia devono essere definiti tutti i parametri idrogeologici necessari alla stima del carico idraulico.

Nella prima fase di implementazione del modello di flusso è necessario definire la geometria dell'acquifero mediante l'assegnazione ai nodi della maglia della quota topografica del piano campagna e di altre quote relative ad eventuali ulteriori layer. L'assegnazione delle quote ai nodi della maglia può essere effettuata in ambiente GIS a partire dai punti noti del DTM mediante operazioni di interpolazione. Le stesse operazioni di interpolazione permettono di attribuire ai nodi ulteriori parametri richiesti per il calcolo idrologico, come le quote e i livelli dei corsi d'acqua (o di altri elementi che costituiscono le condizioni al contorno del modello idrogeologico), la conducibilità idraulica delle formazioni geologiche e l'infiltrazione efficace precedentemente calcolata.

A seguito dell'implementazione del modello matematico di simulazione di flusso dell'acquifero, è stata svolta un'analisi di sensitività per valutare l'influenza dei parametri idrologici e idrogeologici imputati sui risultati della modellizzazione.



ACQUA 2011

## Numerical model of aquifer of chienti river: an example of groundwater modelling of fractured carbonate systems in orogenic area

*Claudia Tarragoni*

*Università degli Studi di Roma "La Sapienza"*

This work shows the results of a quantitative hydrogeologic study carried out in the north-western area of Sibillini Mounts in Umbro – Marchean Apennines (Marche, Italy), where carbonate aquifers have high quality. The aim is to present an example of the groundwater modelling application in an orogenic area.

The study has allowed the identification of the most relevant aquifers, their hydraulic boundaries and the definition of the geological-structural setting, thus evidencing the close relationship between the lithostructural setting and groundwater circulation.

In particular, the study consists of the following steps:

a) Identification of the main lithostratigraphic and structural aspects of the involved sedimentary sequence. The knowledge of geological and structural setting is essentially to define the geometry of the system.

b) Identification and quantification of springs on the basis of monthly measurements of discharge. The experimental data, obtain through specific hydrogeologic

surveys, allows defining the spring discharge regime.

c) Representation of the Conceptual Hydrogeologic Model (CHM).

d) Groundwater modelling.

The CHM is a schematic territorial representation and represents the starting point for the set up of the groundwater modelling. The aquifer (encompasses about 64.6 km<sup>2</sup>) is hosted by the Calcareous Scaglia Complex (60.3 km<sup>2</sup>) and to a less extent by the Maiolica Complex (4.3 km<sup>2</sup>): the drainance (a contribution about of 50 l/s coming from Calcareous Scaglia Complex) would occur through the "Marne a Fucoidi" Complex because this latter shows serious thinning and are highly fractured.

Groundwater modelling has been performed using NEWSAM finite differences numerical code. Steady-state calibration has been performed trough the matching between the experimental and calculated discharge values. The parameters required to run the model are: boundary hydrodynamic conditions, geometry of the

aquifer, mean transmissivity for each cell, recharge amount (equivalent to the  $I_{\text{eff}}$ ) and altitude of the imposed piezometric limit (altitude of springs).

The values and distribution of the transmissivity have been assigned arbitrarily; following the transmissivity has been repeatedly modified in order to calibrate the numerical model.

The calculated piezometric field of the aquifers always results above the spring altitude and below the aquiclude that limits the aquifer and the hydrographical network without base flow that incises the structure; furthermore the hydraulic gradients must be similar to the gradient values reported in the literature for the Umbro - Marchean hydro-structures of the Apennines (typically between 1‰ and 3‰). These conditions, whit the coherency between the calculated and the measured discharge values, are essential for the reliability of the modelling results.

The numerical modelling, that aims to produce predictions concerning the response of an aquifer to different management and/or climatic changes, has been successfully applied to carbonate aquifers in Central Apennines.

This work represents a new contribute to the application of groundwater modelling in orogenic area.

The aim of this study is to verify the applicability of mathematical modelling in orogenic area and to underline the importance of hydrogeological surveys that allow a 3-D reconstruction of the hydrogeologic setting and the location and regime discharge of linear and punctual springs.

In conclusion the mathematical model has confirmed the validity of the Conceptual Hydrogeologic Model (CHM) hypothesis proposed. The CHM is based on quantitative study that consists in the identification and quantification of springs (on the basis of periodical measurements of discharge) and its supplied area. Both the CHM and the numerical model necessitate an in-depth analysis of the geological, structural and hydrological setting. The 3-D reconstruction of the geological, structural and hydrogeologic setting allows to formulate the most likely hypothesis that constrain the CHM that represents the starting point for the set up of the mathematical modelling.

The coherency between the calculated and the measured discharge values and between the piezometric field and the topography demonstrates that the hydrogeologic parameters distribution assigned is possible and simulates successfully the groundwater circulation.

## **Indice degli autori**

**A**ccaino F. 26, 27  
Affatato A. 26  
Aldinucci M. 57  
Antonelli R. 44  
Apollaro C. 60  
Aravena R. 37  
Aureli A. 49, 65  
Aviani U. 25, 35, 59

**B**anzato F. 12  
Baradello L. 26  
Barazzuoli P. 10, 56  
Barbieri G. 66  
Barison E. 6  
Barrocu G. 15  
Basile R. 36  
Bersan M. 32  
Bertolo B. 16  
Bonadeo L. 51  
Bonari N. 36  
Bonomi T. 9  
Bonomi T. 16  
Bonomi T. 41, 62  
Borsi I. 48  
Brancatelli G. 6  
Brunamonte F. 51

**C**ampi F. 64  
Canepa P. 41  
Capacci F. 10  
Carucci V. 37, 56  
Cassiani G. 24  
Castorina F. 29  
Casu M. 66  
Cavallaio P. 36  
Cavallin A. 16  
Cavazzini G. 31  
Cidu R. 35  
Cidu R. 61  
Cimolino A. 6  
Corniello A. 58  
Corvatta G. 37  
Coviello M. T. 7  
Cucchi F. 17, 28  
Cultrera M. 44

**D**azzan E. 24  
Deiana R. 24  
Del Rosso F. 9  
Della Vedova B. 6, 24  
Di Matteo L. 11  
Dipasquale M. 49, 65  
Doglioni A. 43  
Doveri M. 19

Dragoni W. 11  
Ducci D. 39, 58

**F**abbri P. 53  
Faccini F. 55  
Fanelli M. 37  
Felluga A. 31  
Ferrario F. 51  
Fiorillo F. 14  
Flora O. 17  
Franzinelli A. 8  
Fuganti A. 8  
Fumagalli L. 9  
Fumagalli L. 62

**G**aleandro A. 43  
Galic A. 29  
Gargini A. 45  
Gervasio I. 24  
Giannecchini R. 19  
Giontella C. 11  
Giuliano P. 16  
Giustinian M. 27  
Giustiniani M. 26  
Grillo B. 28  
Guadagno F. M. 14

**I**etto F. 60

**L**eonini M. 57  
Lutman A. 29, 31

**M**arafatto F. 31  
Marchetti M. R. 57  
Marin E. 26  
Martelli G. 5  
Mastrorillo L. 12  
Melillo M. 11  
Menichetti E. 36  
Michelini M. 17  
Michetti A. M. 51  
Migliorini J. 10, 56  
Monti G. M. 58  
Mussi M. 19

**N**anni T. 12  
Nichelini M. 25  
Nicolich R. 6  
Nicotra I. 19  
Nieto Yabar D. 27  
Nocchi M. 47, 57

**O**dorizzi S. 8  
Ortombina M. 53

**P**acioni E. 37  
Palpaceli S. 12  
Peressini E. 5  
Petitta M. 12  
Petitta M. 37  
Petrini R. 18, 25, 29, 31, 35, 61  
Pezzetta E. 29, 31  
Piccinini L. 45  
Picotti S. 26  
Pilla G. 20, 32  
Pistocchi S. 36  
Puccinelli A. 19  
Puma F. 16

**R**ainis M. 5  
Ramberti S. 7  
Rapti-Caputo D. 34, 51, 62, 64  
Rigati R. 10, 56  
Robbiano A. 55  
Rossetto R. 36, 48  
Rotiroti M. 62

**S**abbatini C. 36  
Sacchini A. 55  
Saladini V. 37  
Salleolini M. 47, 57  
Santarato G. 26, 31  
Sappa G. 7  
Sbarbati C. 37  
Schifani C. 48  
Silvestri T. 36  
Simeone V. 43  
Slejko F. F. 25, 31, 61  
Spizzico M. 22  
Stenni G. 17

**T**allini M. 22  
Tarragoni C. 68  
Tersigli S. 7  
Tinivella U. 26, 27  
Torrese P. 32  
Treu F. 17

**V**accaro C. 26  
Valentinuz F. 18  
Vincenzi V. 45  
Vinello G. 35  
Visintin L. 28  
Vittori Antisari L. 35  
Vivalda P. 12

**Z**ini L. 17, 18, 28, 61  
Zuppi G. M. 16

Finito di stampare  
nel Febbraio 2011  
presso Media Print, Livorno



## Note per gli autori

**Lingua.** Le lingue della rivista sono l'Italiano e l'Inglese, ma sono benvenuti anche lavori nelle altre lingue più diffuse della Unione Europea (Francese, Spagnolo, Tedesco). Tutti gli articoli devono essere preceduti da un riassunto in Inglese (Abstract), a sua volta preceduto dal titolo dell'articolo tradotto in Inglese. Le didascalie delle Figure e delle Tabelle, nella lingua originale dell'articolo, devono avere anche la traduzione in Inglese. Dopo l'Abstract in Inglese, ogni articolo in lingua diversa dall'Inglese inizierà con un riassunto nella lingua dell'articolo.

**Invio del manoscritto.** Ogni manoscritto proposto per la stampa dovrà essere inviato al seguente indirizzo di posta elettronica: [giornale@geoitalia.org](mailto:giornale@geoitalia.org). I manoscritti saranno revisionati da almeno due revisori. Gli autori sono invitati a segnalare i nomi di studiosi che potrebbero revisionare il manoscritto, senza che questo costituisca un impegno per la rivista. La politica della rivista per la revisione dei manoscritti prevede che il nome dei revisori non sia segreto, salvo il caso di specifica richiesta da parte dei revisori stessi. L'invio di un manoscritto alla rivista significa che lo stesso rappresenta un'opera di ingegno originale degli autori, che il manoscritto non è stato pubblicato in precedenza e che non è stato inviato contemporaneamente ad altre riviste.

**Preparazione del manoscritto.** Il manoscritto deve essere preparato con un word processor, con interlinea doppia, in una sola colonna e con ampi margini. L'Abstract in Inglese non deve superare le 150 parole, deve essere formato da un unico paragrafo, non deve contenere citazioni bibliografiche e neppure riferimenti al testo. L'Abstract deve essere considerato come un testo autosufficiente, che può essere diffuso anche separatamente dall'articolo. Il riassunto nella lingua originale dell'articolo può essere più lungo, senza tuttavia superare le 500 parole.

Gli autori sono invitati ad utilizzare la terminologia della IUGS e le unità di misura S.I.

La prima pagina dovrà contenere il titolo dell'articolo il nome (per esteso) ed il cognome degli autori, il nome dell'Istituzione di appartenenza e l'indirizzo e-mail di ogni autore, l'Abstract in Inglese. Dovrà essere inoltre indicato a quale degli autori deve essere inviata la corrispondenza relativa all'articolo (autore corrispondente) e, per quest'ultimo dovrà essere indicato anche l'indirizzo postale e il numero del Fax. Dalla seconda pagina in poi troverà posto il riassunto nella lingua dell'articolo ed il testo dell'articolo. Non utilizzare per il titolo del lavoro il carattere tutto maiuscolo.

Le didascalie delle Figure e delle Tabelle e la Bibliografia dovranno trovare posto in pagine separate da quelle del testo.

**Citazioni bibliografiche.** Nel testo, le citazioni bibliografiche possono avere due forme: (a) tra parentesi rotonda il cognome (o i cognomi) dell'autore, seguito da una virgola e dall'anno di pubblicazione dell'articolo, (b) il cognome dell'autore (o degli autori) seguito dall'anno di pubblicazione tra parentesi rotonda. Non utilizzare per le citazioni nel testo il maiuscoletto o il carattere tutto maiuscolo. L'espressione *et alii* è preferita a quella *et al.* Tutte le citazioni nel testo devono trovare corrispondenza nella Bibliografia e viceversa.

**Tabelle.** Le Tabelle devono essere compilate in fogli separati e devono essere numerate secondo la loro successione nel testo. Le Tabelle potranno essere accompagnate da una didascalia esplicativa del contenuto. Nel testo si dovranno trovare riferimenti a tutte le Tabelle, nella forma: Tabella 1, Tabella 2 ecc.

**Figure.** Tutte le Figure devono essere numerate secondo la loro posizione nel testo, nel quale si devono trovare riferimenti a tutte le Figure, nella forma: Figura 1, Figura 2 ecc.

Le scritte presenti nei disegni devono avere dimensioni adeguate, e comunque devono essere leggibili anche dopo l'eventuale riduzione della dimensione del disegno. Nel preparare i disegni sarà necessario tenere conto del formato della pagina di stampa.

Le fotografie devono essere di buona qualità, in modo da essere leggibili anche nella stampa.

Gli autori che rivogliono indietro gli originali delle Figure devono comunicarlo al momento dell'invio del lavoro o, al più tardi, quando restituiscono le bozze.

**Bibliografia.** I riferimenti bibliografici devono essere riportati in ordine alfabetico, utilizzando il carattere normale, cioè senza maiuscoletto, tutto maiuscolo, corsivo o grassetto. La forma deve essere la seguente: "Cognome, N., 2005. Titolo dell'articolo per esteso. Nome della rivista 24 (2), 234-251". Gli ultimi numeri rappresentano: il numero del volume, (il numero del fascicolo, se è necessario), le pagine iniziale e finale dell'articolo.

**Testo finale per la stampa.** Completato il processo di revisione, gli autori dovranno redigere il testo finale per la stampa in forma elettronica e con le seguenti modalità. Il manoscritto dovrà essere suddiviso in differenti files, contenenti rispettivamente: (a) Titolo, Autori, Titolo in Inglese ed Abstract; (b) Riassunto e Testo; (c) Didascalie delle Figure e delle Tabelle; (d) Bibliografia; (e) Tabelle; (f) Figure (eventualmente). Ogni file deve avere un nome che permetta di riconoscere facilmente il contenuto del file.

Il testo deve essere in una sola colonna, con interlinea singola, non giustificato a destra, senza spaziatura alla fine dei paragrafi e con il minimo di formattazione automatica.

**Bozze.** Sarà predisposta una sola serie di bozze, che saranno inviate all'autore corrispondente per essere controllate prima della stampa. E' necessario che gli autori non facciano sulle bozze correzioni che consistono in una modifica del testo accettato per la stampa.

**Estratti.** Di ogni articolo saranno predisposti 25 estratti gratuiti. Ulteriori copie degli estratti devono essere ordinate, a pagamento, in occasione della restituzione delle bozze.

**Contributo per la stampa.** L'Aiga richiede agli autori un contributo per la stampa pari a 18 Euro per ogni facciata del lavoro.

