

Acquifero vulcanico vulsino in Umbria: studio idrogeologico per la caratterizzazione della presenza di arsenico ed alluminio ed il corretto utilizzo delle acque sotterranee

Vulsino volcanic aquifer in Umbria Region : Hydrogeological survey for the characterization of the presence of arsenic and aluminium and the correct use of groundwater

Stefano Fratini, Fabrizio Maria Francesconi, Roberto Checcucci, Francesco Frondini, Daniela Lanzi e Roberto Spinsanti

Riassunto: Nel dicembre 2009, e nei successivi mesi del 2010 si è determinata una pesante crisi idrica a seguito dell'improvvisa contaminazione da alluminio delle acque sotterranee captate dall'acquifero vulcanico Vulsino per gli acquedotti a servizio di Orvieto e di altri comuni limitrofi (circa 20000 persone); la contaminazione ha raggiunto concentrazioni anche oltre i 3000 µg/l. La crisi idrica si acuisce per la scadenza, peraltro attesa, della deroga concessa dalla Commissione Europea riguardo i valori di As, che consentiva di distribuire acqua con valori superiori a 10 µg/l (fino a 50 µg/l).

Parole chiave: acquifero vulcanico, alluminio, falda sospesa, modellazione numerica, acquitardo, contaminazione

Keywords: *volcanic aquifer, aluminium, perched aquifers, numerical modeling, aquitard, contamination*

Stefano FRATINI ✉
Fabrizio MARIA FRANCESCONI
Daniela LANZI
Studio Associato GEOTECNA
Viale Venere, 57
05018 Orvieto (TR) - Italy
geotecna.studioassociato@virgilio.it

ROBERTO CHECCUCCI
Regione Umbria – Servizio Risorse Idriche e Rischio Idraulico
Piazza Partigiani
06123 Perugia - Italy
rcheccucci@regione.umbria.it

FRANCESCO FRONDINI
Dipartimento di Scienze della Terra
Settore Geochimica e Vulcanologia
Piazza dell'Università, 1
06123 Perugia- Italy
frondini@unipg.it

ROBERTO SPINSANTI
Direttore ATI 4
Viale Bramante, 43
05100 Terni- Italy
direttore@ati4umbria.it

Ricevuto: 01 agosto 2013 / Accettato: 30 dicembre 2013
Pubblicato online: 21 febbraio 2014

© Associazione Acque Sotterranee 2013

La contaminazione da Al si è manifestata a seguito di piogge intense e persistenti che hanno comportato la mobilizzazione di ingenti quantità di alluminio, in particelle colloidali.

Le indagini di campo hanno appurato che la contaminazione non ha interessato allo stesso modo tutti i punti di approvvigionamento idropotabile, ad indicare che non tutto il serbatoio acquifero è stato condizionato dalla presenza di Al; inoltre, nello stesso periodo in cui si è manifestata la contaminazione da Al, non si sono determinate variazioni del tenore di As.

L'articolo presenta gli studi del complesso sistema idrogeologico Vulsino e prospetta soluzioni tecniche atte ad individuare le migliori condizioni per la realizzazione di nuove captazioni che consentano di gestire la risorsa utilizzata a scopo idropotabile, in termini quali-quantitativi, sostituendo/integrando le attuali dotazioni, vulnerate dalla presenza di Al e, secondariamente, da As. A supporto dello studio idrogeologico è stato implementato un modello numerico di flusso e di trasporto che ha permesso di formulare delle attendibili previsioni riguardo ai rischi di contaminazione da Al dei nuovi pozzi.

Abstract: *In December 2009 and the first months of 2010, a large water crisis took place in the Orvieto area, because of sudden high concentration of aluminum (Al) in the groundwater of the vulsino aquifer. This represents a supply for Orvieto's population and other near municipalities (about 20,000 people). The contamination had reached values of about 3000 µg/l.*

Water crisis was made worse because of the expiring, in the same period, as expected, of the derogation of European Commission that allowed Arsenic concentrations above 10 µg/l (up to 50 µg/l).

The contamination by Al occurred after intense and persistent rains, that mobilized a large amount of aluminum hydroxides in perched water table, in the form of colloidal particles.

The field analysis showed that the potable water catchments are not interested in the same way by the contamination, i.e. the vulsino aquifer was not wholly conditioned by the presence of Al; in addition, in the same period in which the Al contamination occurred, there were no changes in the levels of As in groundwater.

This paper shows the study of the complex hydrogeological Vulsino system; the aim is to identify technical solutions for realizing new catchments in order to manage the resource, in qualitative and quantitative terms, replacing/integrating the current equipments, which represent a risk because of the presence of Al and, secondly, As.

A numerical flow and transport model was implemented to support the hydrogeological study, that has allowed us to formulate reliable predictions regarding the risk of Al contamination of future new wells.

Introduzione

L'alluminio è uno degli elementi con maggiore concentrazione nelle rocce ignee, tuttavia la dissoluzione di tali rocce non è in grado di fornire direttamente grossi quantitativi di tale elemento alle acque sotterranee, dato che l'alluminio si concentra nei minerali secondari che si formano dalla loro alterazione (Caolinite e Gibbsite in condizioni di weathering spinto).

La concentrazione di alluminio nelle soluzioni acquose naturali è generalmente bassa dato che l'elemento tende a formare strutture stabili con gli idrossidi che precipitano poi dalla soluzione; per $6 < \text{pH} < 8$ l'alluminio è praticamente insolubile in acqua e la sua mobilità è legata esclusivamente al trasporto in sospensione in forma di particelle colloidali.

Per quanto riguarda casi di contaminazione da alluminio delle acque sotterranee, oltre all'inquinamento (localizzato e diffuso) legato a cause antropiche e industriali, si hanno casi di contaminazione dovuti a cause "geologiche". Si tratta in genere di mobilitazione di idrossidi di alluminio, come Gibbsite $\text{Al}(\text{OH})_3$, Bayerite $\text{Al}(\text{OH})_3$, Nordstrandite $\text{Al}(\text{OH})_3$, Boehmite $\text{AlO}(\text{OH})$, in aree minerarie e in zone di affioramento di suoli bauxitici-lateritici (Maryam K. et al., 2011).

Altri casi di inquinamento sono legati alle piogge acide, specialmente in zone di affioramento di rocce granitiche; in questi contesti la sorgente primaria di alluminio è rappresentata proprio dai minerali silicici che costituiscono le rocce dell'acquifero (Feldspati, Plagioclasti, Miche) e che vengono alterati dalle acque acide ($\text{pH}=4$) circolanti.

In zone non interessate da contesti industriali o minerari sono segnalati casi di inquinamento localizzato ma non sono note problematiche di inquinamento diffuso su vasta scala.

In Italia sono segnalati casi d'inquinamento da alluminio in zone industriali o in siti minerari dismessi, accompagnati da elevate concentrazioni di molti altri ioni metallici, generalmente legati ad acque acide (es. drenaggi acidi da miniera).

L'acidificazione dei suoli dovuta all'uso di fertilizzanti acidi o alla precipitazione di piogge acide sono tra le principali cause della mobilitazione dell'alluminio nell'ambiente (Heming C., Johnston L.M., Doug C., Inch K., 2011).

Nel caso degli acquiferi vulcanici dell'Italia centrale, oltre

agli episodi in questione, non sono segnalati casi di contaminazione da alluminio diffusa su vasta scala di acque sotterranee captate ad uso idropotabile.

La specificità del fenomeno emerge anche dal fatto che lo stato ambientale dei corpi idrici sotterranei dell'acquifero vulcanico, formulato nel Piano Tutela Acque Umbria (D.C.R. n. 357/2009), è definito particolare per anomali arricchimenti in Fe, As e F.

Lineamenti geologici ed idrogeologici

L'acquifero vulcanico Vulsino occupa la parte sud-occidentale della Regione Umbria, e si estende su un territorio di circa 120 km^2 , Fig. 1.

Il serbatoio acquifero, chiuso alla base da un consistente spessore di sedimenti argillosi e flyschoidi caratterizzati da una permeabilità relativa molto bassa, è costituito da più orizzonti sovrapposti, piroclastici e lavici, dotati di permeabilità per porosità e fessurazione, ed è sede di una circolazione idrica di base, che rappresenta il principale corpo idrico sfruttato per scopi idropotabili.

Nell'ambito della sequenza vulcanica, si ritrovano livelli discontinui, a bassa permeabilità (acquitardi) che, su base locale, possono costituire il letto di falde sospese, non utilizzate a scopo idropotabile, o possono sezionare la continuità verticale della falda di base.

Le vulcaniti presentano spessori che variano da qualche decina di metri, alle centinaia di metri, nelle aree interne; la sequenza vede, alla base, la prevalenza dei depositi piroclastici di caduta, mentre nella parte alta risultano prevalenti le colate laviche, seppur contraddistinte da una ridotta continuità laterale.

Materiali e metodi

Lo studio ha comportato l'aggiornamento del quadro geologico-idrogeologico, attraverso l'esecuzione di rilevamenti e di una nuova campagna di misure piezometriche, che ha riguardato sia i pozzi pubblici che privati.

In totale sono stati censiti n° 71 pozzi e n° 46 sorgenti puntuali e sono stati prelevati n° 204 campioni, da n° 63 punti d'acqua (pozzi e sorgenti).

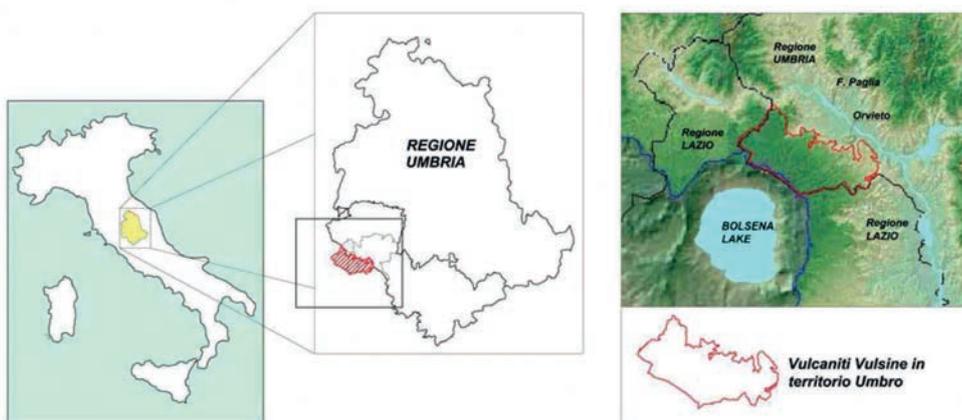


Fig. 1 - Inquadramento territoriale.

Fig. 1 - Outline of the Area.

I campionamenti sono stati condotti in attuazione di uno specifico protocollo stilato con Arpa Umbria, che prevedeva:

- campioni per verifica al D.Lgs 31/2001;
- campioni divisi in diverse aliquote microfiltrate (MF) in campagna, con filtri monouso da 0,45 µm, per la determinazione degli anioni e, previa stabilizzazione con HNO₃, per la determinazione dei metalli alcalini e ione ammonio; inoltre è stata prelevata una ulteriore aliquota MF, ed una senza preventiva microfiltrazione (TQ), stabilizzate con HNO₃, per la determinazione dei metalli e valutarne le differenze. Infine un campione MF per la determinazione del Li e Rb.

Le analisi sono state effettuate presso i laboratori di Arpa Umbria e le determinazioni di Li e Rb nel laboratorio di geochimica dei fluidi del Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Perugia.

Inoltre sono stati prelevati n° 20 campioni per le analisi Isotopiche Deuterio (δ²H) e δ¹⁸O e n° 5 per la determinazione del Tritio (δ³H); le analisi degli isotopi stabili sono state effettuate presso il laboratorio dell'Osservatorio Vesuviano-INGV di Napoli, la determinazione dell'attività del tritio è stata effettuata nei laboratori di Pisa del CNR-IGG.

Sono state eseguite prove di emungimento a gradini di portata e di lunga durata, con registrazione della risalita, su pozzi esistenti realizzati dalla Regione Umbria, denominati P65 e P126, attrezzati con piezometro; nel corso delle prove è stato operato il monitoraggio in continuo dei parametri: pH, Eh, CE, Temperatura e Torbidità mediante sonde multiparametriche e sono stati prelevati campioni d'acqua; al termine si è proceduto alla esecuzione di campionamenti con la pompa posta a diverse profondità (log idrochimico). Inoltre sono stati rielaborati i dati di una pregressa prova sul pozzo regionale P64, il cui piezometro fa parte della rete di monitoraggio in continuo di Arpa Umbria.

Nell'ambito del dominio delle vulcaniti è stata selezionata un'area, di circa 50 km², prossima alle sorgenti di Sugano ed alle reti acquedottistiche esistenti, che è stata oggetto di studi di maggiore dettaglio e della implementazione del modello numerico, tramite il software integrato VISUAL MODFLOW Premium, che permette l'utilizzo del codice sorgente MODFLOW (Mc Donald et al., 2000; Harbaugh et al., 2000; U.S. Geological Survey), che ha consentito di elaborare previsioni sulla risposta dell'acquifero ai nuovi scenari di tipo gestionale; inoltre, tramite il codice MT3DMS (Zheng, Chunmiao, and P. Patrick Wang, 1999), sono state valutate le interferenze, sui nuovi pozzi, derivanti dal richiamo di acqua da settori dell'acquifero maggiormente contaminate da Al.

Risultati

Carta Idrogeologica

I risultati dei rilevamenti e della campagna piezometrica del Settembre 2011, hanno permesso la elaborazione della Carta Idrogeologica, Fig. 2, dove si riporta la distribuzione dei complessi idrogeologici e l'andamento della superficie piezometrica riferibile alla falda di base ed alle falde sospese; per alcuni punti d'acqua ritenuti caratterizzanti si indica la con-

centrazione di picco di Al registrata durante la crisi idrica.

Le principali sorgenti della falda di base sono quelle di Sugano 1(S16) e Sugano 2 (S15), che erogano una portata complessiva Q~140 l/s, captata per l'acquedotto di Orvieto, la sorgente di Tione Q~54 l/s (S17), commercializzata come acqua minerale in bottiglia e la sorgente di Capita Q~10 l/s (S29). La principale sorgente della falda sospesa è la 6S, il cui regime di portata risulta molto variabile, in stretta relazione con gli afflussi efficaci.

La sezione idrogeologica consente di apprezzare la distribuzione in verticale dei complessi idrogeologici e la posizione della falda di base e della falda sospesa.

Prove di emungimento

I test di emungimento di lunga durata hanno permesso di identificare, mediante i diagrammi diagnostici (Emsellem Y., 1965, Civita M., 2005), la tipologia idrodinamica dell'acquifero di base che risulta identificabile con un sistema di tipo semiconfinato (Kruseman G.P., De Ridder N.A.,1979).

In Tab.1 si riportano i valori dei parametri idrodinamici ricavati dalla elaborazione delle prove di emungimento e quelli ottenuti con test speditivi su pozzi privati, elaborati tramite la relazione $T = 2.3023 \times Q/s$ (Celico P., 1986).

Tramite la metodologia di Hantush M.S., 1960, sono state definite le caratteristiche dell'acquifero: si tratta di un orizzonte di lave compatte dello spessore compreso fra 20 e 30 m, con permeabilità variabile fra 3.9×10^{-7} m/s (P126) e 8.16×10^{-8} m/s (P64). Detto acquifero, nella parte centro-meridionale dell'area di studio, seziona la falda di base in una circolazione superiore, freatica, ed una profonda, semiconfinata; nella restante parte il comportamento è di tipo freatico.

Il coefficiente di immagazzinamento S, per l'intervallo temporale relativo all'effettuazione della prova di lunga durata, è risultato essere variabile fra:

$$9.2 \times 10^{-5} \text{ (P65)} ; 8.1 \times 10^{-4} \text{ (P64)} \text{ e } 1 \times 10^{-3} \text{ (P126)}$$

E' stato calcolato il coefficiente di immagazzinamento per tempi lunghi di pompaggio, utilizzando i dati del piezometro del pozzo P64, in condizione di assenza della ricarica, applicando l'espressione di approssimazione logaritmica di Cooper-Jacob, 1946:

$$\log S = \log \frac{2.25 T t}{x^2} - \left(\frac{\Delta H_p T}{0.183 Q} \right) = -0.72$$

dove:

x=14.7 m = distanza del piezometro;

Q=18 l/s = portata media;

T=760 m²/g = trasmissività;

t=72 gg = tempo di pompaggio;

ΔHp=1.30 m = depressione piezometrica.

E quindi il coefficiente di immagazzinamento risulta:

$$S = 0.19 = 19\%$$

Per tempi lunghi di emungimento, e per consistenti volumi di prelievo, la risposta del sistema acquifero è dovuta, per lo più, ai settori caratterizzati da un deflusso idrico di tipo freatico.

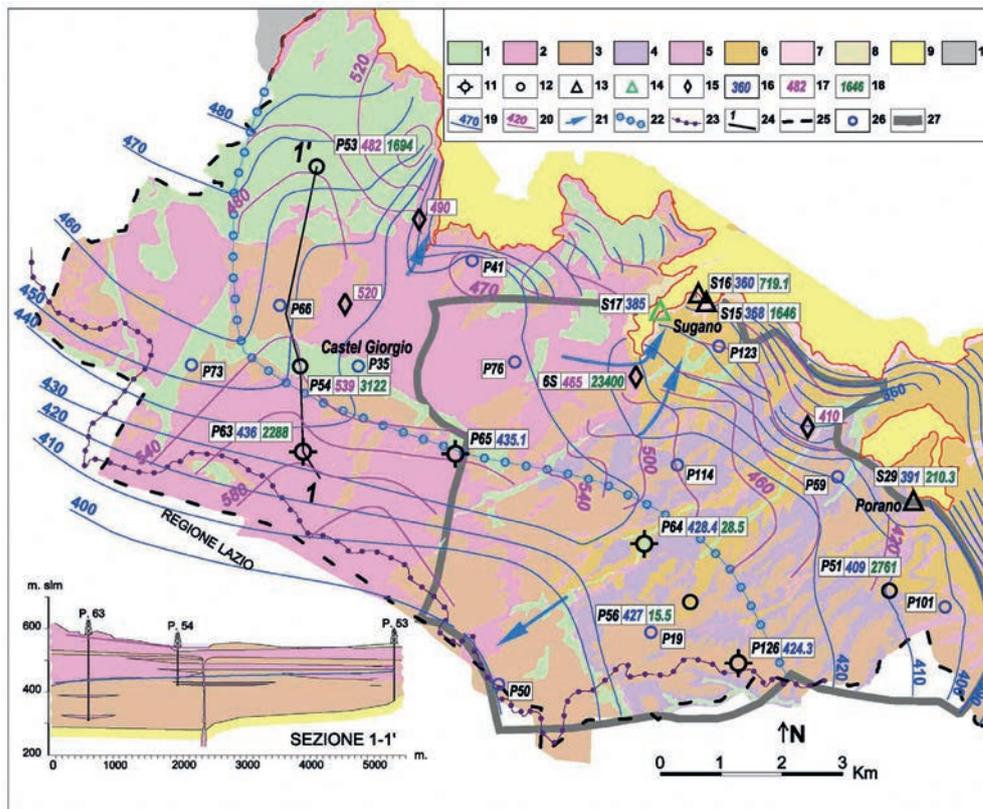


Fig. 2 - Carta Idrogeologica

LEGENDA: 1- Complesso coltri eluviali; 2- Complesso lavico superiore; 3- Complesso piroclastico superiore; 4- Complesso ignimbrico; 5- Complesso lavico intermedio; 6- Complesso piroclastico intermedio; 7- Complesso lavico inferiore; 8- Complesso piroclastico inferiore; 9- Complesso argilloso; 10- Complesso flyschoid; 11- Pozzi Regione Umbria; 12- Pozzi comunali; 13- Sorgenti Sugano e Capita; 14- Sorgente Tione; 15- Sorgenti falda sospesa; 16- Quota piezometrica falda di base in m slm; 17- Quota piezometrica falda sospesa, m slm; 18- Concentrazioni di alluminio $\mu\text{g/l}$; 19- Isopieze della falda di base, m slm; 20- Isopieze falda sospesa, m slm; 21- Assi di drenaggio principali della falda di base; 22- Spartiacquie idrodinamico principale; 23- Spartiacquie idrografico; 24- Sezione idrogeologica; 25- Confine regionale; 26- Pozzi per test speditivi; 27- Area di studio di dettaglio.

Fig. 2 - Hydrogeological map

LEGENDA: 1- Eluvial deposits complex; 2- Upper Lava Complex; 3- Upper Pyroclastic Complex; 4- Ignimbrite Complex; 5- Intermediate Lava Complex; 6- Intermediate Pyroclastic Complex; 7- Lower Lava Complex; 8- Lower Pyroclastic Complex; 9- Clayey Complex; 10- Flyschoid Complex; 11- Wells by Umbria Region; 12 - Municipal wells; 13 - Sugano and Capita springs; 14 - Tione spring; 15- Springs to the perched water table; 16- Potential head of the basic aquifer, m. asl; 17- Potential head of the perched aquifer, m. asl; 18- Concentration of Aluminium in $\mu\text{g/l}$ units; 19- Equal piezometric lines of the basic aquifer (m asl); 20- Equipotential bead lines related to the perched circuits, m. asl; 21- Main Basic aquifer lines of drainage; 22- Main Ground-water watersbeds; 23- Hydrographic watershed; 24- Hydrogeological cross Section; 25- Regional border; 26 Expeditions test well; 27 Area of detailed study.

Dello stesso ordine di grandezza è la porosità efficace delle piroclastiti saturate in cui si imposta falda di base, stimata attraverso lo sviluppo della seguente formula (Archie G.E., 1942).

$$\rho = \rho_{\alpha} \Phi^m S^n$$

dove:

Φ = porosità totale;

m e n = m varia da 1.3 a 2.5 (per le rocce più cementate) ed n è circa 2;

ρ_{α} = $1 / 250 \mu\text{S}/\text{cm}^2 \times 10.000$ conducibilità media;

s = 100% grado di imbibizione;

ρ = 250-500 Ω m resistività delle piroclastici.

Da cui si ricava:

$$\Phi = \sqrt{\left(\frac{1}{250} \times 10.000 \right) \div 500} = 28\%$$

$$\Phi = \sqrt{\left(\frac{1}{250} \times 10.000 \right) \div 250} = 40\%$$

riferibile a sabbie e limi; tenuto conto della riduzione di volume conseguente alla profondità (circa 10%), si possono assumere valori di porosità efficace compresi fra 10% e 15% (Celico P., 1986).

Dati chimici

L'alluminio e l'arsenico costituiscono gli elementi che condizionano maggiormente, ed in modo diffuso, la qualità chimica delle acque, per frequenti superamenti dei limiti indicati dal D.Lgs 31/2001.

Elevato tenore di Al condiziona le caratteristiche di qualità delle falde sospese; significative concentrazioni sono state rinvenute anche in alcuni campioni TQ della falda di base; l'As si rileva prevalentemente nelle acque della falda di base, e non vi sono differenze tra campioni MF e TQ.

La concentrazione di Li e Rb, ed il loro rapporto molare (Li/Rb), mostrano forti variazioni tra i campioni sicuramente attribuibili alle falde sospese (Li/Rb~1) ed i campioni della

Tab. 1 - Parametri idrodinamici ricavati dai test di emungimento di lunga durata (P126, P65 e P64) e dai test speditivi

Tab. 1- Hydrodynamic parameters derived from long duration aquifer tests (P126, P65 e P64) and expeditious test wells.

Identificativo	Trammissività (prova in discesa)		Permeabilità	Trammissività (prova in risalita)		Permeabilità
	m ² /g	m ² /s	m/s	m ² /g	m ² /s	m/s
P_126	1529	1,50E-2	1,90E-4	1900	2,20E-2	2,70E-4
P 65	1555	1,80E-2	1,30E-4	1468	1,70E-2	1,10E-4
P 64	760	8.8E-03	1,10E-4			
P_19	112	1,30E-3	3,3E-5			
P_35	963	1,1E-2	5,1E-4			
P_41	9	1,1E-4	3,0E-6			
P_50	137	1,6E-3	5,9E-5			
P_59	230	2.7E-03	8,8E-5			
P_66	6465	7,2E-2	2,4E-3			
P_73	220	2,5E-3	8,2E-5			
P_76	6216	7,2E-2	3,5E-3			
P_101	8	9,8E-5	6,5E-6			
P_114	6631	7,7E-2	6,4E-3			
P_123	211	2,4E-3	6,6E-5			

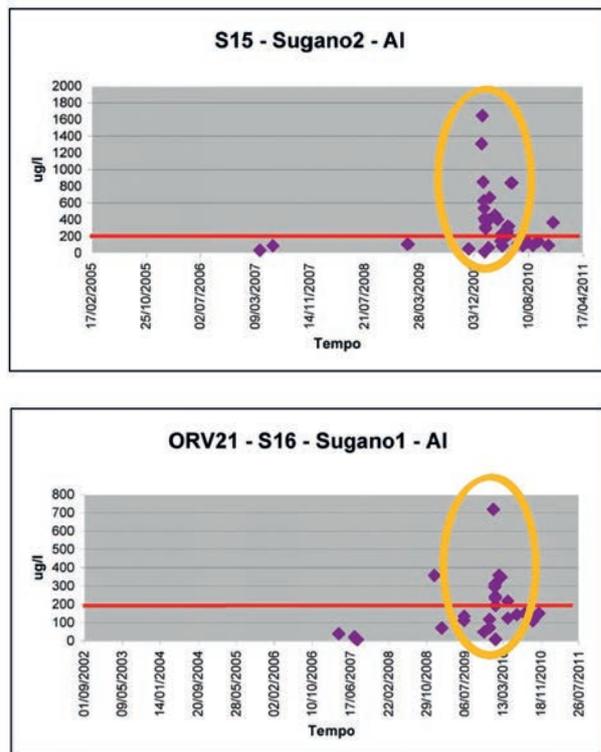


Fig. 3 - Concentrazione di Al nelle sorgenti di Sugano.

Fig. 3- Aluminium concentration in Sugano springs.

falda di base, sia semiconfinata che freatica (Li/Rb~9). Queste differenze sono dovute alla maggiore concentrazione di Li nei sedimenti argillosi che costituiscono il substrato, pertanto la falda di base, che interagisce con il substrato, presenta una concentrazione di Li mediamente superiore, di circa un ordine di grandezza, rispetto alle falde sospese; il contenuto medio in Rb è costante nei due sistemi.

Il pH presenta un valore medio di 7.35, minimo 6.67, massimo 8.15; deviazione standard è 0.303.

La pressione parziale di CO₂ (pCO₂) presenta una distribuzione di tipo log-normale, con parametri medi caratteristici delle acque il cui contenuto in CO₂ deriva dalla dissoluzione dei gas del suolo durante l’infiltrazione. Non si individua una popolazione di campioni anomali per i quali ipotizzare l’input di CO₂ “profonda”.

In Fig. 3 sono raccolti i valori del parametro Al registrati dal 2006 al 2011 nelle Sorgenti di Sugano (fonte Arpa Umbria) confrontati con il limite del D.Lgs 31/2001(riga rossa); l’ovale rimarca l’evento di contaminazione.

Nel P65, all’inizio della prova di pompaggio (Fig. 4), si rileva una significativa differenza nella concentrazione di Al fra il campione TQ= 300 µg/l e quello MF= 196 µg/l; con l’andare della prova si determina, per entrambi, una progressiva riduzione, fino a valori che tendono ad approssimarsi fra loro, conseguenza del progressivo aumento del contributo delle acque della falda profonda; nel P126, la concentrazione di Al risulta sempre molto bassa, senza alcuna differenza fra i campioni TQ e quelli MF.

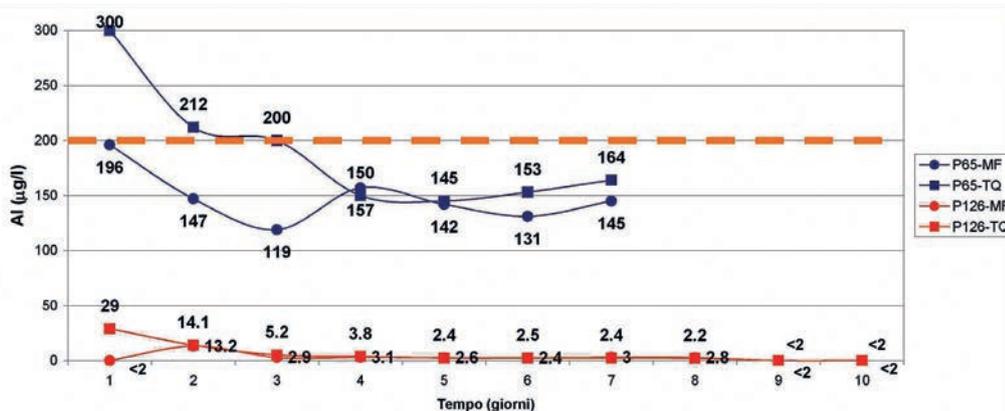


Fig. 4 - Diagrammi concentrazione di Al vs tempo durante la prova di lunga durata sui pozzi P65 e P126.

Fig.4 - Al concentrations vs time graphs during the aquifer-test on P65 and P126 well.

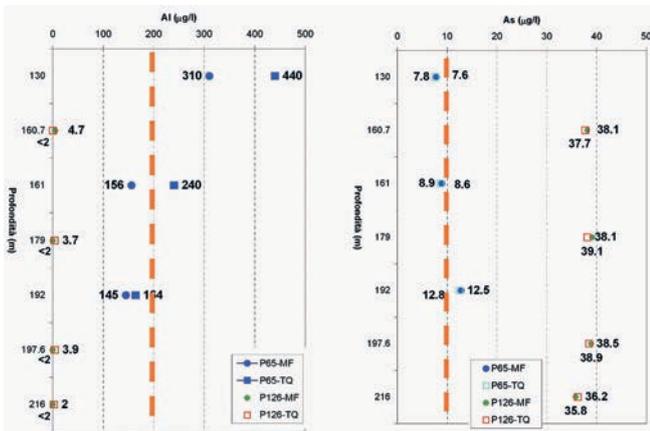


Fig. 5 - Grafici concentrazione di Al e As vs profondità sui pozzi P65 e P126.

Fig. 5 - Al and As concentrations vs depth graphs on P65 and P126 well.

I log idrochimici (Fig. 5) evidenziano che nel P65 le concentrazioni di As crescono con la profondità e quelle di Al hanno una correlazione inversa, con i campioni MF, soprattutto in quelli meno profondi. Le concentrazioni di As, al variare della profondità di campionamento, indicano che esiste una stratificazione chimica all'interno della falda di base con valori massimi alla base e valori crescenti verso l'alto di Al.

Il P126 mostra variazioni molto piccole dei parametri con la profondità di campionamento; anche nel pozzo P126 è probabilmente presente una stratificazione della falda ma risulta molto meno marcata rispetto al pozzo P65.

Modello concettuale idrogeologico

Il quadro complessivo dei dati ha reso possibile la formulazione del modello concettuale idrogeologico della circolazione idrica sotterranea dell'area di studio (Fig. 6).

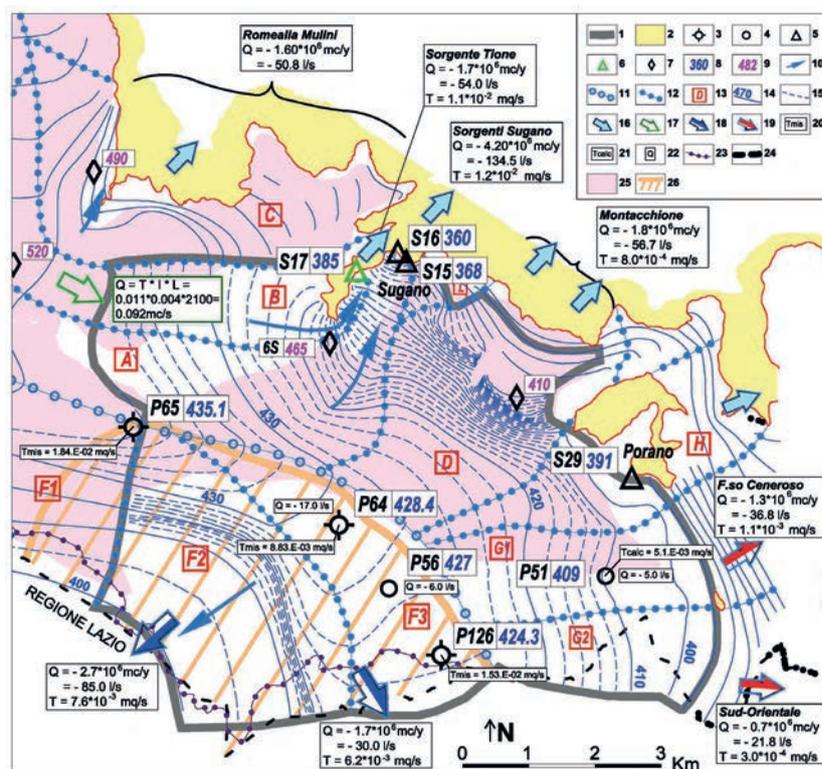


Fig. 6 - Modello concettuale idrogeologico

LEGENDA: 1- Area di studio di dettaglio; 2- Complesso argilloso (acquiclud); 3- Pozzi Regione Umbria; 4- Pozzi comunali 5- Sorgenti Sugano e Capita; 6- Sorgente Tione; 7- Sorgenti falda sospesa; 8- Quota piezometrica falda di base, m slm; 9- Quota piezometrica falda sospesa, m slm; 10- Assi di drenaggio falda di base; 11- Spartiacquie idrodinamico principale; 12- Limite sottobacini; 13- Identificativo sottobacini; 14- Isolepie falda di base, m slm; 15- Isolepie intermedie falda di base; 16- Portate uscenti verso il bacino del Fiume Paglia; 17- Flussi in ingresso da settori esterni; 18- Flussi verso il bacino Fiume Marta/Lago di Bolsena; 19- Flussi verso il bacino Fiume Tevere; 20- Valori di trasmissività ricavati dalla interpretazione di prove di portata di lunga durata; 21- Valori di trasmissività; 22- Portate medie (l/s); 23- Spartiacquie idrografico; 24- Confine regionale; 25- Falda sospesa; 26- Acquitarzo intermedio.

Fig. 6 - Hydrogeological Conceptual Model

LEGEND: 1- Detailed study area; 2- Clayey Complex (aquiclude); 3 - Wells Umbria Region; 4 - Municipal well; 5 - Sugano and Capita springs; 6 - Tione spring; 7 - Springs of the perched water table; 8 - Potential head of the basic aquifer, m. asl; 9 - Potential head of the perched aquifer, m asl; 10 - Main basic aquifer lines of drainage; 11 - Main Ground-water watersheds; 12 - Border of sub-basins; 13 - Identifier of sub-basins; 14 - Equal piezometric lines of the basic aquifer, m asl; 15 - Intermediate equal piezometric lines of the basic aquifer; 16 - Outflow discharges towards Paglia River basin; 17 - Inflow from external sectors; 18 - Outflow towards Marta River basin / Bolsena lake; 19 - Outflow towards Tevere River basin; 20 - Values of Transmissivity derived from interpretation of long duration aquifer tests; 21 - Transmissivity values; 22 - Average discharges (l/s); 23 - Hydrographic watershed; 24 - Regional border; 25 - Perched aquifer; 26 - Intermediate aquitard.

Con riferimento alla serie dei dati pluvio-termometrici del periodo 1970-2004, è stato elaborato il bilancio idrogeologico dell'area di studio, i cui risultati sono sintetizzati in Tab.2. La evapotraspirazione reale (ET_r) è stata calcolata con la metodologia di Thorntwaite & Mather, 1955 e l'infiltrazione efficace potenziale (I_p) è stata stimata mediante i valori di c.i.p. (Celico P., 1986), attribuiti sulla base delle caratteristiche dei complessi idrogeologici, dell'assetto morfologico e della densità di drenaggio. Detti valori di c.i.p., sono stati calibrati sulle portate medie erogate dalle principali sorgenti (i.e. Sorgenti di Sugano, Sorgente Tione), dopo averne delimitato, con la maggiore precisione, le aree di alimentazione. Il risultato raggiunto evidenzia che il sistema acquifero Vul-sino presenta ancora ampi margini di utilizzo sostenibile.

Tab. 2 - Parametri idrodinamici ricavati dai test di emungimento di lunga durata (P126, P65 e P64) e dai test speditivi

Tab. 2 - Hydrodynamic parameters derived from long duration aquifer tests (P126, P65 e P64) and expeditions well tests.

Entrate	l/s	l/s
Infiltrazione efficace	355	
Portate entranti	97,5	
TOTALE	452,5	
Uscite		
Restituzioni sorgive		195
Prelievo da pozzi		30
TOTALE		225
Risorsa disponibile		233

Dominio del modello numerico e condizioni al contorno

Il dominio del modello numerico, Fig. 7, è stato suddiviso secondo un reticolo di celle aventi lato di 35*33 m, raffinate telescopicamente in corrispondenza dei pozzi in esercizio, P64 e P56, con lato di 8 m; il numero complessivo delle celle attive è pari a 47216 per ognuno dei layer.

Sulla base del modello concettuale, Fig. 6, sono state definite le seguenti condizioni al contorno:

- a potenziale imposto: assegnate dove l'altezza piezometrica, identificata con la quota della idroisoipsa più prossima, si assume costante nel tempo;
- tipo misto - drain utilizzate per simulare gli effetti delle sorgenti del settore nord-occidentale;
- flusso nullo: identificato tramite celle inattive nelle zone in cui il limite del modello risulta ortogonale alle linee equipotenziali.

Il limite inferiore è rappresentato dal substrato sedimentario a bassissima permeabilità, la cui morfologia è stata ricavata con metodologie geostatistiche tramite Kriging, basate su numerose stratigrafie e SEV.

Nell'ambito dell'area attiva sono selezionati n 21 pozzi di osservazione per la calibrazione.

La struttura verticale del serbatoio acquifero saturo, in linea con il quadro idrodinamico, è stata discretizzata in n° 3 layer, Fig. 8: acquifero freatico superiore (layer 1), acquifero semi-confinato basale (layer 3) e acquitardo intermedio (layer 2),

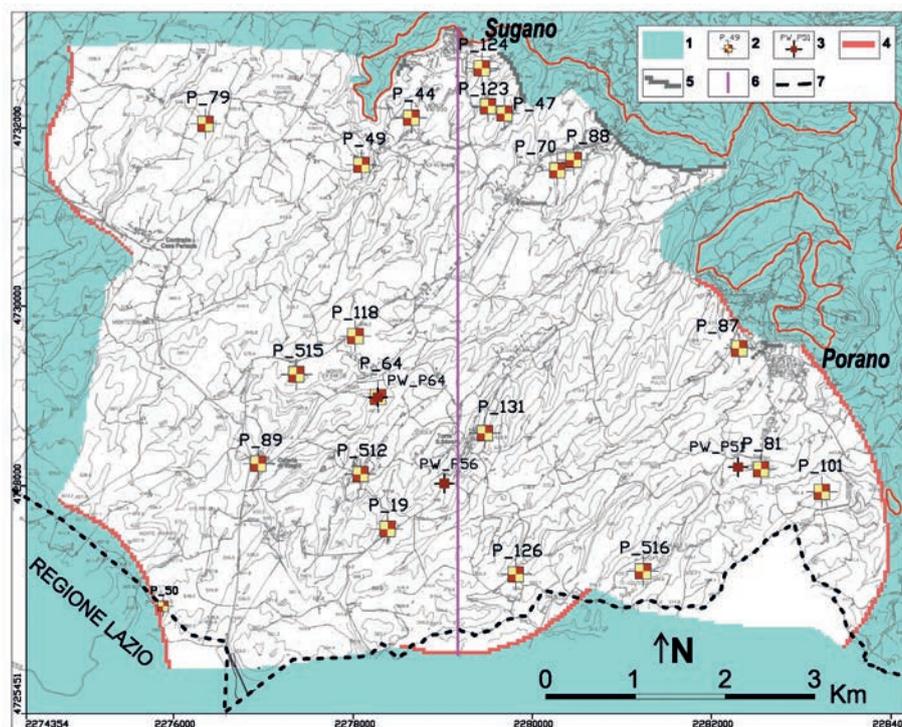


Fig. 7 - Dominio del modello e condizioni al contorno

LEGENDA: 1- Celle inattive per il flusso; 2- Pozzi di osservazione; 3- Pozzi di emungimento stato attuale; 4- Condizioni al contorno del tipo "carico costante"; 5- Condizioni al contorno del tipo "dreno"; 6- Traccia della sezione rappresentativa (colonna 147); 7- Confine regionale.

Fig. 7 - Active domain of the mathematical model

LEGEND: 1- Inactive cells for flow; 2- Observation wells; 3- Pumping wells - current status; 4- Constant head Boundary Condition; 5- Drain Boundary Condition; 6- Trace of the representative cross section (column 147); 7- Regional border.

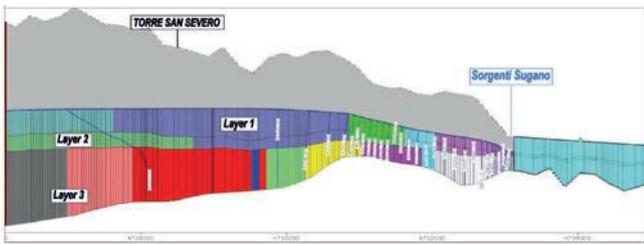


Fig. 8 - Struttura verticale del modello.
Fig. 8 - Vertical structure of the mathematical model.

quest'ultimo limitato alla parte centro meridionale dell'area del modello.

Si assegna al modello un coefficiente di immagazzinamento specifico $S_s = 1 \times 10^{-5}$ ed una potenzialità specifica S_y : Layer 1 = 12.5%; Layer 2 = 3%, nel settore dell'acquitrando, e 10% nella restante parte; Layer 3 = 12.5%.

La ricarica è discretizzata in 23 fasce, con valori di infiltrazione efficace variabili fra 110 mm/anno e 330 mm/anno (Fig. 9).

Sulle stesse fasce, per le simulazioni in transitorio, l'infiltrazione efficace è stata modulata con passo mensile, sulla base del bilancio effettuato con il metodo di Thorntwaite; nel periodo Maggio-Ottobre la ricarica è pari a zero.

Calibrazione del modello di flusso

Il modello numerico di flusso è stato calibrato con metodologia trial and error, modificando i valori di conducibilità idraulica nell'ambito del range dei dati sperimentali (Tab. 1).

I grafici e figure seguenti mostrano i risultati del processo di calibrazione sia in termini di differenze fra i valori misurati e quelli calcolati dei carichi idraulici (Fig. 10), della piezometria di calibrazione simulata (Fig. 11) ed anche rispetto ai flussi entranti ed uscenti dal sistema (Tab. 3).

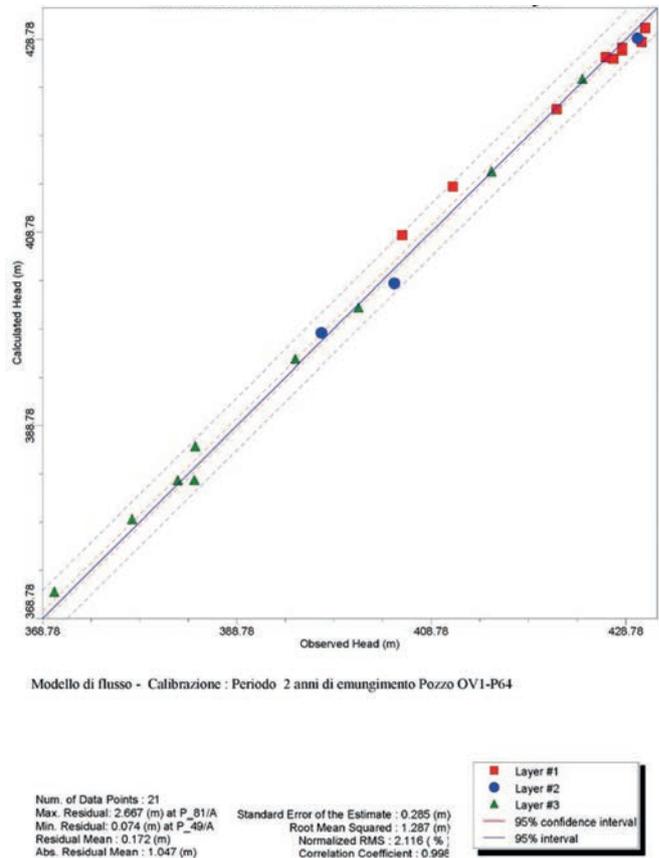


Fig. 10 - Valori dei carichi idraulici calcolati vs misurati (m. slm).
Fig. 10 - Calculated vs observed head (m asl).

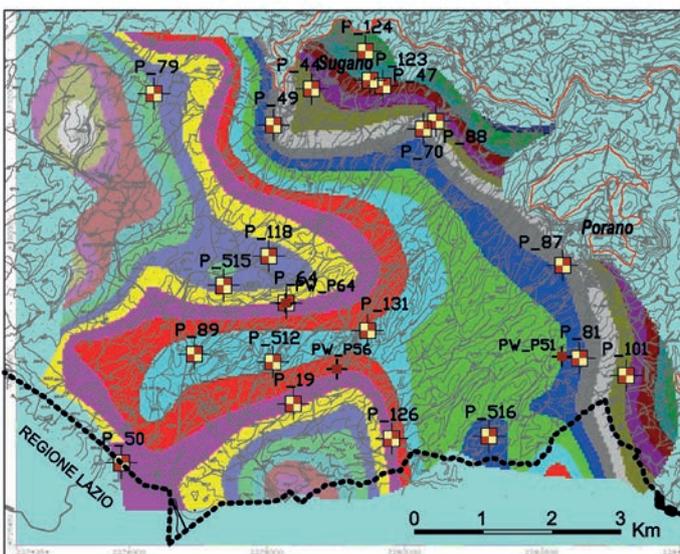


Fig. 9 - Distribuzione delle fasce di infiltrazione efficace e relativi valori mm/anno.
Fig. 9 - Ranges distribution of effective infiltration and their values mm/year.

Zone #	Zone Name	Layer #	Zone #	Zone Name	Layer #
1	110A mm	1	13	230 mm	1
2	120A mm	1	14	240 mm	1
3	130 mm	1	15	250	1
4	140 mm	1	16	260	1
5	150 mm	1	17	270	1
6	160 mm	1	18	280	1
7	170 mm	1	19	290	1
8	180 mm	1	20	300	1
9	190 mm	1	21	310	1
10	200 mm	1	22	320	1
11	210 mm	1	23	330	1
12	220 mm	1			

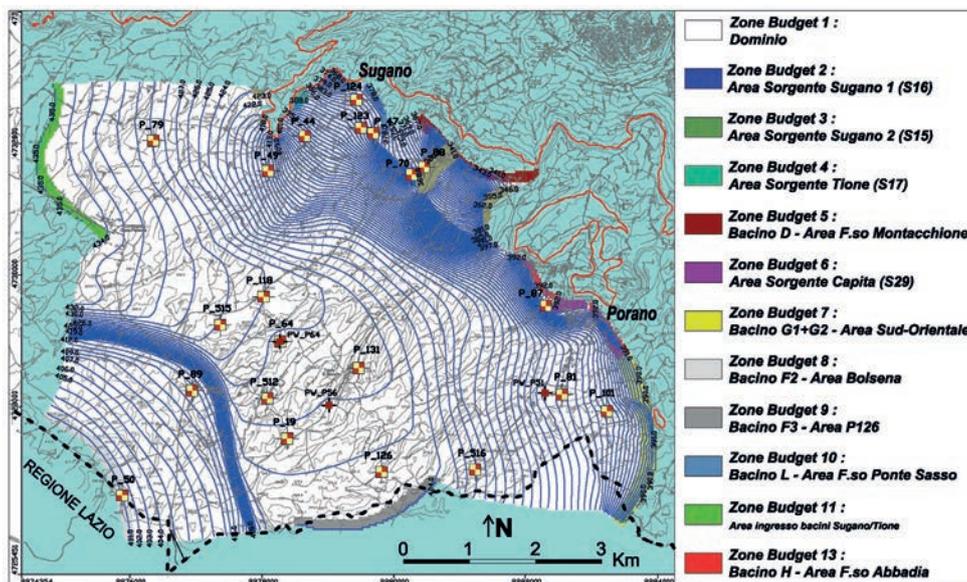


Fig. 11 - Piezometria di calibrazione simulata con individuazione delle aree di zone-budget.

Fig. 11 - Piezometria di calibrazione simulata con individuazione delle aree di zone-budget.

Tab. 3 - Flussi entranti ed uscenti.

Tab. 3 - Incoming and outgoing flows.

ENTRATE	simulazione	443 l/s
	bilancio idrogeologico	452.5 l/s
USCITE	simulazione	445.1 l/s
	bilancio idrogeologico	458 l/s

Calibrazione del modello di trasporto

Il modello numerico di trasporto è stato calibrato sulle concentrazioni di alluminio risultanti dai campionamenti del 2011, avendo fissato le condizioni al contorno e ricercato, iterativamente, i parametri di dispersività.

Le condizioni al contorno sono rappresentate dalle condizioni iniziali e dal termine sorgente di contaminazione definito come Constant Concentration.

A tale riguardo si è fatto riferimento alle concentrazioni di Al determinate nei pozzi ricadenti nei settori del dominio del modello in cui sono presenti circuitazioni sospese (Fig. 5), con specifico riferimento a quelli che intercettano la falda di base nella parte alta, freatica.

Per definire le condizioni iniziali, in analogia con il log idrochimico del pozzo P65 (Fig. 5), nei 3 layer si è assunta una distribuzione di Al decrescente con la profondità, secondo la seguente proporzione:

$$[Al]_{layer1} : [Al]_{layer2} : [Al]_{layer3} = 1.0 : 0.5 : 0.25$$

La distribuzione delle concentrazioni di Al caratterizzanti le condizioni iniziali nei diversi layer, è stata ricavata, in ambiente Surfer, con metodologia di kriging e, tramite processo di oscuramento (blanking) selettivo, evidenziata solo nelle aree in cui risulta presente la falda sospesa (Fig.12).

Relativamente al termine sorgente, sono stati attribuiti al Layer 1 valori analoghi a quelli utilizzati per la concentra-

zione iniziale, in grado di rilasciare una concentrazione di Al costante nel periodo di modellazione.

In prossimità delle sorgenti di Sugano, sono state considerate piccole aree come termine sorgente anche nei Layer 2 e 3, con valori di [Al] analoghi a quelli delle corrispondenti celle del Layer 1, per la presenza di una locale disconnessione/frattura nell'ammasso lavico e piroclastico che sostiene la falda sospesa.

Nelle aree esterne al campo di esistenza della sorgente di contaminazione (Fig. 12) sono state assegnate condizioni di sorgente nulla, inoltre, in dette aree, sono stati inseriti punti di verifica (concentration observation well), utilizzando pozzi riconducibili al Layer 3, e comunque non influenzati direttamente dalla falda sospesa.

Il modello calibrato è stato implementato sulla base del modello di flusso in condizioni stazionarie, avendo imposto le condizioni al contorno sopra descritte e ricercando valori di dispersività longitudinale α_L , secondo una metodologia *trial and error*; si è escluso il contributo del trasporto per diffusione. E' stato imposto un tempo di modellazione di 36500 giorni, tale da permettere il raggiungimento di condizioni di stabilizzazione dei processi di trasporto.

Per la struttura idrogeologica in studio non sono disponibili dati sulla dispersività; pertanto, sono stati ricercati i valori che hanno permesso di conseguire una accettabile calibrazione del modello e che risultano congruenti con quelli riportati nella letteratura per litotipi analoghi (Gelhar, L.W., P, Rockwell Intl., Richland, Wash., 1982 - Grove, D.B, 1977 e Robertson, J.B.,1974)

La migliore correlazione tra i dati osservati e calcolati è stata ottenuta per i valori di dispersività longitudinale $\alpha_L = 5 \text{ m}$, con locali variazioni fino a $\alpha_L = 500 \text{ m}$ e rapporti $\alpha_T / \alpha_L = 0.1$ e $\alpha_V / \alpha_L = 0.01$

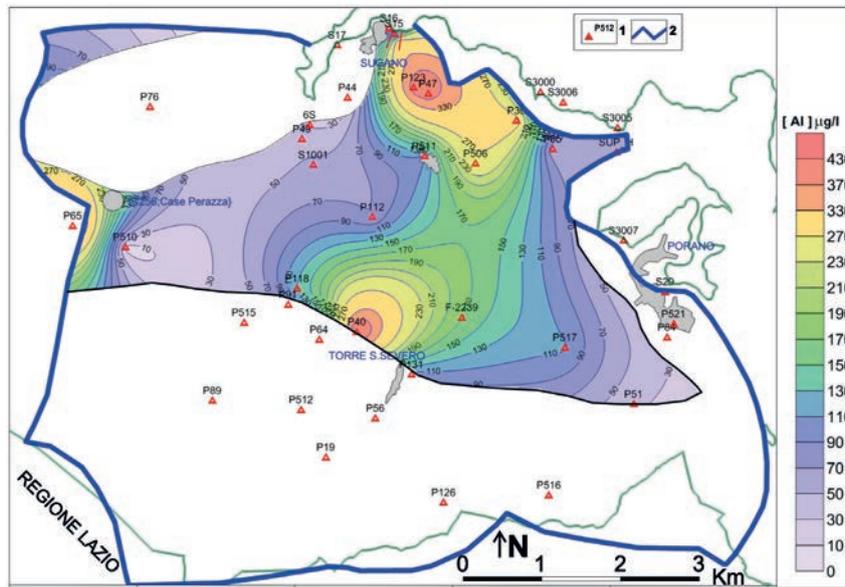


Fig. 12 - Distribuzione delle fasce di isoconcentrazione di Al sul Layer 1: condizioni iniziali e sorgente di contaminazione
 LEGENDA: 1- punti d'acqua campionati; 2 - Limite del dominio attivo del modello.

Fig. 12 - Distribution of Al isoconcentration ranges at Layer 1: initial conditions and source of contamination
 LEGEND: 1- Sampled point of water; 2 - Active domain border of the mathematical .

Il grafico di Fig.13 mostra i risultati del processo di calibrazione in termini di differenze fra i valori misurati e quelli calcolati delle concentrazioni di Al.

Discussioni

Nell'area di studio si distinguono i seguenti sistemi acquiferi:

1. acquifero di base semiconfinato/freatico: rapporto Li/Rb > 7, basso Al e basso rapporto tra Al su campioni TQ e Al su campioni MF, concentrazioni di As elevate e stratificazione chimica;
2. acquifero di base freatico e parte superiore dell'acquifero semiconfinato, con composizione simile al precedente ma con valori inferiori di As;
3. falde sospese caratterizzate da Li/Rb < 3, concentrazioni di As molto basse, alto Al e alto rapporto di Al su campioni TQ e MF; a seguito di piogge intense e persistenti (nel dic. 2009, oltre 200 mm in pioggia in pochi giorni), si determina un rilevante arricchimento di Al (il tenore aumenta anche di 100 volte); nella sorgente 6S è stata registrata una concentrazione di 23,4 mg/l.

Le analisi isotopiche del Deuterio ($\delta^2\text{H}$) e $\delta^{18}\text{O}$ non evidenziano differenze tra le acque delle falde sospese e le acque della falda di base, le aree di infiltrazione sono poste a quote simili e la falda di base viene alimentata prevalentemente per drenanza dalle falde sospese.

Per quanto riguarda l'attività Tritio ($\delta^3\text{H}$), i valori più elevati sono quelli del campione della sorgente 6S 3.4 ± 0.6 U.T, quelli più bassi sono del P126, 0.6 ± 0.4 U.T, compatibili con tempi di residenza medi di alcune decine di anni. I dati confermano che le acque della sorgente 6S sono rappresentative di una circolazione rapida nelle falde sospese; che le acque

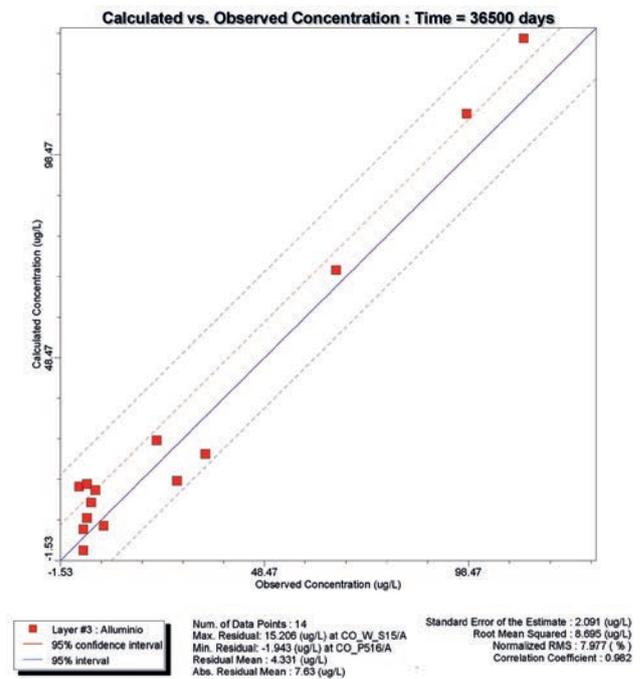


Fig. 13 - Diagramma concentrazioni osservate vs calcolate ($\mu\text{g/l}$).

Fig. 13 - Calculated vs observed concentration graph ($\mu\text{g/l}$).

del campione P126 rappresentano la falda di base, che appare completamente separata dai sistemi di circolazione superficiale e che le acque del P65 e delle sorgenti di Sugano, 2.1 ± 0.5 U.T, sono il risultato di una miscelazione tra acque di circolazione veloce ed acque della falda profonda.

Pertanto la concentrazione di Al che si rinviene nella falda di base è il risultato di una miscela fra le acque della falda

sospesa e quelle della falda di base freatica.

Le proporzioni della miscela sono molto diverse in quanto condizionate dalla esistenza, o meno, della componente sospesa ricca di Al; queste possono essere esplicitate dalla seguente relazione:

$$[Li]_{campione} = x \times [Li]_{FS} + (1-x) \times [Li]_{FB}$$

dove:

x = frazione di falda sospesa, rispetto ad Al, presente nella miscela;

$(1-x)$ = frazione di falda di base, rispetto ad As, presente nella miscela;

$[Li]_{FB}$ = concentrazione standard di litio nella falda di base;

$[Li]_{FS}$ = concentrazione standard di litio nella falda sospesa.

Per risolvere l'equazione si devono definire le concentrazioni di litio specifiche della falda di base e della falda sospesa (c.d. valori standard), per settori omogenei, quanto più prossimi al punto d'acqua del quale si vogliono conoscere le proporzioni della miscela.

Nello schema concettuale di Fig.14, si rappresentano i sistemi acquiferi e le modalità di captazione riscontrate sui pozzi censiti e campionati.

A) Pozzi su falda di base semiconfinata in assenza di falda sospesa sovrastante (P126).

B) Pozzi su falda di base freatica o sulla parte alta della falda semiconfinata, in assenza di falda sospesa (P64).

C-D) Pozzi su falda di base freatica in zone dove è presente la falda sospesa (P65).

E) Pozzi di ridotta profondità che si attestano sulla falda sospesa (privati).

X) Pozzi non perfettamente cementati (privati).

I pozzi in progetto presenteranno le caratteristiche Tipo B: pozzi con filtri in falda di base freatica o sulla parte superiore della falda semiconfinata, in assenza della falda sospesa. Infatti, nelle zone in cui le falde sospese sono ridotte o assenti, e la falda di base è freatica o semiconfinata, gli episodi di contaminazione da Al sono improbabili, se non da escludere; le concentrazioni di As sono molto variabili, si possono avere valori fino a 14-15 $\mu\text{g/l}$.

Pertanto, si prevede di dislocare il nuovo campo pozzi nel settore meridionale dell'area di studio, dove sono assenti o poco potenti le falde sospese (Fig. 6) e dove si ha un elevato valore del rapporto Li/Rb ~ 9 (Fig. 15) ; i pozzi di emergenza sono previsti in una zona prossima alle Sorgenti di Sugano, poco influenzata dalle falde sospese (Li/Rb ~ 5).

Simulazione degli effetti

Il modello di flusso calibrato è stato implementato in condizioni stazionarie, per essere successivamente utilizzato come supporto del modello di trasporto, ed in condizioni transitorie, in relazione al trend di ricarica ed al nuovo regime di pompaggio.

Il campo pozzi è dimensionato per una portata massima di circa 70 l/s di cui: 45 l/s per 305 giorni, con punte di 70 l/s per 60 giorni, mentre per i pozzi di emergenza sono dimensionati per una portata di 45 l/s, per circa 150 giorni/anno (durata dell'evento di contaminazione da Al).

Il periodo di tempo simulato è di 20 anni, ed è organizzato con il primo anno, 365 gg, in assenza di emungimento e con i successivi 19 anni con i pozzi di progetto attivi.

La stabilizzazione del sistema è prevista dopo circa 9-10 anni dalla entrata in esercizio; in Tab. 4 si quantificano gli effetti che risultano di scarso rilievo sul regime delle portate erogate dalla Sorgente Sugano 1 (S16) ed anche rispetto ai deflussi verso il lago di Bolsena, la Sorgente Tione (S17) risente dei pozzi di emergenza, il cui pompaggio può determinare una riduzione della erogazione di circa il 30%; resta comunque garantita la portata della concessione di 30 l/s.

La modellazione del trasporto ha preso in esame scenari di contaminazione da parte dell'Al, considerato agente inquinante conservativo e non reattivo, con concentrazioni iniziali ricavate dalla simulazione di calibrazione.

Come termine sorgente (Constant Concentration) si è considerata un'area corrispondente al campo di esistenza della falda sospesa, con valori di concentrazione dell'inquinante mantenuti costanti nel tempo di modellazione; inoltre si è previsto anche un ciclo connotato da concentrazioni di Al analoghe a quelle riscontrate nel corso della crisi del Dic. 2009-Gen.2010,

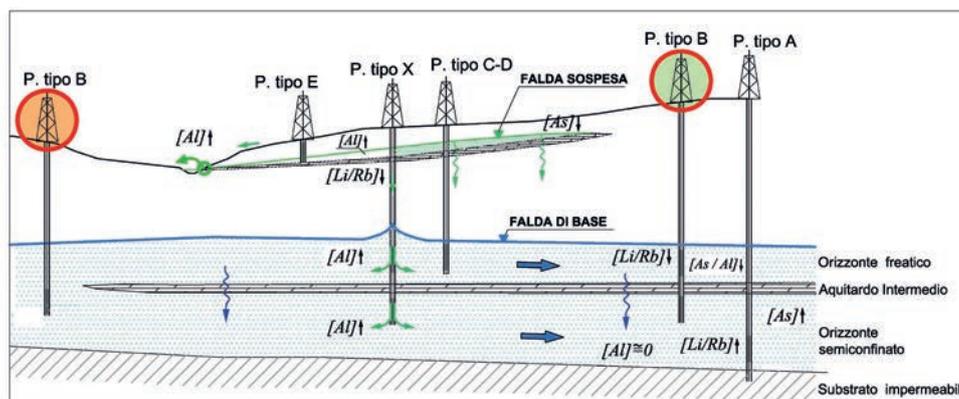


Fig. 14 - Schema concettuale dei sistemi acquiferi e distribuzione dell'Al.

Fig. 14 - Conceptual diagram of the aquifer system and distribution of Al.

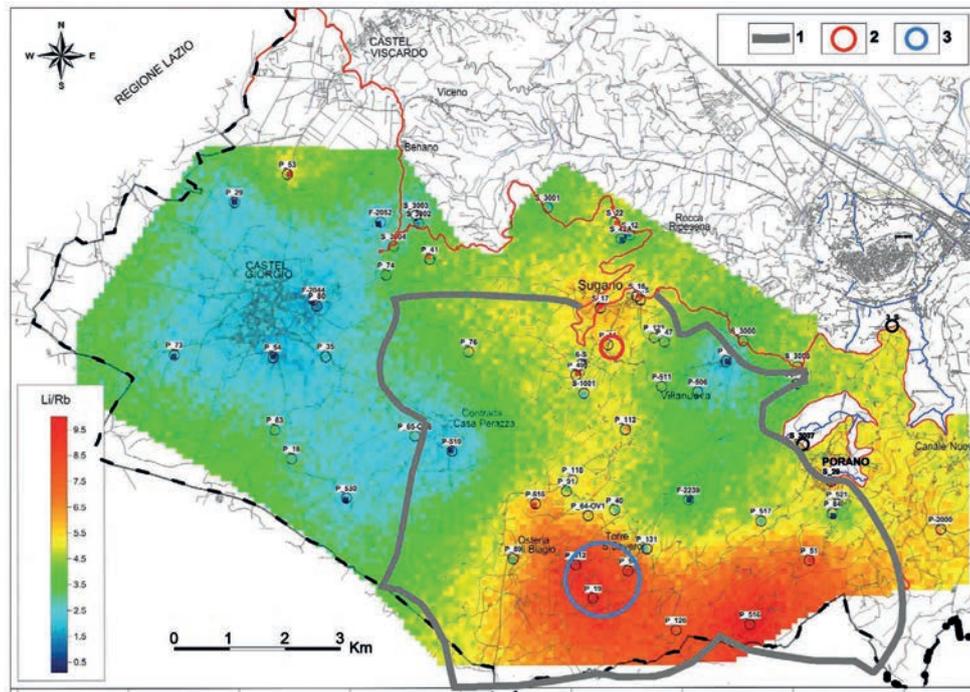


Fig. 15 - Distribuzione areale del rapporto Li/Rb - LEGENDA: 1- Area di studio di dettaglio; 2- Area dei pozzi di emergenza; 3- Area del nuovo campo pozzi.

Fig. 15 - Ratio Li/Rb areal distribution - LEGEND: 1- Detailed study area ; 2- Location of the emergency wells; 3- Location of the new well field area.

Tab. 4 -Effetti della entrata in esercizio dei nuovi pozzi.

Tab. 4 - New wells entry into operation effects.

	Qoss l/s	Qcal l/s	Variazione l/s	Variazione %
Sorgente Sugano 1 (S16)	110	107-105	3-5	3-5
Sorgente Tione (S17)	54	42.6-34.7	11.4-19.3	21-34
Travasò verso lago di Bolsena	75	72	3	4

applicando fattori moltiplicativi al valore medio per un intervallo analogo a quello della crisi.

La modellazione ha considerato sia l'effetto sui pozzi di emergenza della sollecitazione impulsiva derivante dal ciclo connotato da un grado di contaminazione analogo a quello della crisi e sia gli effetti verso il campo pozzi nella condizione di massimo regime di emungimento.

A seguito della applicazione dei valori di Al registrati durante la crisi, il modello risponde in maniera adeguata dato che i valori di concentrazione calcolati per le sorgente Sugano 1 (S16) e Sugano 2 (S15), risultano sostanzialmente confrontabili con quelli osservati. In tali condizioni i pozzi di emergenza P_EM1,2,3, assunta cautelativamente la portata di esercizio di 45 l/s costante, non presentano variazioni sostanziali del tenore di Al, prevede di raggiungere una concentrazione massima di circa 23 µg/l (CO_PEM di Fig. 16).

Per il nuovo campo pozzi PW_R1,2,3, la simulazione evidenzia un progressivo incremento delle concentrazioni di Aluminio per un periodo di circa 50 anni, in cui si raggiungono valori dell'ordine di 103 µg/l (CO_PWR1 di Fig. 17) cui segue una sostanziale stabilizzazione.

Conclusioni

Nel dicembre 2009 e nei successivi mesi del 2010 si è determinata una pesante crisi idrica, che ha interessato la fornitura idropotabile per circa 20000 persone, a seguito della contaminazione da Al delle acque captate dell'acquifero vulcanico Vulsino

Ad oggi la situazione sanitaria e di qualità delle acque è sotto controllo per effetto della realizzazione di appositi impianti di potabilizzazione.

Il presente lavoro, sviluppato attraverso un approccio multidisciplinare, basato su tecniche tipiche della idrogeologia quantitativa, analisi ed elaborazioni di tipo idrogeochimico, supportate da strumenti di modellazione matematica, ha permesso di individuare un approccio metodologico utile alla individuazione delle migliori condizioni di captazione di nuove risorse, coerenti con il regime di ricarica e con le problematiche di tipo qualitativo, che consente di mitigare l'entità ed i costi dei trattamenti di potabilizzazione.

E' in programma la realizzazione di piezometri nella zona delle sorgenti di Sugano e la realizzazione di un pozzo pilota nell'area del campo pozzi.

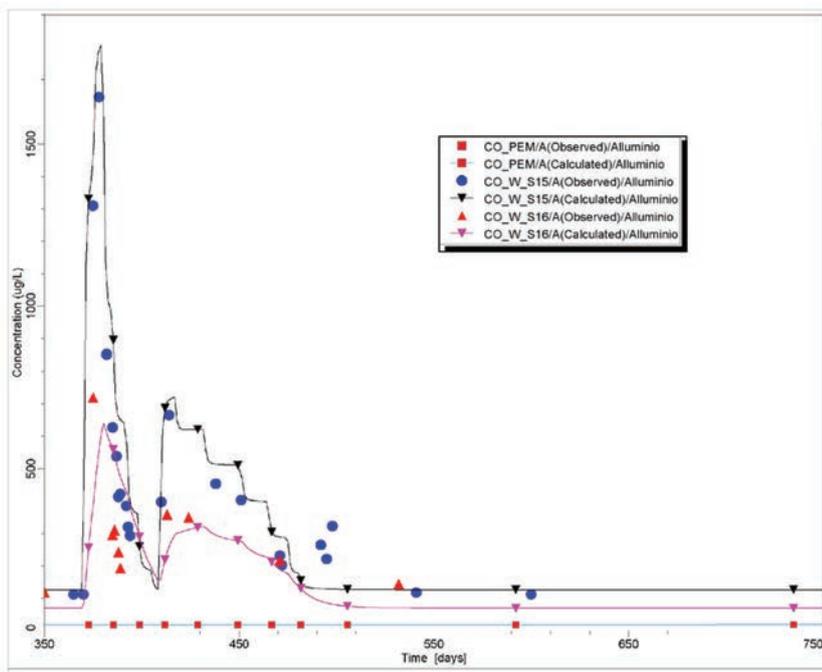


Fig. 16 - Concentrazioni di Al nei pozzi di emergenza PEM durante l'evento critico simulato.

Fig. 16 - Al concentrations in emergency wells (EMW) during simulated critical occurrence.

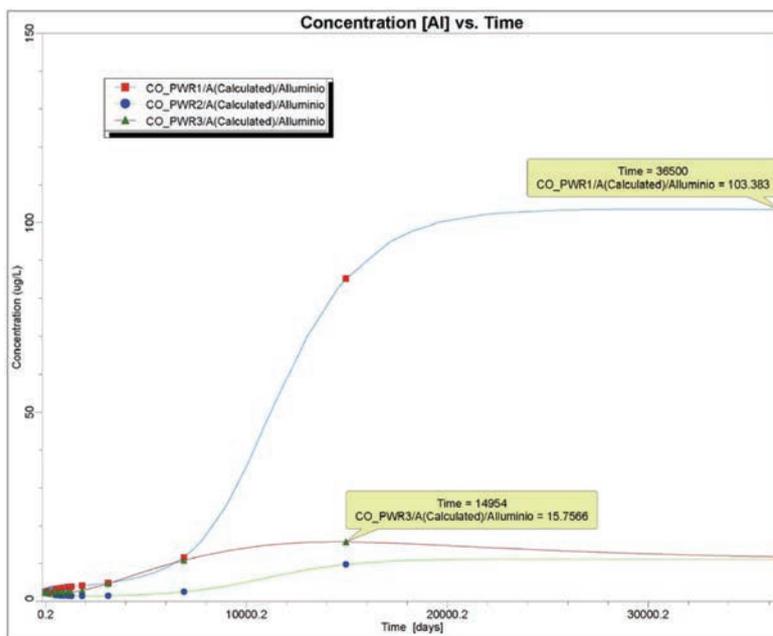


Fig. 17 - Concentrazioni di Al nel nuovo campo pozzi (PWR).

Fig. 17 - Al concentrations in new well field (RPW).

BIBLIOGRAFIA

- Archie G.E. (1942). The electrical resistivity log as an aid determining some reservoir characteristics. *Tras. Am.Inst.Min., Metall., Petr., Eng.*, n° 146
- Celico P. (1986). *Prospezioni idrogeologiche*, Liguori Editore
- Civita M. (2005). *Idrogeologia applicata e ambientale*, Editore CEA
- Cooper H.H., Jacob C.E. (1946). A generalized graphical method for evaluating formation constants and summarizing wellfield history, *Trans. Amer. Geophys. Un.*, 27,
- Custodio E. & Llamas M.R. (2005). *Idrologia sotterranea* – Dario Flacovio Editore
- De Jonge, L.W., C. Kjaergaard, P. Moldrup (2004). Colloids and colloid-facilitated transport of contaminants in soils: An introduction. *Vadose Zone Journal* 3 (2): 321–325. DOI:10.2113/3.2.321.
- Emsellem Y, (1965). L'interprétation des essais de débit des nappes souterraines par méthode d'identification, *Ann. de Mines*, 6, 1965.)
- Gelhar, L.W. (1982). Analysis of two-well tracer tests with a pulse input, Rep. RHO-BW-CR131 P, Rockwell Intl., Richland, Wash.
- Grove, D.B. (1977). The use of Galerkin finite-element methods to solve mass transport equations, Rep. USGS/WRD/WRI-78/011, U.S. Geol. Survey., Denver, Colo.,
- Hantush, M.S. And C.E. Jacob, (1955). Non steady radial flow in an infinite leaky aquifer, *Am. Geophys. Union Trans.*, Vol. 36, no. 1.
- Hantush, M.S. And C.E. Jacob, (1955). Steady three-dimensional flow to a well in a two-layered aquifer, *Trans. Am. Geophys. Union*. Vol. 36, no. 1
- Harbaugh A.W., E. Banta, M. Hill, And M. McDonald, 2000. *ModFlow-2000*, the U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model – User guide to modularization concepts and the Ground-Water Flow Process, Open File Report 00-92, U.S. Geological Survey, Denver, COSmart P.L. (1982). A review of the toxicity of 12 fluorescent dyes used for water tracing. *Water Resources Res.* 13 (1)
- Hemming Chew, L. M. Johnston, Doug Craig, Karen Inch, (1988). *Aluminum Contamination of Groundwater: Spring Melt in Chalk River and Turkey Lakes Watersheds- Preliminary Results Published on the web 11 April 2011*. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*
- Jacob C.E., (1946). Drawdown test to determine effective radius of artesian well, *Proc. Amer. Soc. Civ. Engin.*, 72.
- Krueseman G.P., De Ridder N.A. (1994). Analysis and evaluation of pumping test data, *Int. Inst. Land Reclam. & Improv.*, Wageningen, (2nd ed.), Publ. 11,
- Lucas, L.L. And Unterweger, M.P., (2000). Comprehensive review and critical evaluation of the half-life of tritium. *J. Res. Natl. Stand. Technol.* 105 (4)
- Maryam Kargar, Neamatolah Khorasani, Mahmoud Karami, Gholam-Reza Rafiee, Reza Naseh (2011). Study of Aluminum, Copper and Molybdenum Pollution in Groundwater Sources Surrounding (Miduk) Shahr-E- Babak Copper Complex Tailings Dam World Academy of Science, Engineering and Technology 52
- McDonald M.G. Harbaugh A.W., Banta E.R., Hill M.C. (2000): *Modflow 2000*, The U.S. Geological Survey Modular Ground-Water Model – User Guide to Modularization Concepts and the Ground-Water Flow Process. U.S. Geological Survey, Open File-Report 00-92, 121 p
- Thornthwaite C.W., Mather J.R., (1955). *The water balance*: Centerton, N.J., Laboratory of climatology, Publications in Climatology, v. 8 n°1
- Zheng, C., Chunmiao, And Wang, P.P., (1999). A modular three-dimensional multispecies transport model for simulation of advection, dispersion and chemical reactions of contaminants in groundwater systems. *Documentation and User's Guide*. Department of Geology and Mathematics, University of Alabama, U.S.



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

ECOGEO S.R.L.

Società Unipersonale

Via F.lli Calvi, 2 - 24122 BERGAMO

Tel. 035/27.11.55 Fax 035/23.98.82

N. R.E.A. BG 345358 - Capitale Sociale: € 30.000,00 i.v.

C.F. Part. IVA e N. Iscriz. R.I. 03051330169

<http://www.ecogeo.net> e-mail: info@ecogeo.net

Posta Elettronica Certificata: ecogeo@pec.ecogeo.net

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

