

Studio idrochimico multitemporale delle acque sorgive dell'acquifero carsico del Gran Sasso (Italia centrale) per un affinamento del modello idrochimico concettuale

Giuseppe Mazziotti Di Celso¹, Michele Spizzico², Marco Tallini³

¹Dipartimento di Scienze degli Alimenti, Università di Teramo, Piazza Aldo Moro, 45, 64100 Teramo. e-mail: mazziotti@unite.it

²Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale, Politecnico di Bari, Via Orabona, 4, 70125 Bari; e-mail: m.spizzico@poliba.it

³Dipartimento di Ingegneria delle Strutture, delle Acque e del Terreno, Università dell'Aquila, Monteluco di Roio, 67040 L'Aquila; e-mail: tallini@ing.univaq.it

Multitemporal hydrochemical study of Gran Sasso karst aquifer (central Italy) to improve the conceptual hydrogeological model

ABSTRACT: In ongoing research project on karst aquifer vulnerability carried out on the Gran Sasso massif, new considerations about the groundwater flowpaths and the fundamental processes of water-rock interaction have been possible to achieve. The preliminary study, whose first results are reported here, is based on the statistical elaboration of Saturation Index (SI) of calcite and Mg/Ca ratio calculated from hydrochemical analysis carried out during '70, '90 and '2000 years of the main Gran Sasso spring waters. About 3,500 data (among which T, El. Cond., pH, major elements and some trace elements) of 30 springs were elaborated with the specific geochemical modelling software PHREEQC (ver. 2). It is known how SI of calcite, Mg/Ca ratio and pH in clearly calcium-bicarbonate groundwater are parameters which represent the hydrochemical facies of spring water and so they can mark in many cases the principle processes of water-rock interaction. In this way SI of calcite, Mg/Ca and pH can be used as an environmental tracers permitting the fine tuning of the hydrogeological framework already obtained from the "classical" hydrogeological data (geological and hydrogeological mapping, spring and river discharge monitoring; water budget evaluation). The conceptual model of Gran Sasso groundwater flowpaths have been improved starting from a quite complete hydrological and hydrochemical database and an already suggested hydrogeological setting. From this approach mixing between regional and shallow groundwater, springs fed by different regional groundwater; seasonal and annual variations of SI of calcite for some springs related to regional groundwater overflowing were recognised. Furthermore the already proposed spring water classification of Gran Sasso was confirmed.

Key terms: Karst aquifer, Hydrochemical multitemporal study, Mg/Ca ratio, Calcite saturation index, pH, central Italy.

Termini chiave: Acquiferi carsici, Studio idrochimico multitemporale, Rapporto Mg/Ca, Indice di saturazione della calcite, pH, Italia centrale.

Riassunto

Nell'ambito di progetti specifici in corso sul Gran Sasso mirati alla valutazione della vulnerabilità degli acquiferi carsici, è stato possibile ottenere ulteriori informazioni sulle direzioni del deflusso idrico sotterraneo e sui processi fondamentali dell'interazione acqua-roccia.

Lo studio preliminare si è basato sull'elaborazione statistica spazio-temporale dell'indice di saturazione (*Saturation Index*) della calcite, del rapporto Mg/Ca e del pH delle acque sorgive principali calcolato a partire da analisi chimiche eseguite nel corso degli anni '70, '90 e in questi ultimi anni 2000. Sono stati elaborati con il software di modellazione geochimica PHREEQC (ver. 2) circa 3.500 dati (tra cui T, cond. el., pH, elementi maggiori e qualche elemento in traccia) relativi a circa 30 sorgenti.

È noto come il SI della calcite, il rapporto Mg/Ca e il pH nelle acque bicarbonato alcalino-terrose possano essere utilizzati come traccianti ambientali permettendo l'affinamento del quadro idrogeologico di partenza, comunque indispensabile, ottenuto a partire dai dati idrogeologici di base.

Nel caso del Gran Sasso disponendo di un database di analisi chimiche completo, sia come numero di sorgenti che come serie temporale e partendo da un quadro idrogeologico di sintesi ormai abbastanza ben configurato, è stato possibile migliorare il modello concettuale della circolazione delle acque sotterranee.

Introduzione

Fra i metodi indiretti di stima dei tempi di permanenza delle

acque sotterranee, fondamentale per valutare il grado di vulnerabilità delle sorgenti, l'analisi dei parametri idrochimici, utilizzati come traccianti ambientali, può fornire anche utili indicazioni sui processi di interazione acqua-roccia. Fra le grandezze che sintetizzano la facies geochemica delle acque sotterranee certamente gli indici di saturazione (*Saturation Index*) della calcite, insieme ai valori di temperatura, conducibilità elettrica, pH e rapporto Mg/Ca delle acque sorgive sono parametri che permettono di fare importanti valutazioni sulla modalità di circolazione dell'acque sotterranee negli acquiferi carsici, considerando che questi in genere hanno un valore strategico perché sede di cospicue risorse idriche sfruttate a fini idropotabili.

In genere sono disponibili in letteratura lavori di idrogeochemica sugli acquiferi carsici che riguardano solamente analisi stagionali che si fermano allo studio di un singolo o al più di qualche anno idrologico (Appelo & Postma, 1993). Sono scarsi invece gli studi multitemporali pluriennali che potrebbero invece portare nuove indicazioni sul comportamento idrodinamico degli acquiferi carsici soggetti a variazioni nella circolazione delle acque a loro interno causati per esempio da sensibili oscillazioni della falda regionale, possibilmente condizionate da cause climatiche (ricarica degli acquiferi variabile nel tempo) o antropiche (drenaggi legati a scavi in sottterraneo).

È stato possibile invece affrontare uno studio multitemporale (per il periodo 1970-2000) del SI della calcite, del rapporto Mg/Ca e del pH delle acque sorgive del Gran Sasso, sistema idrogeologico carbonatico paradigmatico dell'Appennino centro-meridionale, i cui risultati preliminari si sono dimostrati abbastanza interessanti e che saranno quindi oggetto di ulteriori approfondimenti.

La scelta del Gran Sasso è motivata dalla presenza di una data base idrogeologico e idrochimico cospicuo e dal fatto che il Gran Sasso ha subito in questi ultimi trent'anni importanti modificazioni, della falda regionale legate allo scavo in sottterraneo di infrastrutture che attraversano il nucleo dell'acquifero (gallerie autostradali e laboratori INFN). Inoltre non è da escludere, per ipotizzate variazioni delle geometrie della falda regionale, l'effetto in sovrapposizione di una ricarica dell'acquifero differenziata, causata da una riduzione degli apporti idrici, ormai conclamati in tutta l'area italiana, avvenuta negli anni ottanta.

Lo scopo ultimo è quello di verificare, tramite il confronto dei valori dei parametri idrochimici selezionati relativi ad analisi chimiche delle acque sorgive campionate prima (anni '70) e dopo (anni '90' e '00) la realizzazione delle gallerie autostradali, se queste ultime hanno causato una modifica dei percorsi delle acque sotterranee e quindi dei processi di interazione acqua-roccia.

A tal proposito risulta di estrema utilità, per la caratterizzazione della soluzione, l'indice di saturazione (*Saturation Index* - SI) (Langmuir, 1971):

$$SI = \log (K_{IAP}/K_{eq})$$

dove K_{IAP} è il prodotto di attività ionica e K_{eq} è la costante di equilibrio.

Acque aggressive avranno valori negativi del SI, la soluzione è sottosatura e vi è una dissoluzione netta del minerale a cui si riferisce il SI. Valori positivi sono riferiti ad acque sovrasature nei confronti del minerale e vi è una precipitazione netta del minerale. Se il SI è uguale a zero siamo in equilibrio dinamico e la soluzione è satura. Per la calcite l'avvicinamento all'equilibrio dinamico (SI=0,0), peraltro molto difficile da raggiungere, è asintotico se le condizioni al contorno (T, pH, PCO_2 , ecc.) sono costanti (sistema chiuso). Nell'ambiente carsico un'acqua sovratura quasi sempre indica che le condizioni al contorno si sono significativamente modificate (sistema aperto) (Ford & Williams, 1989).

In un modello concettuale semplificato della circolazione delle acque nell'ambiente carsico ci possono essere due casi antitetici. In un sistema carsico autogenico (circolazione in mezzo fessurato) il tempo di residenza e l'interazione acqua/roccia sono elevati quindi il SI è positivo e il rapporto Mg/Ca è basso. In un sistema allogeno (circolazione in condotti carsici) i tempi e le interazioni sono bassi e questo implica SI negativo e Mg/Ca alto.

Per il calcolo del SI della calcite è stato utilizzato il software PHREEQC 2.11 (Parkhurst & Appelo, 1999) sviluppato specificamente per la modellistica geochemica e i calcoli di speciazione in fase acquosa.

Quadro idrogeologico

La catena del Gran Sasso è identificabile con un sistema idrogeologico, di tipo calcareo-carsico-compartimentato. Rappresenta uno degli acquiferi carbonatici più significativi dell'Italia centro-meridionale per la cospicua entità delle risorse idriche disponibili e per l'interazione tra falda e opere in sottterraneo. Il Gran Sasso (Fig. 1) contiene un'unica falda regionale di notevole estensione caratterizzata da un drenaggio centrifugo con gradienti idraulici di 5-20‰. Questa alimenta alla sua periferia importanti sorgenti a bassa quota, sul lato meridionale e, in minore misura, ad alta quota, sul lato settentrionale. Inoltre, a quota medio-alta sono presenti sorgenti minori a regime variabile e portate limitate alimentate da falde sospese. La portata complessiva erogata dal sistema idrogeologico è stata valutata da studi precedenti in circa 18-25 m³/s (Celico, 1983), che giustifica la stima di 700 mm/anno dell'infiltrazione efficace (Boni et alii, 1986).

La realizzazione dei tunnel autostradali ha ovviamente comportato una serie di interferenze con l'assetto idrogeologico del Gran Sasso che si sono rilevate estremamente importanti già nel corso del loro scavo. Il decremento complessivo delle sorgenti deve essere, almeno in parte, attribuito ad una riduzione delle precipitazioni sul Gran Sasso, come dimostrato da una diminuzione media negativa, nel periodo 1960-1994, pari allo 0,7%. In

definitiva, le interpretazioni idrogeologiche relative alle variazioni indotte dalla realizzazione del traforo (Massoli-Novelli & Petitta, 1997) indicano che l'acquifero del Gran Sasso ha reagito alla sollecitazione indotta dal drenaggio dei trafori, dapprima modificando rapidamente il proprio assetto idrodinamico (regime transitorio), erogando notevoli quantità d'acqua sotterranea dai drenaggi, a discapito di riserve permanenti e quindi non rinnovabili.

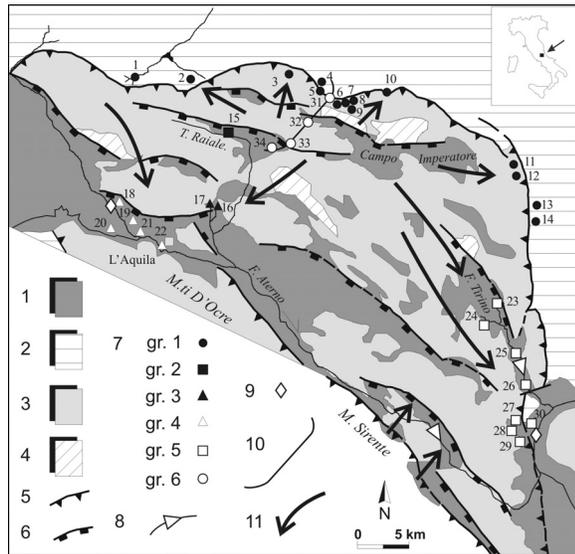


Fig. 1 - Sistema idrogeologico del Gran Sasso. 1 - acquitardo depositi clastici continentali delle conche intramontane, Quaternario); 2 - acquicludo (depositi terrigeni torbiditici di avanfossa, Mio-Pliocene); 3 - acquifero (successioni carbonatiche di piattaforma e di transizione al bacino, Meso-Cenozoico); 4 - substrato a bassa permeabilità (dolomie, Triassico sup.); 5 - sovrascorrimento; 6 - faglia distensiva; 7 - punto di campionamento (sorgente, pozzo, incremento in alveo: 1 - Sorg. Vomano, 2- Sorg. Chiarino, 3 - Sorg. Rio Arno, 4- Sorg. S. Nicola I, 5- Sorg. S. Vittore I, 6- Sorg. S. Vittore II, 7- Sorg. Acqua Zeta, 8- Sorg. Lama Bianca, 9- Sorg. Fiumette, 10- Sorg. Ruzzo, 11- Sorg. Vitella d'Oro, 12- Sorg. Mortaio d'Angri, 13- Sorg. Rivo Chiaro, 14- Sorg. Gravarò, 15- Sorg. S. Maria, 16- Sorg. Vera, 17- Sorg. Tempera, 18- campo pozzi di Acqua Oria, 19- Sorg. Vetoio, 20- Sorg. Boschetto, 21- Sorg. Casa Buccella, 22- Sorg. 99 cannelle, 23- Sorg. Capo d'Acqua, 24- Sorg. Presciano, 25- Medio Tirino (incremento in alveo), 26- Sorg. Basso Tirino, 27- Sorg. S. Calisto, 28- Sorg. S. Liberata, 29- Sorg. Capo Pescara, 30- campo pozzi Acqua Guizza di Popoli, 31- uscita lato Teramo laboratori INFN, 32- Camera dei drenaggi, 33- Vallefredda, 34- Impianto di Assergi - drenaggio lato L'Aquila); 8- incremento in alveo; 9- campo pozzi; 10- galleria autostradale; 11- direzione di deflusso delle acque sotterranee (modificato da Barbieri et alii, 2005).

Gran Sasso hydrogeological system (Central Italy). 1 - aquitard (continental clastic deposits of intramontane basins, Quaternary); 2 - aquiclude (terrigenous turbidites, Mio-Pliocene); 3 - aquifer (carbonatic sequences of platform - reef included - and slope to basin lithofacies, Meso-Cenozoic); 4 - low permeability substratum (dolomite, upper Triassic); 5 - overthrust; 6 - normal fault; 7 - groundwater sampling point (spring, linear spring, well field); 8 - linear spring; 9 - well field; 10 - highway tunnel; 11 - groundwater flowpath (modified from Barbieri et alii, 2005).

Successivamente, l'acquifero si è adattato alla presenza di due nuove "sorgenti", rappresentate dal drenaggio dei tunnel, identificabili come punti a potenziale imposto, sino a raggiungere dopo qualche anno un nuovo equilibrio idrodinamico (regime permanente), che corrisponde alla situazione attuale.

Il Gran Sasso è stato oggetto in questi ultimi anni di una serie di lavori a carattere locale o regionale idrogeologico e idrochimico che hanno permesso di creare un quadro di riferimento che ha permesso tra l'altro di distinguere le principali sorgenti del Gran Sasso in sei gruppi (Figura 1) (Petitta & Tallini, 2002). Tale classificazione è stata utilizzata come base per lo studio di alcuni parametri idrochimici sensibili alle modificazioni dei processi di interazione acqua-roccia: l'indice di saturazione della calcite il rapporto Mg/Ca e il pH.

Le sorgenti del gruppo 1, in quota sul versante teramano sono caratterizzate dallo sfioro per trabocco della falda regionale; è comunque presente, in altre sorgenti del gruppo, un contributo di acque legate a percorsi più brevi e superficiali. Nel gruppo 2 sono inserite le sorgenti legate a falde locali sospese ubicate sul versante aquilano. Le sorgenti Vera e Tempera appartengono al gruppo 3 e sono le emergenze principali della falda regionale; l'alimentazione proviene direttamente dalla falda regionale, in assenza di fenomeni di miscibilità con acque più superficiali, ma anche con scarse interazioni acqua-roccia rispetto al cuore del massiccio (gruppo 6). Le sorgenti del gruppo 4 rappresentano lo sfioro della falda regionale nella piana dell'Aquila (Vetoio, Boschetto, Acqua Oria), dove avvengono miscele con le falde superficiali multistrato contenute nei depositi clastici continentali (gruppo sorgivo delle 99 cannelle). Le acque dei bacini dei Fiumi Pescara e Tirino sono alimentate dalle sorgenti del gruppo 5 (Capo d'Acqua, Presciano, medio e basso Tirino, S. Calisto, Capo Pescara): tali sorgenti rappresentano il drenaggio ultimo della falda regionale, tramite lo sfioro alle quote più basse con portate notevoli e costanti nel tempo. Le acque sotterranee provenienti dal traforo (gruppo 6) rappresentano il contributo del nucleo dell'acquifero, nella zona della falda regionale direttamente alimentata dalle acque di infiltrazione carsica (attraversamento verticale del mezzo non saturo).

Discussione dei risultati

Sulla base del quadro idrogeologico di riferimento si è cercato di mettere in evidenza se la realizzazione delle gallerie abbia comportato alterazioni al tipo di drenaggio che le acque delle varie sorgenti hanno subito considerando i tempi di residenza e il tipo di interazione acqua-roccia e di litologia attraversata. Sono stati selezionati, come parametri idrochimici ritenuti sensibili alle variazioni dell'ambiente idrogeologico, il SI della calcite, il rapporto Mg/Ca e il pH.

Quindi è stato eseguito il confronto di questi parametri calcolati nei diversi periodi di riferimento, cioè prima e

Tab. 1 – Rapporto Mg/Ca (periodo 1971-76).
Mg/Ca ratio (1971-76 period).

SORGENTE	N° oss.	Media	Max	Min	Dev. Std.	Amp. campo
S. Nicola I	16	0.27	0.57	0.08	0.13	0.49
S. Vittore I	17	0.37	0.85	0.15	0.16	0.70
Fiumette	18	0.40	0.59	0.10	0.12	0.50
S. Vittore II	18	0.37	0.49	0.23	0.08	0.27
Acqua Zeta	12	0.38	0.53	0.10	0.11	0.44
Lama Bianca	17	0.52	0.83	0.28	0.14	0.55
Vallefredda	15	0.71	1.48	0.11	0.31	1.37
Tempera	23	0.47	0.64	0.32	0.08	0.32
Vera	28	0.50	0.78	0.07	0.14	0.71
Presciano	14	0.40	0.69	0.29	0.12	0.40
Capodacqua	16	0.38	1.07	0.16	0.19	0.91
Capopescara	15	0.80	0.88	0.66	0.05	0.23

Tab. 2 – Rapporto Mg/Ca (periodo 2000-04).
Mg/Ca ratio (2000-04 period).

SORGENTE	N° oss.	Media	Max	Min	Dev. Std.	Amp. campo
Charino	8	0.1588	0.2659	0.0577	0.08	0.2082
Vomano	3	0.0554	0.0797	0.0380	0.02	0.0417
Santa Maria	2	0.0960	0.0960	0.0960	0.00	0.0000
uscita lab INFN	4	0.4754	0.4907	0.4545	0.02	0.0361
Camera dei drenaggi Impianto Assergi	9	0.5169	0.5536	0.4790	0.03	0.0746
Rivo Chiaro	3	0.1224	0.1538	0.0883	0.03	0.0655
Gravaro	3	0.1337	0.1408	0.1250	0.01	0.0158
Acqua Oria	6	0.2186	0.2627	0.1972	0.02	0.0655
Mortaio d'Angri	6	0.2784	0.3191	0.1969	0.04	0.1223
Vitelladoro	5	0.1748	0.2381	0.0911	0.07	0.1470
Tempera	9	0.3036	0.3428	0.0755	0.04	0.2673
Vera	8	0.3127	0.3330	0.0703	0.02	0.2628
Vetoio	5	0.1729	0.1827	0.1618	0.01	0.0209
Boschetto	2	0.1607	0.1733	0.1481	0.02	0.0253
Basso Tirino	8	0.1905	0.2398	0.0516	0.06	0.1882
Presciano	10	0.2301	0.2617	0.1928	0.02	0.0689
S Calisto	8	0.2320	0.3115	0.1485	0.06	0.1630
Medio Tirino	3	0.2184	0.2208	0.2159	0.00	0.0049
Capodacqua	9	0.2270	0.2584	0.2032	0.02	0.0552
Capopescara	10	0.2449	0.3729	0.1825	0.06	0.1903
S. Liberata	3	0.2224	0.2500	0.1847	0.03	0.0652

dopo la realizzazione delle gallerie.

I dati chimico-fisici e idrochimici analizzati per le diverse sorgenti sono stati suddivisi in due raggruppamenti a seconda del periodo al quale si riferiscono: in particolare

Tab. 3 – Saturation Index della calcite (periodo 1971-76).
Saturation Index of calcite (1971-76 period).

SORGENTE	N° oss.	Media	Max	Min	Dev. Std.	Amp. campo
S. Nicola I	14	0.76	1.32	0.36	0.24	0.96
S. Vittore I	15	0.45	1.17	0.09	0.30	1.08
Fiumette	14	0.92	1.51	-0.47	0.54	1.98
S. Vittore II	16	0.62	1.42	-0.02	0.38	1.44
Acqua Zeta	11	0.91	1.58	0.54	0.32	1.04
Lama Bianca	12	0.70	1.52	-0.12	0.47	1.64
Vallefredda	4	0.31	1.11	-0.26	0.67	1.37
Tempera	16	0.05	0.38	-0.20	0.15	0.58
Vera	22	-0.04	0.35	-0.46	0.17	0.81
Presciano	12	-0.01	0.47	-0.46	0.27	0.93
Capodacqua	13	-0.02	0.29	-0.27	0.17	0.56
Capopescara	13	-0.17	0.04	-0.66	0.18	0.70

Tab. 4 – Saturation Index della calcite (periodo 2000-04).
Saturation Index of calcite (2000-04 period).

SORGENTE	N° oss.	Media	Max	Min	Dev. Std.	Amp. campo
Ruzzo	6	-0.06	0.23	-0.40	0.25	0.63
Rio Arno	5	-0.05	0.54	-0.47	0.37	1.01
Charino	8	0.06	0.66	-0.54	0.38	1.20
Vomano	3	0.17	0.32	-0.13	0.26	0.45
uscita lab INFN	2	-0.17	0.03	-0.36	0.28	0.39
Camera dei drenaggi Impianto Assergi	7	-0.52	0.02	-1.16	0.39	1.18
Acqua Oria	5	0.09	0.17	-0.05	0.09	0.22
Tempera	9	0.02	0.27	-0.41	0.21	0.68
Vera	8	-0.08	0.47	-0.50	0.32	0.97
Vetoio	11	-0.05	0.40	-0.49	0.26	0.89
Boschetto	6	0.14	0.45	-0.17	0.20	0.62
Basso Tirino	9	0.29	0.99	-0.42	0.54	1.41
Presciano	9	-0.19	0.25	-0.61	0.34	0.86
S Calisto	8	0.30	0.57	-0.08	0.22	0.65
Medio Tirino	3	-0.07	0.31	-0.28	0.33	0.59
Capodacqua	9	-0.04	0.13	-0.44	0.20	0.57
Capopescara	9	-0.03	0.34	-0.42	0.23	0.76
Gran Guizza Popoli	1	0.03	0.03	0.03		0.00
S. Liberata	3	-0.27	-0.06	-0.68	0.35	0.62

una prima serie di dati è relativa agli anni 1971-76 e un'altra al periodo a cavallo tra la fine degli anni '90 e i primi anni del 2000 (Petitta & Tallini, 2002). Un contributo notevole è stato dato anche dalle campagne di rilevamento condotte durante la realizzazione del traforo (Tallini et alii, 2001) e negli anni successivi (Barbieri et alii, 2005; Di

Sabatino et alii, 2006a; Stigliano et alii, 1999). È stata inoltre eseguita una validazione consistente dei dati tramite il bilancio delle masse e delle cariche.

Tab. 5 – pH (periodo 1971-76).
pH (1971-76 period).

SORGENTE	N° oss.	Media	Min	Max	Dev. Std.	Amp. campo
S. Nicola I	173	8.37	3.00	9.70	0.74	6.70
S. Vittore I	174	8.25	4.60	9.50	0.71	4.90
Fiumette	176	8.81	6.30	11.00	0.60	4.70
S. Vittore II	178	8.51	4.80	9.60	0.66	4.80
Acqua Zeta	174	8.53	5.90	9.60	0.57	3.70
Lama Bianca	175	8.63	5.40	9.90	0.59	4.50
Vallefredda	18	8.84	7.80	10.50	0.73	2.70
Tempera	51	7.96	7.60	8.60	0.20	1.00
Vera	69	7.88	7.50	8.50	0.18	1.00
Presciano	50	7.24	5.40	7.70	0.37	2.30
Capodacqua	50	7.24	5.40	7.70	0.37	2.30
Capopescara	49	7.14	4.10	7.50	0.47	3.40

Tab. 6 – pH (periodo 2000-04).
pH (2000-04 period).

SORGENTE	N° oss.	Media	Min	Max	Dev. Std.	Amp. campo
Charino	8	7.77	8.36	7.30	0.37	1.06
Vomano	3	7.80	8.00	7.50	0.26	0.50
Santa Maria	2	7.40	7.60	7.20	0.28	0.40
uscita lab INFN	4	8.18	8.30	8.00	0.13	0.30
Camera dei drenaggi Impianto Assergi	8	7.78	8.11	7.50	0.22	0.61
Rivo Chiaro	3	7.93	8.00	7.90	0.06	0.10
Gravaro	3	7.93	8.20	7.80	0.23	0.40
Acqua Oria	6	7.48	7.69	7.06	0.22	0.63
Mortaio d'Angri	7	7.89	8.46	7.24	0.39	1.22
Vitelladoro	6	7.87	8.22	7.50	0.31	0.72
Tempera	10	7.83	8.12	7.26	0.25	0.86
Vera	9	7.74	8.26	7.40	0.30	0.86
Vetoio	10	7.47	7.77	6.96	0.24	0.81
Boschetto	6	7.63	7.90	7.35	0.18	0.55
Basso Tirino	8	7.58	8.28	6.90	0.50	1.38
Presciano	10	7.21	7.50	6.80	0.26	0.70
S Calisto	8	7.70	7.85	7.47	0.15	0.38
Medio Tirino	3	7.27	7.60	7.10	0.29	0.50
Capodacqua	10	7.27	7.50	7.00	0.19	0.50
Capopescara	10	7.29	7.52	6.91	0.18	0.61
S. Liberata	3	7.24	7.46	6.83	0.36	0.63

In totale sono stati quindi considerati 333 valori del rapporto Mg/Ca (Tabb. 1 e 2), 283 SI della calcite (Tabb. 3 e 4) e 1337 valori del pH (Tabb. 5 e 6).

L'andamento del SI della calcite delle acque sorgive è congruente con i raggruppamenti delle sorgenti del quadro idrogeologico di riferimento (Petitta & Tallini, 2002). Si notano per esempio analoghi trend per le sorgenti del gruppo 1 e 5 (Figg. 2 e 3). Ragionare quindi in termini di gruppi di sorgenti ha una sua logica utile nel confrontare in modo sintetico un gran numero di dati idrochimici di periodi differenti.

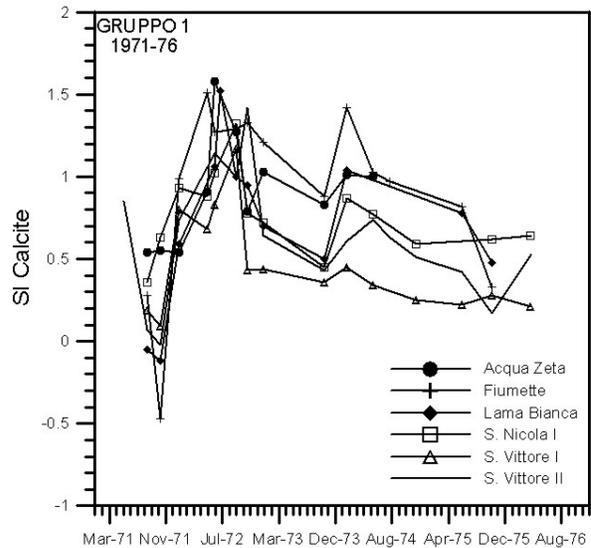


Fig. 2 - Andamento nel tempo (1971-76) del SI della calcite delle sorgenti del gruppo 1.
SI of calcite vs. time (group 1 - 1971-76 period).

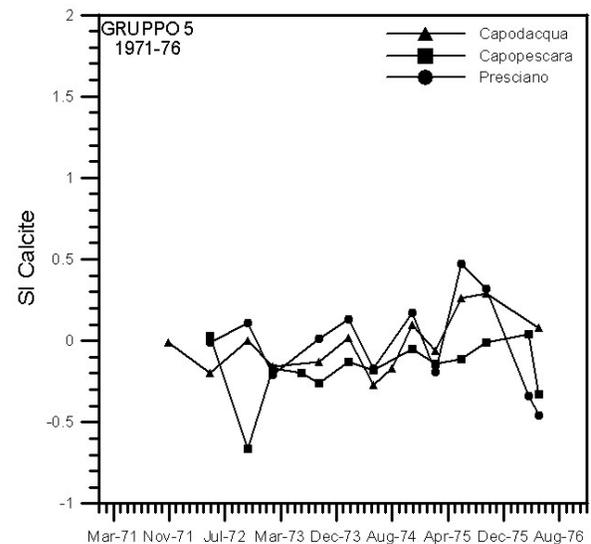


Fig. 3 - Andamento nel tempo (1971-76) del SI della calcite delle sorgenti del gruppo 5.
SI of calcite vs. time (group 5 - 1971-76 period).

Le acque campionate in galleria (gruppo 6) mostrano valori del rapporto Mg/Ca, del SI della calcite e del pH notevolmente diversi se riferiti ai due periodi (Figg. 4 e 5). Questo è dovuto al fatto che le acque campionate in galleria durante lo scavo possono essere considerate delle acque “bloccate” negli acquiferi locali e quindi in un certo qual modo “connate, vecchie”, con alti tempi di residenza e vistosi fenomeni di interazione acqua-roccia. Invece le stesse acque campionate negli anni 2000’ dopo la realizzazione della galleria sono acque immature chimicamente (bassi tempi di residenza e limitati fenomeni di interazione acqua-roccia) che hanno attraversato unicamente con movimenti verticali il non saturo (drenaggio attivo).

Sempre per il gruppo 6, prima e dopo la realizzazione delle gallerie il pH passa da valori molto alti e dispersi (da 8 a 10.5) a più bassi e costanti (da 7.5 a 8.5), ma sempre più elevati di quelli delle sorgenti e il rapporto Mg/Ca e il SI della calcite passano da valori molto dispersi ad altri più costanti. La dispersione dei valori dei parametri in questione relativi alle acque campionate durante lo scavo delle gallerie è probabilmente da imputare ad un’interazione prolungata con rocce dolomitiche presenti nel nucleo dell’acquifero e ad una compartimentazione in acquiferi locali come dimostrato dal caso della faglia di Valle Fredda. Negli anni 2000 i parametri idrochimici considerati hanno assunto valori costanti evidenziando probabilmente una circolazione attiva attraverso gli stessi settori nel non saturo.

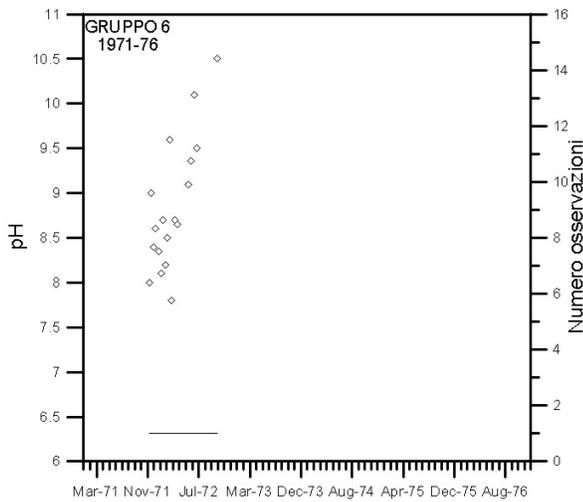


Fig. 4 - Andamento nel tempo (1971-76) del pH delle acque campionate in galleria durante lo scavo.
pH of water sampled in the tunnels during their boring vs. time.

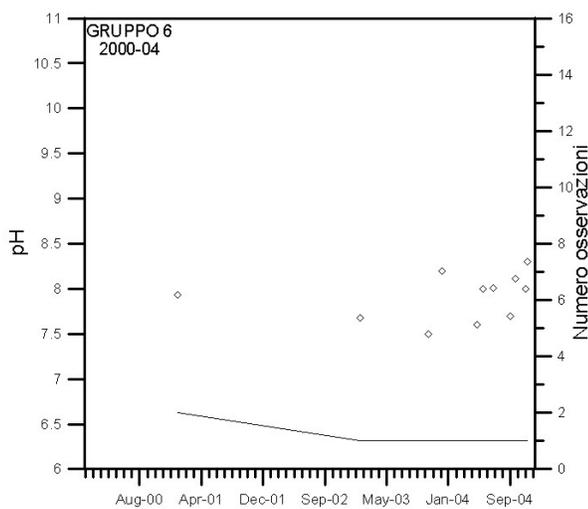


Fig. 5 - Andamento nel tempo (2000-04) del pH delle acque campionate in galleria (gruppo 6).
pH of water sampled in the tunnels vs. time (2000-04).

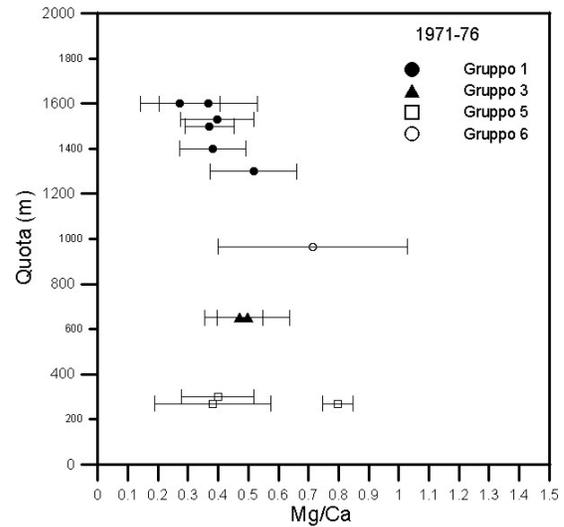


Fig. 6 - Diagramma quota - rapporto Mg/Ca medio (periodo 71-76).
Altitude vs. mean Mg/Ca ratio (1971-76 period).

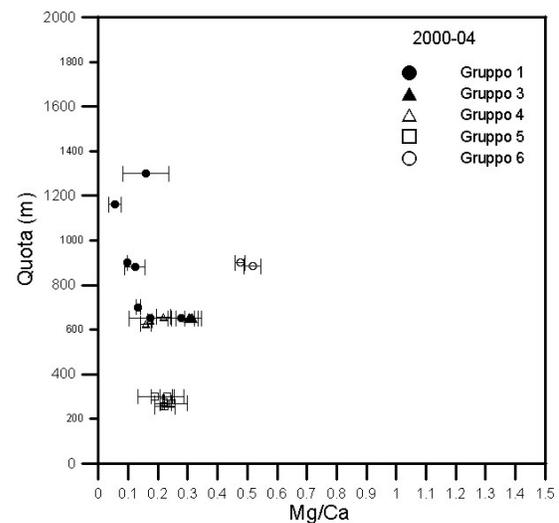


Fig. 7 - Diagramma quota - rapporto Mg/Ca medio (periodo 2000-2004).
Altitude vs. mean Mg/Ca ratio (2000-2004 period).

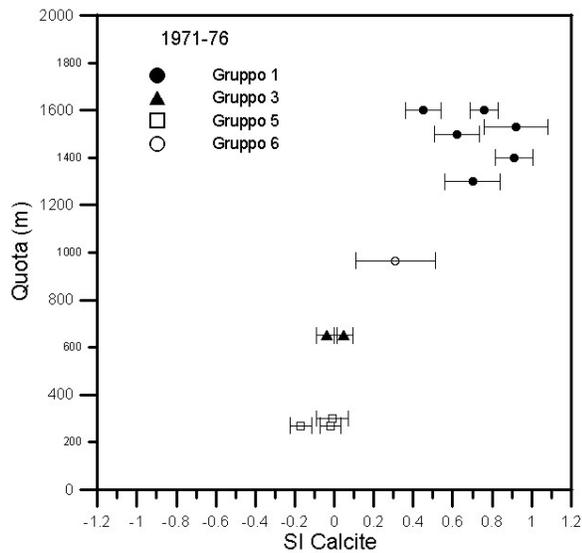


Fig. 8 - Diagramma quota - SI della calcite medio (periodo 71-76).
Altitude vs. mean SI of calcite (1971-76 period).

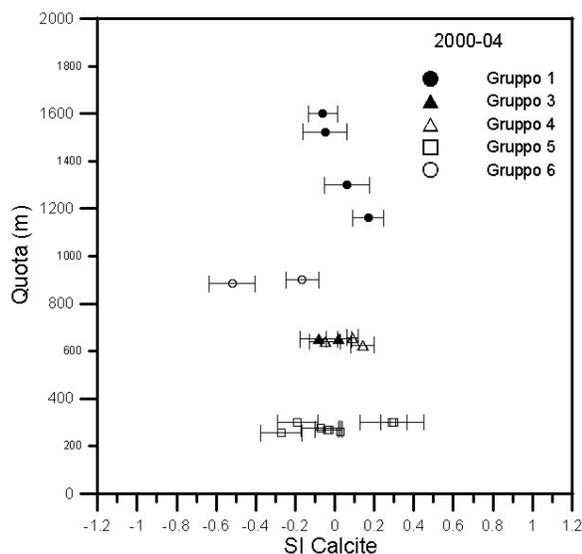


Fig. 9 - Diagramma quota - SI della calcite medio (periodo 2000-2004).
Altitude vs. mean SI of calcite (2000-2004 period).

Analogamente al comportamento della conducibilità elettrica e della temperatura (Tallini et alii, 2001) anche il pH, il rapporto Mg/Ca e il SI della calcite delle sorgenti possono essere considerati dei traccianti idrochimici. Anche se gli andamenti nel tempo possono differire per i diversi gruppi sorgivi i valori medi sono abbastanza costanti e variano da un gruppo sorgivo all'altro. Nelle Figg. 6, 7, 8, 9, 10 e 11 si osservano dei trend caratteristici: a partire dalle acque meno evolute chimicamente della falda regionale, cioè quelle del nucleo dell'acquifero, campionate in galleria, si passa alle altre dei differenti gruppi sorgivi. Via via che le acque si muovono nell'acquifero con un drenaggio centrifugo dal nucleo (acque campionate in

galleria: gruppo 6) verso le zone periferiche (dalle sorgenti del gruppo 3 a quelle del gruppo 5), aumentano i tempi di residenza e le interazioni acqua-roccia, e questo induce delle modificazioni sulle caratteristiche fisiche e chimiche delle acque. Il processo primario a cui sono soggette le acque sotterranee è ovviamente il loro riscaldamento progressivo, aumentando la lunghezza dei percorsi, che si manifesta con valori di temperatura via via crescenti in funzione della quota della sorgente (Petitta & Tallini, 2001). D'altra parte è la temperatura che governa le reazioni di equilibrio principali nelle acque bicarbonato alcalino-terrose della falda regionale del Gran Sasso e che quindi condiziona i valori degli altri parametri considerati. Sorgenti a quote più basse indicano percorsi nell'acquifero più lunghi e temperature delle acque sorgive maggiori a cui corrispondono valori del pH, del rapporto Mg/Ca e del SI della calcite minori. Ciò è in accordo con i dati sperimentali: le variazioni positive del pH, del rapporto Mg/Ca e del SI della calcite sono correlate inversamente a quelle della temperatura (Ford & Williams, 1989).

Le sorgenti del gruppo 1, di trabocco del culmine della falda sul lato teramano, hanno valori del pH e del rapporto Mg/Ca leggermente inferiori a quelle del nucleo dell'acquifero (Figg. 10 e 11) evidenziando un'evoluzione idrochimica legata a percorsi rapidi. Il SI della calcite invece (Figg. 8 e 9) mostra valori più elevati di quelli del nucleo dell'acquifero (gruppo 6) legati alla miscelazione fra le acque della falda regionale con altre acque di circolazione superficiale che subiscono fenomeni di lisciviazione di sali solubili durante periodi immediatamente successivi a periodi siccitosi (Di Sabatino, 2006b).

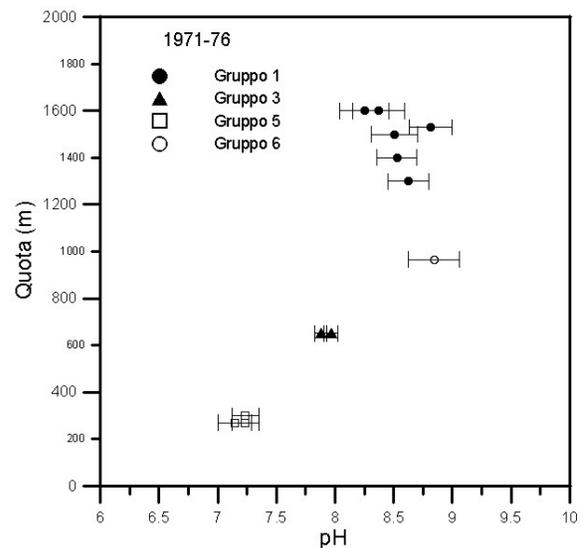


Fig. 10 - Diagramma quota - pH medio (periodo 1971-76).
Altitude vs. mean pH (1971-76 period).

Nei diagrammi quota - rapporto Mg/Ca dei due periodi (pre e post realizzazione delle gallerie) si notano le differenze maggiori rispetto agli altri parametri (Figg. 6 e

7). Per i gruppi 6, 3 e 5 si nota una diminuzione di circa 0,2 dal periodo 1971-76 a quello 2000-2004, mentre per il gruppo 1 la riduzione è anche di 0,3-0,5.

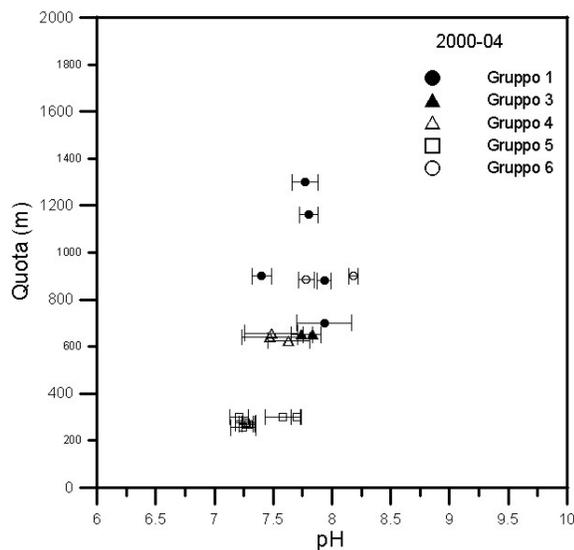


Fig. 11 - Diagramma quota - pH medio (periodo 2000-2004).
Altitude vs. mean pH (2000-2004 period).

Il SI della calcite si riduce dal periodo 1971-76 a quello 2000-2004 in maniera consistente per i gruppi 1 e 6, mentre per i gruppi 3 e 5 i valori del SI rimangono costanti. Per i gruppi 1 (trabocco del culmine della falda regionale) e 6 (acque campionate in galleria) le acque da sovrassature diventano sature o sottosature evidenziando una modificazione e riduzione, con l'abbattimento della falda legata allo scavo delle gallerie nel settore sovrastante ed in asse con queste ultime, dei percorsi delle acque sotterranee. Alle variazioni dei parametri idrochimici per il gruppo 1 si associa una notevole riduzione delle portate con addirittura il prosciugamento di alcune sorgenti (Tallini et alii, 2001). Per le sorgenti 3 e 5 il SI della calcite rimane costante nel tempo con valori intorno allo 0,0; queste acque sono sature o leggermente sottosature evidenziando condizioni idrochimiche in un sistema quasi chiuso con aree di alimentazione delle sorgenti molto estese. Inoltre il fatto che i SI della calcite siano costanti indicherebbe che le analisi chimiche eseguite a distanza di 30 anni da laboratori e strumentazioni differenti sono del tutto attendibili.

Anche i valori del pH dei periodi 1971-76 e 2000-2004 (Fig. 10 e 11) sono confrontabili con quelli del SI della calcite: i gruppi 1 e 6 riducono i propri valori, quelli dei gruppi 3 e 5 rimangono costanti.

Ad una riduzione delle portate, a causa della realizzazione delle gallerie, per il gruppo 1 del 45%, per il gruppo 3 del 42% e per il gruppo 5 del 13% (Celico et alii, 2005) solo i parametri idrochimici considerati del gruppo 1 hanno subito importanti variazioni, mentre per i restanti 3 e 5 il SI della calcite e il pH sono rimasti costanti. Per tutti i gruppi il rapporto Mg/Ca si riduce sensibilmente.

Conclusioni e prospettive

Al fine di valutare eventuali modificazioni nei percorsi delle acque sotterranee causate dallo scavo delle gallerie autostradali nell'acquifero del Gran Sasso è stato tentato un confronto dei parametri idrochimici, quali il rapporto Mg/Ca, il SI della calcite e il pH delle acque sorgive. I risultati preliminari qui presentati si sono dimostrati incoraggianti per futuri approfondimenti nell'ambito della modellazione geochemica delle fasi acquose. È stato infatti notato che solamente le acque campionate in galleria, prima e dopo lo scavo, presentano notevoli differenze nei parametri idrochimici considerati: prima dello scavo le acque sono sovrassature, fortemente basiche e con alti valori del rapporto Mg/Ca, dopo, negli anni 2000', le acque sono sature o leggermente sottosature, e hanno pH e rapporti Mg/Ca più bassi. Inoltre solo le sorgenti del gruppo 1, quelle di trabocco sul lato teramano del culmine della falda regionale, oltre ad avere subito un decremento del 45% nelle portate presentano una variazione dei parametri considerati analogamente a quanto detto per il gruppo 6.

Le sorgenti del gruppo 3 e 5, risultato dello sfioro a quote via via più basse della falda regionale, invece non presentano una variazione consistente nel tempo del SI della calcite e del pH, mentre hanno evidenziato una riduzione delle portate del 42% e 13% rispettivamente. Quindi le sorgenti del gruppo 3 (Vera e Tempera), ubicate anch'esse come quelle del gruppo 1 in asse con le gallerie ma dal lato aquilano, non hanno registrato dal punto di vista idrochimico le modificazioni nella circolazione sotterranea che dovrebbero essersi realizzate così come dimostrato dalla drastica riduzione della portata.

In definitiva i gruppi sorgivi 1 (lato teramano) e 3 (lato aquilano), ambedue in asse con le gallerie, hanno mostrato un diverso comportamento portate-chimismo: per il gruppo 1 ad una forte riduzione delle portate è corrisposta una notevole variazione dei parametri chimici considerati, mentre per il gruppo 3 i parametri idrochimici non sono riusciti a testimoniare ipotizzabili modificazioni della circolazione. Questa incongruenza può essere spiegata con la diversa estensione dei bacini di alimentazione dei due gruppi sorgivi più limitati per le sorgenti del gruppo 1, molto più estesi per le sorgenti Vera e Tempera (gruppo 3) e facendo riferimento ai complessi fenomeni di interazione acqua-roccia e di trasporto di massa e di specie chimiche nelle acque sotterranee.

Il proseguo delle attività sarà indirizzato all'individuazione delle possibili cause responsabili delle variazioni dei parametri considerati (Mg/Ca, SI della calcite e pH) caratterizzanti le complesse fenomenologie in atto all'interno dell'acquifero del Gran Sasso (per esempio il rapporto Cl/SO₄ e l'indice di saturazione della dolomite) e ad una più spinta modellazione geochemica tramite software più specifici.

Bibliografia

- Appelo, C.A.J., Postma D., 1993. *Geochemistry, Groundwater and Pollution*. Balkema, Rotterdam, pp. 526.
- Barbieri, M., Boschetti, T., Petitta, M., Tallini, M., 2005. Stable isotopes (^2H , ^{18}O and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) and hydrochemistry monitoring for groundwater hydrodynamics analysis in a karst aquifer (Gran Sasso, Central Italy). *Applied Geochemistry*, 20(11), 2063-2081.
- Boni, C., Bono, P., Capelli, G., 1986. Schema idrogeologico dell'Italia Centrale. *Mem. Soc. Geol. It.*, 35, 991-1012.
- Celico P., Fabbrocino S., Petitta M. & Tallini M. (2005) - Hydrogeological impact of the Gran Sasso motor-way tunnels (Central Italy). *Giornale di Geologia Applicata* 1, 159 – 165.
- Celico, P., 1983. Idrogeologia dei massicci carbonatici, delle piane quaternarie e delle aree vulcaniche dell'Italia centro-meridionale: Progetti speciali per gli schemi idrici nel Mezzogiorno. *Quad. Cassa Mezzog.*, 4/2, 1-225.
- Di Sabatino, V., Manetta, M., Sciannamblo, D., Spizzico, M., Tallini, M., 2006a. Caratterizzazione del circuito delle acque sotterranee degli acquiferi carsici tramite lo studio del contenuto in Radon delle sorgenti del Gran Sasso (Italia centrale). Questo volume.
- Di Sabatino, V., Manetta, M., Sciannamblo, D., Spizzico, M., Tallini, M., 2006b. Il radon come tracciante delle acque sorgive finalizzato alla vulnerabilità degli acquiferi carbonatici complessi: l'esempio del gruppo sorgivo del Rio Arno (Gran Sasso, Italia centrale). Questo volume.
- Ford, D., Williams, P., 1989. *Karst Geomorphology and Hydrology*. Chapman & Hall, London, pp. 601.
- Langmuir, D., 1971. The geochemistry of some carbonate groundwaters in central Pennsylvania. *Geochim. Et Cosmochim. Acta*, 35, 1023-1045.
- Massoli-Novelli, R., Petitta, M., 1997. Hydrogeological impact of the Gran Sasso tunnels (Abruzzi, Italy). In: Marinis P.G., Koukis G.C., Tsiambaos G.C. & Stournaras G.C. Eds., *Engineering Geology and the Environment*, 3, 2787-2792. Balkema, Rotterdam.
- Parkhurst, D. L., Appelo, C. A. J., 1999. User's guide to PHREEQC (version 2) - A computer program for speciation, batch reaction, one-dimensional transport and inverse geochemical calculations. U.S. Geological Survey, Water Resources Investigations Report 95-4259, Denver, Colorado, pp. 312.
- Petitta, M., Tallini, M., 2002. Idrodinamica sotterranea del massiccio del Gran Sasso (Abruzzo): nuove indagini idrologiche, idrogeologiche e idrochimiche (1994-2001). *Boll. Soc. Geol. It.*, 121(3), 343-363.
- Stigliano, P., Altieri, A., Barberi, R., De Caterini, G., Massoli-Novelli, R., Miccadei, E., Piacentini, T., Petitta, M., Salvati, R., 1999. Studi per un monitoraggio idrologico del massiccio del Gran Sasso (Abruzzo). *Studi Geologici Camerti*, vol.spec. 1999, 153-170.
- Tallini, M., Petitta, M., Ranalli, D., 2001. Caratterizzazione chimico-fisica e idrologica delle acque sotterranee del Gran Sasso. "Monitoraggio biologico del Gran Sasso", B. Cicolani (a cura di), vol 2°, 226-276.