

S. GRASSI (*) E S. ROSSI (**)

IL CLORO DELLE ACQUE SOTTERRANEE DELLA PIANURA DI PISA

Riassunto - Fra l'agosto ed il settembre 1994, sono stati campionati circa 50 pozzi per acqua della pianura pisana con profondità comprese fra 25 e 220 m ed ubicati prevalentemente nella zona a nord dell'Arno. I dati geochemici (conducibilità elettrica, Cl, Br e ^{18}O) acquisiti mettono in evidenza la presenza di acque relativamente saline e ricche in Cl, localizzate principalmente in un'area che si estende dalla periferia NO di Pisa fin quasi alle pendici del M. Pisano. I parametri geochemici indicano che le acque emunte sia dagli acquiferi profondi (> 100 m) che intermedi (< 100m) sono il prodotto del miscelamento fra acqua meteorica, con quota di alimentazione intorno ai 250 m s.l.m., e acqua più salina, ricca in Cl ed isotopicamente più pesante. La relazione Cl/Br evidenzia per questi ioni un'origine certamente marina. Tuttavia i dati Cl- ^{18}O suggeriscono che il termine salino non sia acqua di mare franca, ma piuttosto una sua miscela con acque continentali, in rapporto circa di 1 a 6. Quest'acqua potrebbe derivare dalla penetrazione nel sistema acquifero di acque d'Arno miscelate con acqua di mare, oppure da residui di acque lagunari diluite o palustri, la cui presenza ha a lungo caratterizzato la pianura Pisana.

Parole chiave - Idrogeologia, geochemica, isotopi stabili.

Abstract - Chlorine in groundwater of the Pisa plain. About 50 water wells with depths between 25 and 220 m, located in the Pisan plain mainly north to the Arno river, were sampled in the period August - September 1994. The geochemical data (electric conductivity, Cl, Br, ^{18}O) highlight the existence of relatively saline, Cl rich waters from wells mainly placed between the north western periphery of the town of Pisa and the foot of the Pisan Mountain. Based on the geochemical features, the waters both from deep (> 100m) and intermediate (< 100m) aquifers may be the result of the mixing between meteoric water, recharged at an elevation of about 250 m a.s.l., and a more saline, Cl rich and isotopically heavier water. The Cl/Br ratio indicates that these ions originate from the sea. However, the saline end member does not appear to be sea-water, but a mixture of sea water and continental water in a ratio 1 to 6, as indicated by Cl and ^{18}O data. This water could derive from an inflow to the aquifer system of a mixture of waters from the Arno river and sea-water, or from remnants of diluted lagoonal or marshy waters. These waters have been persisting through the Pisan plain for a long time.

Key words - Hydrogeology, geochemistry, stable isotopes

INTRODUZIONE

Vari lavori sono stati recentemente pubblicati sulle caratteristiche idrogeologiche della pianura di Pisa (Baldacci *et al.*, 1994; Rossi e Spandre, 1994, 1995), che vanno ad integrare le conoscenze di carattere geologico e idrogeologico già esistenti su questa zona (Trevisan e Tongiorgi, 1953; Dini, 1976; Fancelli, 1984 a, b; Fancelli *et al.* 1986; Della Rocca *et al.*, 1987). Una caratteristica degli acquiferi pleistocenici della pianura pisana spesso segnalata è la presenza di acque con conducibilità di 3000-4000 μScm^{-1} e significativi contenuti in Cl. Queste acque relativamente saline non sono presenti esclusivamente entro la zona costiera, dove sono documentati locali fenomeni di ingressione marina (Rossi e Spandre, 1994), ma si ritrovano con concentrazioni in Cl di circa 700-800 mg/l (Dini, 1976; Rossi e Spandre, 1995) anche a NO della città di Pisa, a circa 8 km dalla costa.

Varie le ipotesi formulate per spiegare l'origine di queste acque: la possibile lisciviazione di depositi di ambiente salmastro o marino, la presenza di paleoacque lagunari, l'esistenza di fenomeni di drenanza di falde freatiche a loro volta inquinate da ingressione marina o da apporti antropici.

Nel presente lavoro, che fa parte di uno studio tuttora in corso sull'idrotermalismo della pianura pisana, vengono presentati alcuni risultati relativi alle caratteristiche geochemiche delle acque sotterranee, emersi da una indagine condotta sui fluidi erogati da circa 50 pozzi situati nei dintorni di Pisa. La Figura 1 riporta la posizione dell'area di studio e l'ubicazione dei pozzi considerati, che hanno profondità compresa fra 25 e 220 m.

Sebbene le osservazioni condotte si riferiscano ad una zona ristretta della pianura e limitati siano i parametri geochemici presi in considerazione (conducibilità Cl, Br e ^{18}O), i dati acquisiti forniscono interessanti indicazioni sulla circolazione idrica sotterranea nella pianura pisana e sulla possibile origine del Cl.

CENNI SULL'EVOLUZIONE DELLA PIANURA

La pianura pisana si origina dal riempimento di una depressione tettonica sub-trapezoidale, situata sul

(*) CNR- Istituto Internazionale Ricerche Geotermiche, Piazza Solferino, 2, Pisa.

(**) Contrattista CNR Istituto Internazionale Ricerche Geotermiche.

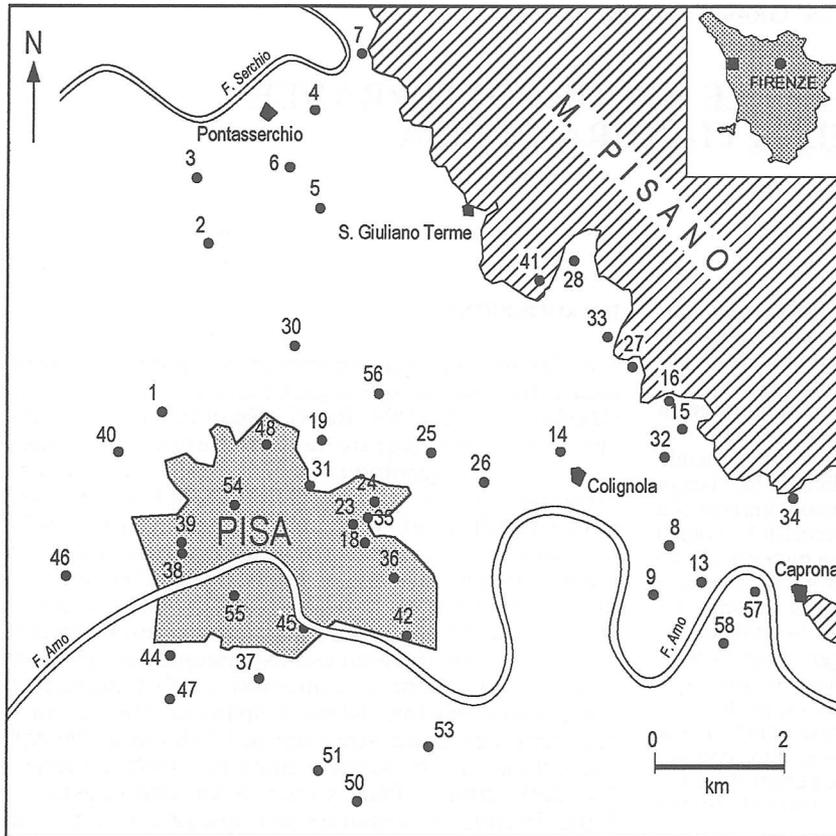


Fig. 1- Area di studio ed ubicazione pozzi con relativo numero di inventario.

prolungamento sud-orientale del graben del fiume Magra, limitata ad est dal complesso Monti Pisani-Monti d'Oltre Serchio, ad ovest dalla dorsale sommersa della Meloria e a sud dalle colline pisane. Sul substrato litoide, costituito da formazioni delle successioni toscana e/o ligure, analoghe a quelle che si rinvengono sui Monti Pisani e su quelli d'Oltre Serchio (Giannini e Nardi, 1965; Rau e Tongiorgi, 1974), si sono depositi materiali marini, lacustri e continentali in relazione ad una serie di eventi sia tettonici che climatici, che hanno interessato l'area a partire dal Miocene superiore.

A due principali fasi trasgressive (Miocene sup., Pliocene inf.), che portarono alla deposizione di conglomerati, sabbie, argille e sedimenti evaporitici, nel Pliocene medio e superiore seguì una importante fase regressiva, che portò alla completa emersione del Valdarno inferiore, all'incisione dei depositi precedenti e alla formazione di un primo reticolo idrografico del sistema Arno-Serchio.

Nel Pleistocene in Toscana sono documentate importanti oscillazioni eustatiche collegate al glacialismo. In particolare nel Pleistocene inferiore ebbe luogo la deposizione di sedimenti di ambiente prevalentemente marino e salmastro, a cui seguirono, nel Pleistocene medio e superiore, fasi di alluvionamento da parte del sistema idrografico Arno-Serchio, con la deposizione di ghiaie, sabbie limi ed argille.

Durante una fase di alluvionamento riferibile al Wurm

I (Federici e Mazzanti, 1995) si depositarono i ciottoli grossolani noti come «Conglomerati dell'Arno e del Serchio da Bientina» (Segre, 1955) costituiti da litotipi affioranti nel Monte Pisano (Gioli, 1894; Della Rocca *et al.*, 1987).

Su questi depositi si accumularono successivamente sedimenti fluvio-palustri, riconducibili ad una ridotta attività fluviale legata probabilmente sia alla cessazione dell'abbassamento eustatico del livello marino, sia ad un inaridimento del clima (Della Rocca *et al.*, 1987) culminante poi con la deposizione delle sabbie eoliche. Queste, indicative del riavvicinarsi della linea di costa, sono presenti sia nel sottosuolo che in affioramento ai margini occidentali dell'area di studio e si ricollegano, almeno parzialmente, alle dune attuali caratterizzanti la fascia costiera.

La formazione di dune e il progressivo innalzamento del livello marino, impedendo un agevole sbocco al mare dei corsi d'acqua, favorirono lo sviluppo di paludi e lagune e la deposizione di sedimenti fini con presenza di torba e lignite (Fancelli, 1984a). Tali ambienti hanno caratterizzato la pianura pisana sino in tempi storici (Della Rocca *et al.*, 1987).

IDROGEOLOGIA

Il complesso sedimentario creatosi in relazione a quanto descritto in precedenza è sede di livelli ac-

quiferi di varia importanza. La variabilità tipica di un ambiente costiero con il succedersi di facies marine, continentali e transizionali, quali quelle del substrato superiore (Fancelli *et al.*, 1986), ovvero il pacco di sedimenti posteriori al Pleistocene inferiore, si riflette in una notevole variabilità sia verticale che laterale delle granulometrie.

Nel suo insieme il sistema acquifero della pianura pisana, tralasciando i livelli più superficiali sede di falde freatiche di limitata importanza, può essere considerato come un complesso acquifero multistrato, confinato (Baldacci *et al.*, 1994). Lo schema idrogeologico generalmente accettato (Trevisan e Tongiorgi, 1953; Dini, 1976; Fancelli, 1984 a, b; Baldacci *et al.*, 1994; Rossi e Spandre, 1994, 1995) prevede in esso due principali falde idriche:

- «Prima falda artesianiana in sabbia» (Dini, 1976). Il tetto di questa falda, che si estende per buona parte della pianura, risale da profondità massime di circa 50 m procedendo dalla periferia NE della città di Pisa verso la costa dove si raccorda con le dune antiche. Nella zona a NO della città (Madonna dell'Acqua e Pontasserchio) la falda in sabbia si collega idraulicamente con depositi ghiaioso-ciottolosi di origine alluvionale trasportati dal paleo Serchio (alla profondità di circa 30-40 metri), mentre nella zona ad Est della città (tra Asciano ed Uliveto Terme) è in contatto idraulico con i depositi dei conici di deiezione sepolti, situati ai piedi dei Monti Pisani.

- «Prima falda artesianiana in ghiaia». Essa è fondamentalmente costituita dai depositi ciottolosi del «Conglomerato dell'Arno e del Serchio», che raggiunge spessori anche superiori ai 10 m. Il tetto di questa falda tende ad approfondirsi procedendo da S verso N e da E verso O. Le profondità minime (~30m) si trovano presso il margine meridionale della pianura, le massime (~180 m) presso quello nord-occidentale. L'acquifero delle ghiaie si trova intorno ai 140 m di profondità nella parte sud-occidentale della città di Pisa, mentre sembra scomparire procedendo verso nord, forse approfondendosi. I pochi pozzi relativamente profondi situati in questa zona (36, 54, 56 in fig.1) non intercettano infatti l'acquifero delle ghiaie, ma trovano sabbie a profondità comprese fra 100 e 220 m.

È difficile poter stabilire quale sia il grado di isolamento reciproco delle due falde sopra descritte, che sono comunque in contatto nella parte orientale della pianura di Pisa (Baldacci *et al.*, 1994). Data l'evoluzione paleogeografica dell'area, i setti impermeabili esistenti localmente fra i due acquiferi possono infatti sfumare lateralmente verso granulometrie più grossolane, consentendo possibili interconnessioni idrauliche.

Si ritiene che alla ricarica degli acquiferi contribuiscano le acque di infiltrazione diretta attraverso le dune costiere recenti ed antiche, gli apparati detritico-alluvionali intra-pedemontani e i depositi elico alluvionali della fascia pedecollinare meridionale. Si ritiene, inoltre, che apporti idrici alle falde provengano anche dalla Pianura dell'Arno, dalle Valli di Ripafraffa e di Bientina e, in parte, dalle strutture del M. Pisano (Baldacci *et al.*, 1994).

Scarsa o nulla è in genere considerata l'interconnessione degli acquiferi con l'Arno e il Serchio, almeno nella parte centrale della pianura.

DATI GEOCHIMICI E CARTE DI DISTRIBUZIONE

La Tabella 1 presenta alcuni dati chimici ed isotopici delle acque sotterranee campionate nel periodo agosto-settembre 1994, insieme alle profondità dei relativi pozzi. Sono inoltre riportate le caratteristiche di due campioni d'Arno prelevati in prossimità del fondo del fiume rispettivamente presso il ponte del Giardino Scotto (periferia orientale di Pisa) e verso Caprona.

Le Figure 2 e 3 presentano gli andamenti della distribuzione della conducibilità elettrica e del Cl delle acque sotterranee nell'area di studio relativamente ai pozzi con profondità fino a 100 m, che rappresentano circa il 75% del totale. Fra questi sono compresi anche i pozzi 34 e 41, che drenano acque dalle formazioni carbonatiche del M. Pisano.

Abbiamo preferito distinguere i pozzi in intermedi e profondi, assumendo arbitrariamente 100 m di profondità come limite di separazione fra due possibili circolazioni (in genere nella zona in esame, l'acquifero delle ghiaie si trova a profondità superiori ai 110-120 m), onde evitare l'utilizzo ed il confronto di dati fra loro forse disomogenei, relativi ad acque appartenenti a circuiti potenzialmente diversi. Nel contempo sono state però assunte significative interconnessioni negli acquiferi nei primi 100 m di profondità.

Le isolinee delle figure sono state tracciate automaticamente utilizzando il programma SURFER6, senza considerare la presenza dei fiumi Arno e Serchio. Nelle carte di distribuzione non è stato, inoltre, preso in considerazione il pozzo 18. Questo pozzo notevolmente salino, che oggi non è più utilizzato perché insabbiato, avrebbe alterato le distribuzioni con massimi puntuali fortemente anomali rispetto agli andamenti dell'area circostante. Probabilmente il pozzo al momento del campionamento già risentiva di un'eventuale rottura della colonna, drenando acque da un livello diverso da quello filtrato. Ciò è suggerito dal fatto che durante precedenti osservazioni (1992) la conducibilità e il contenuto in Cl dell'acqua erogata risultavano nettamente minori con valori intorno a 1300 μScm^{-1} e 300 mg/l, rispettivamente. Non si può escludere, comunque, che le variazioni riscontrate in questo pozzo possano indicare processi di progressiva penetrazione di acque più saline nell'acquifero sfruttato.

In Figura 2, la distribuzione della conducibilità mette in evidenza la presenza di una zona a curve chiuse di acque relativamente saline che, con andamento SO-NE, si estende dalla periferia nord-occidentale della città fin quasi alle pendici del Monte Pisano. Questa zona, ben definita dalle caratteristiche di almeno tre pozzi, potrebbe forse ricollegarsi al massimo relativo corrispondente al pozzo 14 situato presso Colignola. Al momento mancano punti di controllo nell'area intermedia, se si esclude il pozzo «profondo» 56. La conducibilità della zona a maggiore salinità

Tab. 1 - Elementi caratteristici dei punti d'acqua considerati.

Pozzo n°	Profondità (m da p.c.)	Conducibilità ($\mu\text{S/cm}$)	Cl (mg/l)	Br (mg/l)	$\delta^{18}\text{O}$ (‰vs.SMOW)
1	37	3490	730	3.6	-5.99
2	35	727	38	0.2	-6.04
3	33	615			
4	40	565			
5	45	3460	620	3.0	-6.04
6	30	746	33	0.1	-5.93
7	38	700	31	0.1	-5.93
8	40	290	31	0.1	-6.17
9	50	244	34	0.1	-6.14
13	65	252	37	0.1	-6.17
14	71	4230	890	4.7	-6.04
15	25	1002			
16	43	421	42	0.1	-6.38
18	70	6620	2000	8.6	-5.22
19	70	2265	290	1.4	-6.29
23	50	1623	370	1.5	-6.20
24	50	1672	380	1.5	-6.14
25	60	1629	290	1.3	-6.27
26	50	1140	170	0.8	-6.34
27	35	672	57	0.2	-5.86
28		524			
30	25	3255	610	2.9	-6.14
31	50	2085	400	1.7	-6.15
32	100	1177	120	0.4	-6.37
33	26	705			
34	50	325	29	0.1	-6.15
35	120	608	120	0.5	
36	218	827	89	0.3	-6.40
37	145	2363	500	2.0	-5.96
38	162	2366	380	1.6	-6.00
39	50	2074	350	1.2	-5.89
40	55	1997	560	2.2	
41	51	758	51	0.2	-5.83
42	69	1393	250	1.0	-6.18
44	223	1592	86	0.4	-6.50
45	57	1858	280	1.6	-6.06
46	35	2377	570	2.0	-5.51
47	48	1935	450	1.3	-5.68
48	62	2670	480	2.1	-6.22
50	32	870	105	0.4	-6.36
51	118	1325	170	0.6	-6.32
53	30	887	86	0.3	-6.51
54	117	1805	260	0.9	-6.15
55	151	2867	620	2.1	-5.93
56	143	1500	209		-6.43
57	160	424	71		
58	160	313	43		
Arno Caprona		1630	210	0.3	-5.61
Arno Scotto		36000	13400	45.5	-0.93

diminuisce piuttosto repentinamente procedendo verso il Serchio e progressivamente verso sud. Sensibilmente meno conducibili risultano, infatti, le acque erogate dai pozzi a sud dell'Arno, anche se in questa parte della pianura pochi sono, attualmente, i punti di osservazione.

Analoghi andamenti si riscontrano per la distribuzione del Cl (Fig. 3), data la sua ottima correlazione ($r = 0.94$) con la conducibilità elettrica. È interessante, comunque, osservare come la zona ad alta conducibilità a NO di Pisa, che pareva chiudersi in corrispondenza dell'isolinea $2500 \mu\text{Scm}^{-1}$, risulti ora aperta verso

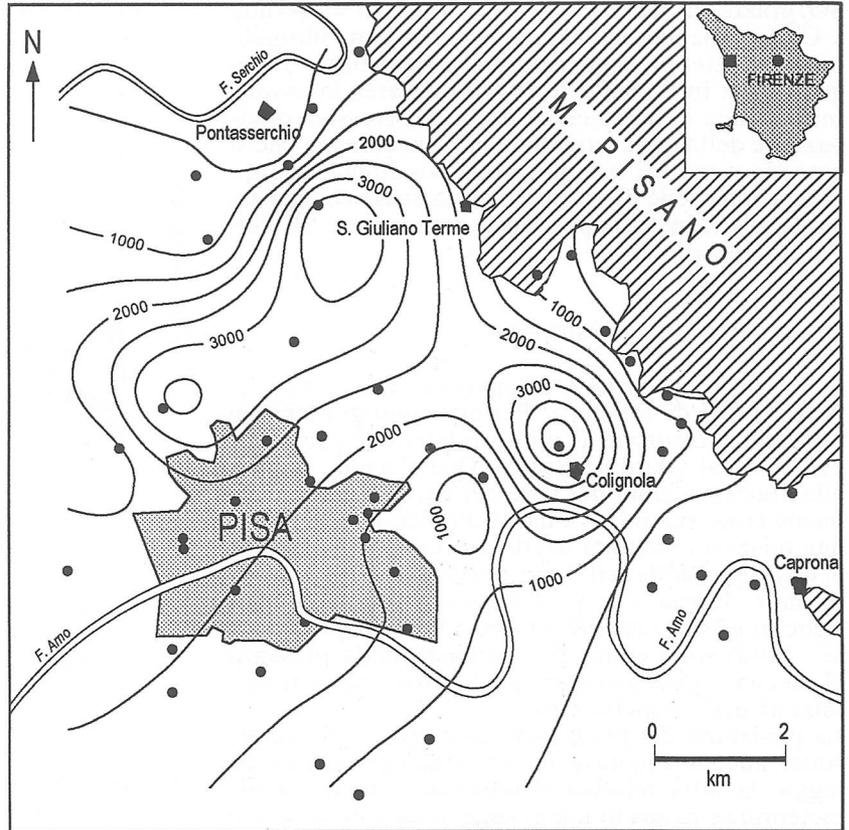


Fig. 2 - Distribuzione della conducibilità elettrica nell'area di studio relativamente ai pozzi con profondità < 100 m. Isolinee in μScm^{-1} .

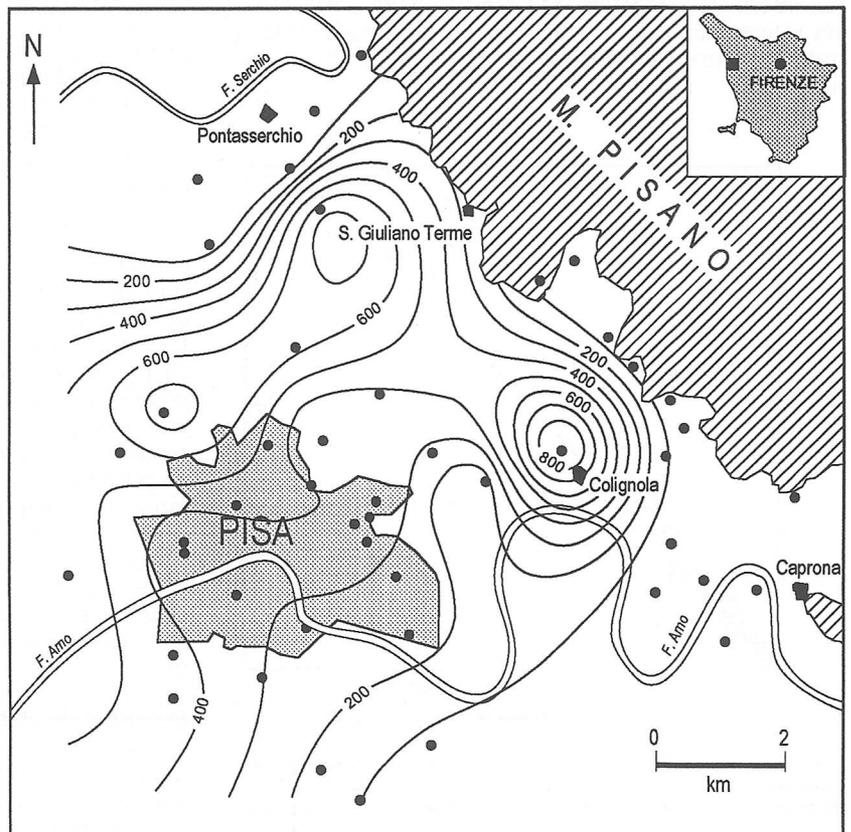


Fig. 3 - Distribuzione della concentrazione in Cl nell'area di studio relativamente ai pozzi con profondità < 100 m. Isolinee in mg/l.

SO, grazie all'andamento dell'isolinea $Cl = 500 \text{ mg/l}$. Ciò, in una visione dinamica del sistema idrogeologico, potrebbe suggerire una penetrazione di acque ricche in Cl dal settore SO dell'area in esame. Interessante è anche osservare la progressiva diminuzione della concentrazione in Cl man mano che si procede verso SE, ad indicare la possibile esistenza di una zona sede di acque diluite a bassa concentrazione in Cl, in corrispondenza del margine SE dell'area di studio.

DIAGRAMMI BIDIMENSIONALI

Qui di seguito vengono discussi due diagrammi relativi ai dati di Tabella 1. Per questioni grafiche, in essi non è riportato il punto relativo al campione dell'Arno al Giardino Scotti. Quest'acqua, in base alle concentrazioni del Cl e del Br, ioni particolarmente conservativi, e ai dati isotopici, risulta essere una miscela costituita da 40% circa di acqua continentale tipo quella dell'Arno a Caprona e 60% di acqua di mare. È noto che sia l'Arno (Cini *et al.*, 1992; Bencini e Malesani, 1993), sia il Serchio (Ghezzi *et al.*, 1994) sono entrambi interessati dalla presenza di un cuneo di acqua marina, che risale per vari chilometri dalle rispettive foci.

La posizione dei punti rappresentativi delle acque sotterranee in Figura 4, in cui viene riportata a tratteggio la retta relativa al miscelamento fra acqua meteorica e acqua di mare, suggerisce l'esistenza di fenomeni di miscelamento fra le acque sotterranee sia intermedie che profonde della pianura di Pisa, e indica un'origine marina per il Cl ed il Br in esse presenti.

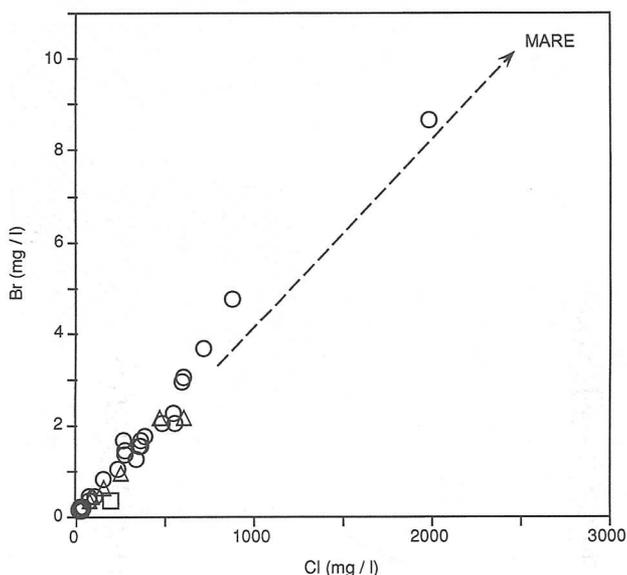


Fig. 4 - Br in funzione del Cl per le acque considerate. I pozzi a profondità intermedia sono rappresentati da cerchi, quelli profondi da triangoli e l'Arno a Caprona da un quadrato. La retta tratteggiata indica il miscelamento fra acqua meteorica e acqua di mare.

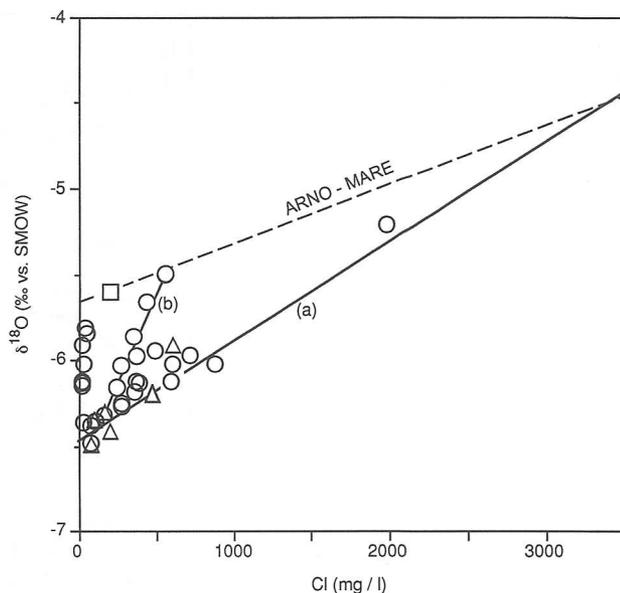


Fig. 5 - $\delta^{18}O$ in funzione del Cl. Per i simboli vedi figura precedente. La retta tratteggiata si riferisce al miscelamento fra acqua d'Arno e acqua di mare; (a) e (b) indicano i fenomeni di miscelamento delle acque sotterranee.

In Figura 5, relativa ai contenuti in ossigeno-18 e in Cl, la retta tratteggiata si riferisce al miscelamento delle acque dell'Arno con il mare. Anche in questo caso non si evidenziano particolari differenze fra pozzi profondi e pozzi intermedi, per i quali si può notare un arricchimento significativo in ^{18}O con l'aumentare del Cl. Tralasciando le acque a bassa concentrazione in Cl e con $\delta^{18}O$ compreso fra -5.8 e -6.2 erogate nella quasi totalità dei casi da pozzi situati ai piedi del Monte Pisano, è possibile distinguere due andamenti (a e b) riferibili a fenomeni di miscelamento. Di questi il principale (a), che riguarda la maggior parte delle acque della pianura, sembra essere anche il responsabile della relativa salinizzazione delle falde.

La retta di regressione relativa ai punti più ricchi in Cl ($r = 0.94$) tende verso valori isotopicamente più positivi rispetto a quello che ci saremmo dovuti aspettare in un processo di miscelamento con acqua di mare ed interseca quella del miscelamento Arno-mare in un punto corrispondente ad una miscela costituita da circa 85% acqua tipo Arno a Caprona e 15% acqua di mare. Questo punto potrebbe plausibilmente individuare l'estremo salino del processo di miscelamento responsabile dell'apporto di Cl nel sistema acquifero della pianura. Considerato che anche l'andamento b interseca la retta del miscelamento Arno-mare in prossimità del punto rappresentativo dell'Arno a Caprona, potremmo ritenere che le caratteristiche geochimiche delle acque sotterranee siano fondamentalmente regolate da un miscelamento a tre componenti: acqua d'Arno (o Serchio) contaminata da acqua di mare, acqua d'Arno diluita e acqua meteorica. Alternativamente, nel caso in cui si escluda una

possibile influenza del fiume sulle acque sotterranee, gli andamenti di figura potrebbero essere spiegati dal miscelamento di acqua meteorica con acque di tipo lagunare, notevolmente diluite e palustre. Questi ambienti hanno caratterizzato la pianura pisana sino in tempi relativamente recenti.

Il problema dell'origine del Cl rimane quindi circoscritto a due possibilità e cioè se esso derivi dall'interazione fiume/falde oppure da paleo-acque ancora presenti nel sottosuolo. È invece da escludere un'origine da lisciviazione di sali o da inquinamento antropico.

La Figura 5 fornisce utili indicazioni anche riguardo alla componente meteorica. Quest'acqua di ricarica, comune alla maggior parte dei pozzi della pianura (intermedi e profondi), dovrebbe avere un $\delta^{18}\text{O} = -6.4\%$ circa, come indicato dall'intersezione della retta di regressione con l'asse delle ordinate. Assumendo un plausibile gradiente altimetrico $-0.25\delta^{18}\text{O}/100\text{ m}$ di quota (Eriksson, 1983), il valore calcolato indicherebbe una quota media di alimentazione di circa 250 m s.l.m. per la circolazione sotterranea. Ciò in ragione del fatto che le piogge a Pisa, prossima a livello mare, hanno $\delta^{18}\text{O}$ medio annuo intorno a -5.8% . Il contenuto in ossigeno-18 della componente meteorica sembrerebbe quindi escludere un'alimentazione dalle dune costiere, che si trovano ai margini occidentali dell'area di studio.

Come ultima considerazione, il valore di $\delta^{18}\text{O} = -6.4\%$ della componente meteorica non si discosta particolarmente (errore analitico per $\delta^{18}\text{O} = 0.2\%$) dal valore di -6.7% rilevato da Gonfiantini et alii (1963) quale contenuto medio in ^{18}O dell'Arno nel periodo giugno 1960-maggio 1961. D'altronde, assumendo una possibile influenza dell'Arno sulle acque sotterranee, come in prima ipotesi sembra suggerire il diagramma di Figura 5, appare improbabile che il fiume contribuisca all'alimentazione degli acquiferi solo durante il periodo di magra, al quale i dati dell'Arno riportati nel presente lavoro si riferiscono. Generalmente, infatti, nell'interazione fiume-acquifero interconnesso si osserva che il fiume alimenta la falda in fase di piena, mentre riceve contributi da essa durante la magra.

Certo è che, se così fosse, dovremmo aspettarci acque d'Arno con conducibilità intorno ai $200\ \mu\text{Scm}^{-1}$, ovvero con conducibilità almeno paragonabile a quella delle acque dei pozzi più diluite ed isotopicamente più negative. I valori finora osservati (Cini et al., 1992; Bencini e Malesani, 1993) per l'Arno lungo il tratto che va da Caprona sino alla foce non sono mai risultati inferiori a $500\ \mu\text{Scm}^{-1}$.

CONCLUSIONI

Il presente lavoro mette in evidenza che:

- Nell'area di studio esiste una zona a contenuto in Cl relativamente elevato, che si estende dalla periferia NO della città di Pisa fino quasi alle pendici del M. Pisano. Acque relativamente concentrate in Cl sono presenti anche nei dintorni di Colignola e nella città di Pisa.
- Non sembrano esistere particolari differenze fra le

acque provenienti da acquiferi con profondità fino a 100 m e quelli fra 100 e 220 m. Queste acque, in base ai parametri considerati, sembrano infatti avere la stessa origine e subire gli stessi processi.

- Le zone delle dune costiere, generalmente considerate aree di alimentazione meteorica per la circolazione sotterranea, non sembrano invece fornire significativi contributi, almeno nell'area esaminata, dato che le acque di origine meteorica sembrerebbero provenire da quote intorno ai 250 m s.l.m., come indicano i dati di $\delta^{18}\text{O}$.

- La salinità e la concentrazione in Cl delle acque erogate dai pozzi sono fondamentalmente regolate dal miscelamento di acque meteoriche a bassa salinità con un'acqua più salina, relativamente ricca in Cl ed isotopicamente più pesante che, a sua volta, è una miscela costituita da circa 6 parti di acqua continentale ed 1 di mare.

- Quest'acqua a maggiore concentrazione in Cl potrebbe derivare dalla penetrazione nel sistema acquifero della pianura pisana di miscele di acqua d'Arno e/o di Serchio con acqua di mare, oppure da residui di paleo-acque presenti nel sottosuolo.

Ulteriori indicazioni saranno certamente ottenute al completamento delle analisi chimiche ed isotopiche delle acque considerate. Tuttavia, per meglio chiarire quanto emerge dal presente lavoro, sarebbe opportuno, oltre ad ampliare l'area di studio e disporre di un maggior numero di campioni, programmare monitoraggi delle caratteristiche geochemiche delle acque sia di pozzi, in aree opportunamente selezionate, sia del fiume, senza tralasciare logicamente l'osservazione nel tempo dei relativi livelli. Importanti indicazioni potranno derivare anche da prove di pompaggio a lunga durata, da eseguire su pozzi situati nelle vicinanze del fiume.

BIBLIOGRAFIA

- Baldacci, F., Bellini, L. e Raggi, G., 1994. Le risorse idriche sotterranee della Pianura Pisana. Atti. Soc. tosc. Sci. nat., Mem., Ser. A, 101: 241-322.
- Bencini, A. e Malesani, P., 1993. Fiume Arno: acque, sedimenti e biosfera. Accademia Toscana di Scienze e Lettere «La Colombaria», 133, Leo S. Olschki Editore, Firenze.
- Cini, C., Calafà, A., Moschini, L., Nottoli, R., Giacconi, V., Benedettini, G., Saviozzi, L., Moggi, B. e Avio, C.M., 1992. Caratterizzazione fisico-chimica-microbiologica del tratto terminale del Fiume Arno. Bollettino dei Chimici Igienisti, 43 S5: 525-536.
- Della Rocca, B., Mazzanti, R. e Pranzini, E., 1987. Studio geomorfologico della Pianura di Pisa. Geogr. fis. dinam. Quaternario, 10: 56-84.
- Dini, I., 1976. La prima falda artesianiana in sabbia della zona di Pisa. Comune-Provincia di Pisa.
- Eriksson, E., 1983. Stable isotopes and tritium in precipitation. Guidebook on nuclear techniques in hydrology. IAEA technical reports, ser. 91: 19-33.
- Fancelli, R., 1984a. Tentativo di ricostruzione dell'andamento della falda artesianiana tra i -30 ed i -50 m di profondità nel sottosuolo di Pisa e dintorni. Rapporto CNR - Ist. Int. Ric. Geotermiche, Pisa.
- Fancelli, R., 1984b. Alcune notizie sui sedimenti attraversati da perforazioni per ricerche d'acqua e sulla distribuzione spaziale nel sottosuolo pisano delle falde acquifere. Rapporto - Ist. Int. Ric. Geotermiche CNR, Pisa.

- Fancelli, R., Grifoni, R., Mazzanti, R., Menchelli, S., Nencini, C., Pasquinucci, M. e Tozzi, C., 1986. Evoluzione della Pianura di Pisa. In: «Terre e paduli, reperti, documenti, immagini per la storia di Coltano» Comune di Pisa, Pacini Ed., Pisa, 23-29.
- Federici, P.R. e Mazzanti, R., 1995. Note sulle pianure costiere della Toscana. Mem. Soc. geogr. ital., 53: 165-270.
- Ghezzi, G., Ghezzi, R. e Porsia, D., 1994. La dinamica del cuneo salino nel fiume Serchio ed i suoi rapporti con la falda superficiale. In «Il Serchio: una possibile soluzione dei problemi idrici di Pisa e di Livorno». Pisa 19 Febbraio 1994, 39-76.
- Giannini, E. e Nardi, R., 1965. Geologia della zona nord occidentale del Monte Pisano e dei Monti d'Oltre Serchio (Prov. di Pisa e Lucca). Boll. Soc. geol. ital., 84: 197-270.
- Gioli, G., 1894. Il sottosuolo della Pianura di Pisa. Boll. soc. geol. ital., 13: 210-233.
- Gonfiantini, R., Togliatti, V. e Tongiorgi, E., 1963. Some possible applications of isotopic analyses of water to hydrologic problems. Science et technique pour les regions peu developpees, Italian Report of the UN Conference, Geneve, 71-79.
- Rau, A. e Tongiorgi, M., 1974. Geologia dei Monti Pisani a sud-est della valle del Guappero. Mem. Soc. geol. ital., 13: 227-408.
- Rossi, S. e Spandre, R., 1994. L'intrusione marina nella falda artesianiana in ghiaia nel litorale pisano. Acque sotterranee, Fasc. 43: 51-58.
- Rossi, S. e Spandre, R., 1995. Caratteristiche idrochimiche della falda artesianiana in sabbia nei dintorni della città di Pisa. Acque sotterranee, Fasc. 48: 27-36.
- Segre, A.G., 1955. Nota sulla idrografia continentale e marina. In: «Note illustrative della C.G.I., scala 1:100000, Foglio N.111 Livorno. Serv. geol. ital., Roma, 20-29.
- Trevisan, L. e Tongiorgi, E., 1953. Le acque del sottosuolo della regione pisana. La Provincia Pisana 9-10, Pisa, 3-8.

(ms. pres. il 10 febbraio 1997; ult. bozze il 17 settembre 1997)