

# Effetti antropici e naturali sul degrado quantitativo delle acque sotterranee del Tavoliere<sup>(\*)</sup>

M. Polemio<sup>(1)</sup>, M. Di Cagno<sup>(1)</sup>, V. Dragone<sup>(1)</sup>

**Riassunto.** Si analizzano, utilizzando metodi statistici delle serie storiche, dati mensili piezometrici, termopluviometrici, e di deflusso fluviale, relativi a numerose stazioni poste nell'acquifero poroso superficiale del Tavoliere. Si caratterizzano il regime della falda, i trend piezometrici e gli effetti su questi delle variazioni della ricarica naturale e dell'attività antropica negli ultimi 60 anni.

[Parole chiave: *acque sotterranee, sovrasfruttamento, degrado quantitativo, serie storiche, risorse idriche*]

**Abstract.** *This work is based on data acquisition and analysis of chronology sequences of piezometric, rainfall, thermometric and runoff data of Apulian Tableland aquifer. Methods of time series analysis are used. This approach has allowed characterising the piezometric regime and trend related to the natural recharge variation. The historical character of measurement period, last sixty years, is very important to evaluate the human effect.*

[Key words: *groundwater, time series, overexploitation, water resources*]

## 1. INTRODUZIONE

Nel Tavoliere è presente un vasto acquifero superficiale, costituito prevalentemente da sabbie medio-suprapleistoceniche; la relativa falda idrica sotterranea è a luoghi sia libera che in pressione (fig. 1). Tali acque sotterranee sono state soggette, soprattutto a partire dagli anni '50, in concomitanza con il

forte sviluppo agricolo e industriale che caratterizzò quel periodo, ad un crescente sfruttamento, principalmente per l'approvvigionamento idrico irriguo ma anche per soddisfare idroesigenze potabili e industriali, soprattutto a causa del facile rinvenimento sull'intero territorio, della modesta soggiacenza e della buona qualità delle stesse. A partire dall'inizio degli anni '80, l'adduzione di acque superficiali, provenienti dagli invasi artificiali appenninici, ha ridotto il ricorso alle risorse idriche sotterranee, per questioni connesse ai costi di esercizio e alla maggiore funzionalità garantita dalle reti di distribuzione in pressione. A seguito dell'emergenza idrica per siccità, avvenuta tra la metà degli anni '80 e l'inizio degli anni '90, si è verificata una brusca riduzione nella disponibilità di acque superficiali invasate. Di conseguenza, si è verificato un nuovo incremento d'uso delle acque sotterranee.

L'influenza antropica sulla falda idrica del Tavoliere dipende dal numero di pozzi, dall'esistenza di reti di acquedotto e di fognatura, dalla disponibilità di fonti idriche diverse ed esterne all'acquifero in esame. Tali fattori hanno agito sulle acque sotterranee in modo variabile e generalmente crescente, negli ultimi 60 anni.

Le prime forniture di acquedotto ai centri abitati, mediante la rete di distribuzione dell'EAAP (Ente Autonomo Acquedotto Pugliese), iniziarono nel 1919. I principali abitati del Tavoliere furono raggiunti, per la prima volta, tra il 1923 e il 1928. Da tale data, quindi, inizia il lentissimo sviluppo delle reti urbane di distribuzione prima e di fognatura poi. Negli stessi anni alcune porzioni del Tavoliere erano in corso di bonifica, essendo paludose e soggette alla malaria. La dotazione idrica giornaliera ufficiale negli anni '30 era di 70 l/g per abitante. Da allora ad oggi è cresciuta enormemente la popolazione, la

<sup>(\*)</sup> Pubblicazione n. 2011 del Gruppo Nazionale per la Difesa dalle Catastrofi Idrogeologiche, U.O.4.14 (CNR - CERIST, BARI), responsabile Prof. VINCENZO COTECCHIA.

<sup>(1)</sup> CNR-CERIST, Via Orabona 4, 70100, Bari, E-mail: polemio@area.ba.cnr.it.

dotazione idrica giornaliera, attualmente all'incirca quadruplicata, nonché le ore di effettiva erogazione idrica, inizialmente ben poche. È quindi più che plausibile che nel tempo sia aumentato notevolmente il volume annuo delle perdite dalle reti di acquedotto e di fognatura.

I dati disponibili, relativi ai consumi idrici, sono solo recenti. Il consumo idrico per tutti gli usi nel Tavoliere tende lentamente ad aumentare dal 1976 al 1993. Si nota che se le erogazioni potabili, garantite dall'EAAP principalmente ad utenze civili, crescono poco, aumentano enormemente i prelievi dalle

reti del consorzio agricolo. Tale crescita è enorme ed è sostenuta da un nuovo invaso appenninico. La crescita cessa solo a partire dal 1988, quando una duratura siccità lascerà a lungo vuoti gli invasi e ridurrà i consumi per difetto di offerta. Durante questo periodo il prelievo di acque sotterranee per consumo potabile è sostanzialmente costante, circa 80 l/s, pari all'8% dei consumi potabili complessivi.

Al contrario, i consumi del comparto agricolo e industriale sono in continua crescita. Per la valutazione dell'evoluzione dei consumi irrigui di acque sotterranee, sono state considerate, per la provincia

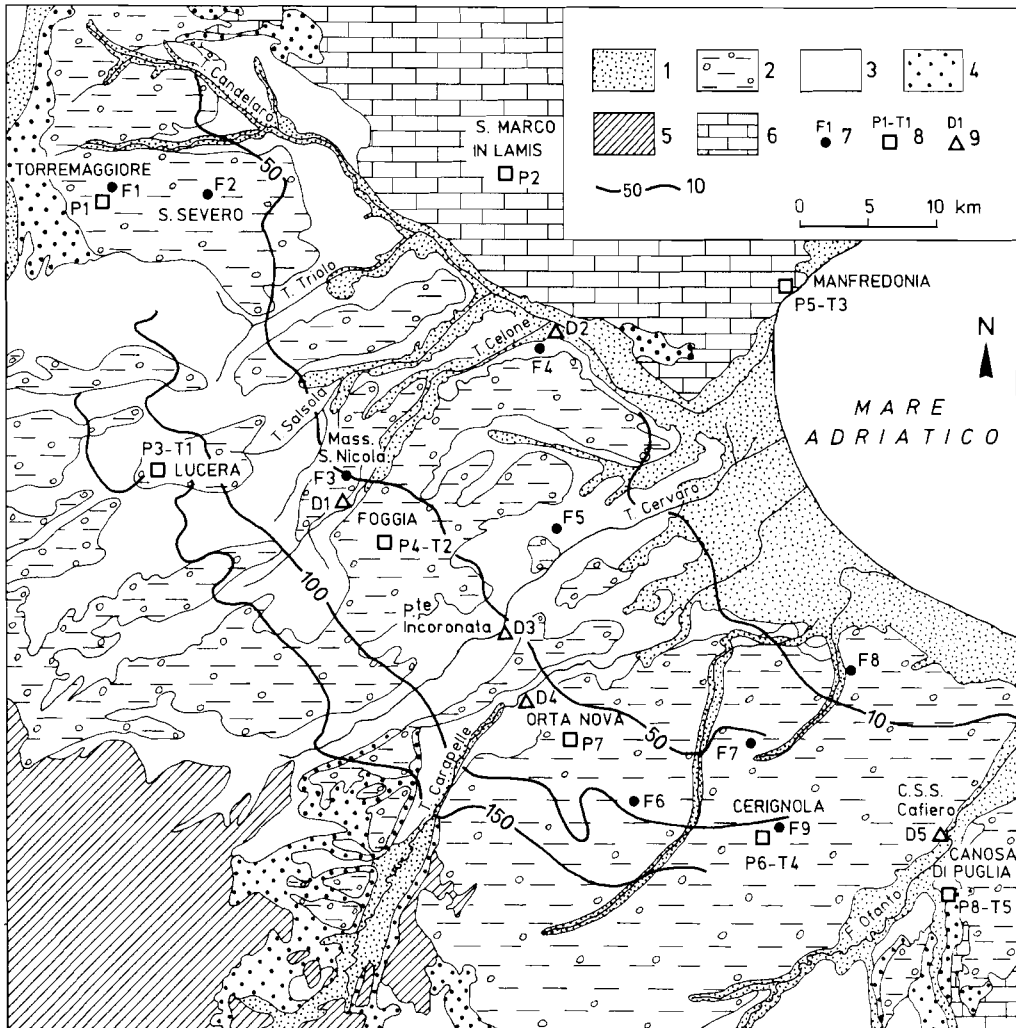


Figura 1. Carta geologica schematica ed ubicazione delle stazioni di misura (da A.A.V.V. 1988, modificata). 1) Depositi di spiaggia, sabbiosi e sabbio-limosi, 2) depositi terrazzati ciottolosi, sabbiosi e subordinatamente argillo-sabbiosi, 3) depositi alluvionali limo-sabbiosi e limo-argillosi, talvolta con ciottoli, 4) depositi del ciclo bradanico, 5) depositi flyschoidi di catena, 6) depositi carbonatici, 7) stazioni piezometriche, 8) stazioni termopluviometriche, 9) stazioni idrometriche, 10) isopieziche (m slm).

di Foggia, le superfici irrigate nel 1971, 1982 e 1990: in venti anni le superfici irrigate con acque sotterranee sono aumentate da circa 40.000 a quasi 60.000 ettari. Nel complesso, considerando tutti i possibili usi delle acque sotterranee, in soli dieci anni, dal 1985 al 1994, il numero noto di pozzi del Tavoliere è aumentato del 69%: nel 1994 il numero di pozzi era di circa 16.000; nello stesso periodo si sono registrati diffusi decrementi piezometrici (COTECCHIA & POLEMIO, 1995). Nell'area di studio, si attinge in maniera massiccia dalla falda idrica superficiale che integra o sostituisce, durante le emergenze climatiche, le acque distribuite dalle reti idriche o quelle che direttamente si prelevano dai corsi d'acqua.

Le acque sotterranee hanno sofferto, quindi, situazioni di degrado quantitativo ma anche qualitativo, talvolta di notevole entità. Il degrado qualitativo, non trattato in questo articolo, è strettamente correlato alla notevole vulnerabilità intrinseca dell'acquifero superficiale del Tavoliere e all'uso del territorio (TADOLINI et al., 1990).

Scopo del presente lavoro è analizzare gli effetti, in termini quantitativi, che le attività antropiche, unitamente all'azione dei processi naturali, hanno svolto sulle acque sotterranee del Tavoliere. Tali riserve idriche costituiscono, infatti, una risorsa che potrebbe risultare strategica, se destinata a fornire acqua di qualità, da gestire in vista di fabbisogni futuri di emergenza, in particolare in relazione al rischio di nuove siccità.

Il presente studio si basa sull'analisi di serie cronologiche di dati piezometrici, pluviometrici, termometrici e di deflusso fluviale. Per quanto riguarda i dati sul deflusso superficiale, sono stati considerati i valori di portata fluviale ( $m^3/s$ ).

Sono state raccolte numerose serie di dati idrologici mensili, da un complesso di 27 stazioni piezometriche, termopluviometriche e idrometriche del SIMN (Sezione Autonoma di Bari) (tab. 1). L'informazione più preziosa è quella rinveniente da nove stazioni piezometriche, attive dal '29 al '94, per cui sono disponibili misure ogni tre giorni. L'importanza di tali rilievi è enfatizzata dal carattere storico del periodo di misura, che in parte precede la forte crescita dell'antropizzazione del Tavoliere, che ha fatto seguito alla seconda guerra mondiale.

L'analisi dei dati è stata condotta con tecniche tipiche delle serie storiche, secondo modalità nel seguito brevemente descritte, ma con dettaglio illustrate da POLEMIO & DRAGONE (1999). Sono stati così evidenziati alcuni caratteri dell'acquifero, il regime piezometrico, i rapporti intercorrenti tra piogge, deflusso fluviale e variazioni piezometriche nonché gli

aspetti tendenziali, negli ultimi 60 anni, delle variazioni piezometriche registrate, seguendo ed ampliando un approccio positivamente sperimentato in acquiferi porosi (POLEMIO, 1994). Il quadro così delineato fornisce elementi fondamentali per definire procedure di gestione della risorsa idrica sotterranea, in previsione di un uso integrativo e/o alternativo. Allo stesso tempo, l'esperienza condotta persegue il fine, dal punto di vista metodologico, di stabilire procedure statistiche, facilmente utilizzabili a seguito di aggiornamenti della banca dati, per individuare i caratteri tendenziali del degrado qualitativo e i fattori che lo determinano.

## 2. INQUADRAMENTO GEOLOGICO

La successione stratigrafica dei sedimenti affioranti nell'area di interesse è riconducibile alle formazioni clastiche formatesi in seguito al ciclo sedimentario marino plio-pleistocenico, completo, che ha colmato il graben del Tavoliere (COTECCHIA et al., 1995).

L'ossatura dell'area è costituita dal basamento carbonatico mesozoico, appartenente alla piattaforma apula, che, al di sotto del Tavoliere, sprofonda, fino a raggiungere la profondità massima di 4000 m. Dal punto di vista litologico, si tratta di un'alternanza di calcari micritici e granulari, calcari marnosi e dolomie.

La successione sedimentaria di colmamento, poggiate sul substrato carbonatico, è costituita, a partire dal basso, da argille e argille-siltose, talvolta mamose, grigio-azzurre, riferibili alla Formazione delle Argille Subappenniniche (Pliocene sup.-Calabrian), originatosi durante la fase di ingressione marina. La potente formazione argillosa basale mostra caratteri eterogenei. Sono presenti variazioni di facies verso termini sabbiosi e sabbioso-limosi. Questi depositi sono presenti in affioramento in modo non significativo. Durante la fase regressiva del ciclo marino, si sono depositati, al di sopra della spessa coltre argillosa, sedimenti infra-pleistocenici di natura sabbiosa e conglomeratica.

Su quest'ultimi poggiano, in discordanza, sedimenti continentali costituiti da sabbie, sabbie limose e conglomerati sabbiosi, a differente grado di cementazione, essenzialmente di ambiente alluvionale e deltizio, riferibili al Pleistocene medio. Lo spessore di tali depositi è attualmente esiguo, a causa degli intensi processi di erosione continentale.

La successione sedimentaria è chiusa superiormente da depositi alluvionali, supra-pleistocenici-olocenici, litologicamente costituiti da sabbie

argillose e conglomerati sabbiosi, frequentemente terrazzati, oltre che da depositi conglomeratici di età olocenica.

Nel settore centro-orientale del Tavoliere i depositi di origine deltizia e alluvionale risultano coperti da sedimenti argillosi e limo-argillosi, di colore grigio-azzurro e giallastro, formatisi in ambiente lagunare, che raggiungono spessori di alcune decine di metri.

Il Tavoliere mostra ovunque una morfologia tabulare che dolcemente digrada verso la costa. La continuità del paesaggio è interrotta da valli erosive, poco profonde e a fondo piatto, che danno vita ad un'articolata idrografia superficiale.

### 3. INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO

Nel Tavoliere possono identificarsi principalmente due acquiferi: l'acquifero superficiale, costituito dai depositi sabbiosi e conglomeratici, di origine prevalentemente marina, oltre che continentale, e l'acquifero profondo, costituito dai depositi carbonatici mesozoici appartenenti alla Piattaforma Apula. L'acquifero superficiale è caratterizzato da una permeabilità primaria per porosità, l'acquifero profondo, invece, mostra una permeabilità secondaria dovuta a fratturazione e carsismo. Di recente, a seguito della crescente domanda idrica, è iniziato lo sfruttamento di quello che si potrebbe definire, per semplicità, un acquifero intermedio, che ha sede nelle porzioni maggiormente sabbiose della successione plio-pleistocenica, a carattere prevalentemente pelitico. I termini acquiferi della successione sono rinvenuti a profondità di alcune centinaia di metri, in pressione e sovente in condizioni di artesianità (COTECCHIA et al., 1995).

Il presente studio si dedica esclusivamente all'acquifero poroso superficiale. L'acquifero è prevalentemente costituito da sabbie, sabbie limose e conglomerati sabbiosi, a differente grado di cementazione. Ha una potenza variabile da poche decine di metri, lungo il settore occidentale del Tavoliere, ad oltre 100 m, nel settore centrale e orientale, ed è delimitato inferiormente da un substrato impermeabile, rappresentato da argille grigio-azzurre. Procedendo dall'entroterra verso la costa, la quota del tetto del substrato impermeabile decresce gradualmente; nelle immediate vicinanze della linea di costa scende al di sotto del livello del mare. Quest'ultima circostanza rende l'acquifero, in tale area, vulnerabile all'intrusione marina.

Le acque sotterranee circolano sia in condizioni freatiche, in particolare nella porzione centro-occi-

dentale, delimitata a monte dalle propaggini dell'Appennino, sia in pressione, prevalentemente nel settore centrale e centro-orientale, delimitato a valle dal mare. Pur esistendo un'unica circolazione idrica sotterranea, essa si sviluppa, in alcune aree, su più livelli acquiferi, idraulicamente interconnessi, a causa della presenza di livelli e strati a differente granulometria e permeabilità. La falda idrica sotterranea defluisce verso il Mare Adriatico, che ne rappresenta il livello di base, e verso il Torrente Candelaro, che segna, in sostanza, il limite tra l'acquifero in questione e l'unità idrogeologica carbonatica del Gargano.

Le acque sotterranee defluiscono dalle aree più interne, in corrispondenza delle quali possiedono carichi idraulici di circa 200 m, verso il mare, con una cadente piezometrica mediamente pari a 0,6% e che a luoghi raggiunge valori massimi di 1,5%. Le isopieziche mostrano un andamento essenzialmente congruente con quello del substrato impermeabile (fig. 1).

Sulla base delle stazioni termopluviometriche selezionate, ad eccezione di quella di S. Marco in Lamis, posta nel Gargano, la piovosità annua è compresa tra 440 e 572 mm e in media è pari a 500 mm, mentre la temperatura diurna è compresa tra 15,9°C e 16,2°C e in media è 16°C. Il regime delle precipitazioni, di tipo marittimo, ha il minimo tra luglio e agosto e il massimo a dicembre. Il regime delle temperature è di tipo moderato, con massimo tra luglio e agosto e minimo a gennaio.

### 4. ANALISI DEI DATI

Il regime della falda idrica è stato analizzato mediante le registrazioni piezometriche mensili relative a nove stazioni, attive da un minimo di 17 a un massimo di 55 anni (tab. 1). Le nove stazioni piezometriche del SIMN sono costituite anche da pozzi a scavo di grande diametro. Tale rete piezometrica è stata attiva a partire dal 1929 fino al 1994, con alcune interruzioni durante la seconda guerra mondiale. Delle nove stazioni considerate, i dati relativi a tre di esse sono disponibili solo a partire dal dopoguerra. Parte della rete di monitoraggio è stata abbandonata nel corso degli anni. Alcuni pozzi sono stati sostituiti con altri contigui. I dati raccolti dagli Annali Idrologici del SIMN, Sezione Autonoma di Bari, sono stati così attentamente validati. Le serie storiche utilizzate sono state ottenute scartando i dati non omogenei e colmando alcune brevi lacune eventualmente verificatesi. Sono stati utilizzati dati rilevati generalmente ogni tre giorni, di cui si è

**Tabella 1. Caratteristiche delle stazioni di misura. Stazione F) piezometrica, P) pluviometrica, T) termometrica, D) deflusso fluviale, Q) quota piano campagna (m slm), N) periodo di osservazione (anni).**

Tipo	Staz.	Denominazione	Q.p.c.	Oss.
F	1	Torremaggiore	128,08	17
F	2	S.Severo	79,17	38
F	3	M.S.N.Arpi	54,2	40
F	4	M.Petrullo	44,10	42
F	5	M.Colonnello	33,60	55
F	6	Stornara	108,18	54
F	7	C.Ferr.553-031	62,80	21
F	8	M.Luparello	12,70	33
F	9	Piano d. Fosse	121,50	29
P	1	Torremaggiore	169	69
P	2	S.M. in Lamis	560	74
P	3	Lucera	251	71
P	4	Foggia Oss.	74	71
P	5	Manfredonia	2	71
P	6	Cerignola	124	74
P	7	Ortanova	55	67
P	8	Canosa	154	74
T	1	Lucera	251	59
T	2	Foggia Oss.	74	62
T	3	Manfredonia	2	56
T	4	Cerignola	124	65
T	5	Canosa	154	42
D	1	Celone-Cand.	60,60	32
D	2	Candelaro	9,88	9
D	3	Cervaro-Incor.	50,64	45
D	4	Carapelle	49,73	31
D	5	Ofanto	31,73	49

**Tabella 2. Caratteristiche delle stazioni piezometriche. Falda idrica L) libera e P) in pressione; S) soggiacenza (m); AR) coefficiente angolare della retta di regressione (m/mese); MEM) max escursione mensile (m).**

Staz.	Ubicaz.	Falda	S	AR	MEM
F1	AU	L	5,0	0,004	1,68
F2	AU	L	5,0	0,003	5,19
F3	AA	P - L*	7,0	- 0,003	3,52
F4	AA	P	32,0	- 0,001	11,99
F5	AA	P - L**	16,0	- 0,011	11,58
F6	AU	L	8,5	- 0,003	6,67
F7	AA	P - L***	5,0	- 0,034	2,09
F8	AA	P	16,0	- 0,009	7,12
F9	AU	L	12,0	0,008	7,64

\* A partire dal 1975 la falda diviene libera per depauperamento.

\*\* A partire dal 1983 la falda diviene libera per depauperamento.

\*\*\* A partire dal 1968 la falda diviene libera per depauperamento.

considerato comunque il valore medio mensile.

I dati stratigrafici, geometrici o di qualsiasi altro tipo, non sono disponibili per questi pozzi. La successione stratigrafica, schematizzata a fini idrogeologici, è stata ricostruita per ciascun pozzo sulla base delle stratigrafie di pozzi vicini e delle conoscenze a scala regionale (TRAMONTE, 1955; IPPOLITO et al., 1958). Ne consegue che talune valutazioni idrogeologiche espresse in tab. 2, quale la soggiacenza, ad esempio, esprimono una stima necessariamente approssimata.

Dall'esame delle quote piezometriche mensili risulta che l'escursione massima, rappresentata dalla differenza tra il massimo mensile e il minimo mensile di ciascun pozzo, varia tra 12 m. del pozzo F4, a circa 1,7 m. del pozzo F1 (tab. 2). I valori assunti da tale variabile non sono correlati con la posizione dei pozzi, mentre è evidente che i valori maggiori dell'escursione sono stati registrati nei pozzi ubicati in aree agricole. Inoltre, si nota che all'aumentare del numero di anni di osservazione aumenta l'escursione massima.

La presenza e la natura del carattere tendenziale delle variabilità nel tempo delle quote piezometriche sono state determinate tramite il calcolo della retta di regressione e sono quantitativamente espresse dal coefficiente angolare della retta (tab. 2). I trend piezometrici mostrano, nella maggioranza dei casi esaminati, una tendenza al calo nel tempo. Il trend pluviometrico nel Tavoliere è leggermente decrescente, in modo però non significativo. Il trend termometrico è ovunque positivo, il valore massimo, determinato a Manfredonia, equivale a circa 1°C in 50 anni. Fortemente negativo il trend del deflusso fluviale. Il massimo si registra alla stazione D5: per 50 anni si stima un calo della portata di circa 6 m<sup>3</sup>/s, pari a circa 200 Mm<sup>3</sup> l'anno. Tale calo si registra in particolare dal 1980, circostanza che potrebbe essere messa in relazione all'esercizio degli invasi artificiali.

Per quanto non secondario l'effetto dell'incremento termico, che di certo ha ridotto nel tempo la piovosità efficace, il sensibile e progressivo depauperamento delle riserve dell'acquifero è da mettere in relazione sia al costante aumento dei prelievi dalla falda idrica, sia dalle acque di superficie, come si mostrerà. Sulla base delle considerazioni ora espresse, è facile comprendere come i trend piezometrici dei pozzi ubicati in aree agricole risultino negativi, a causa dell'intenso sfruttamento a cui la risorsa idrica è stata soggetta nel tempo, al contrario, in corrispondenza dei pozzi ubicati in aree urbane, dove sono emersi trend piezometrici positivi, si rende necessa-

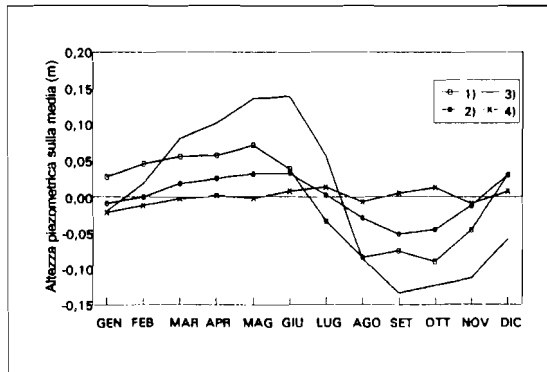


Figura 2. Regime della falda idrica sotterranea per i pozzi ubicati in area urbana. Pozzi: 1) F1, 2) F2, 3) F6, 4) F9.

rio considerare gli effetti antropici delle perdite dalle reti idriche. Un esempio di questo comportamento è rappresentato dal pozzo F1. La lunga, seppur discontinua, serie storica mostra un andamento debolmente crescente per l'intero periodo considerato. In particolare, un'accurata analisi dei dati ha evidenziato un trend discendente negli anni 1951-54, anni in cui la falda idrica sotterranea rappresentava ancora una fonte di approvvigionamento idrico necessaria anche in area urbana, mentre tra gli anni 1965-71 il trend piezometrico mostra un andamento nettamente ascendente; negli stessi anni le variabili idrologiche non mostrano trend particolari. È ragionevole ipotizzare che se da una parte diminuiva nelle aree urbane o periferiche l'interesse per le acque sotterranee, dall'altra aumentavano le perdite di acquedotto e fognatura.

Per eliminare l'effetto delle variazioni altimeetriche, il regime di ciascuna stazione è stato riferito alla quota piezometrica media (figg. 2 e 3). Si osserva che i regimi piezometrici sono differenziabili

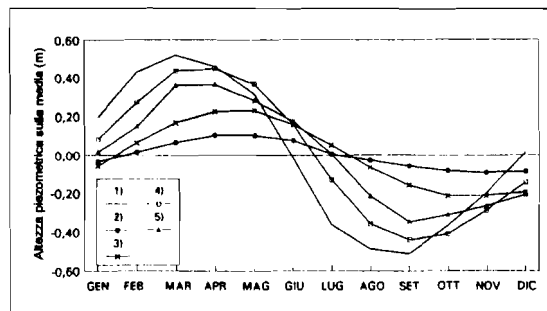


Figura 3. Regime della falda idrica sotterranea per i pozzi ubicati in area agricola. Pozzi: 1) F3, 2) F4, 3) F5, 4) F7, 5) F8.

secondo l'ubicazione delle stazioni, in aree urbane o in aree agricole: tale suddivisione non muta se si dividono i pozzi in pressione da quelli a falda libera. In tal modo si nota che i regimi relativi alle quattro stazioni freatiche, ubicate all'interno di centri urbani, mostrano variazioni delle altezze piezometriche molto contenute ed irregolari, che non è possibile ricondurre ad un unico andamento. Al contrario, le stazioni ubicate nelle aree agricole, con falda generalmente in pressione, presentano un regime piezometrico molto simile e regolare, con un solo massimo, tra febbraio e marzo, e un solo minimo, relativo al mese di settembre. Per tale gruppo di pozzi le escursioni piezometriche mensili sono, nell'anno medio, maggiori che nel gruppo precedente.

Per tutte le serie di misure è stato calcolato il coefficiente di autocorrelazione. Per le serie pluviometriche si osserva la totale assenza di autocorrelazione, coerentemente con la natura casuale delle piogge. La temperatura invece, per tutte le stazioni, mostra una forte autocorrelazione che decresce con il ritardo, si annulla in genere per un ritardo di 3 mesi, raggiunge, dopo 6 mesi, un minimo negativo. Per brevità, si rappresenta l'autocorrelazione per le sole serie piezometriche (figg. 4 e 5). Ad ogni stazione piezometrica sono state quindi associate le stazioni termopluviometriche e idrometriche che potessero supporre idrogeologicamente significative. L'analisi della cross-correlazione ha permesso di valutare, anche in termini quantitativi, l'influenza di ciascuna variabile sulle altre. Per meglio comprendere le successive elaborazioni, occorre sottolineare, a riguardo delle modalità di scambio tra corpi idrici superficiali e sotterranei, che la quota di fondo alveo è sempre risultata maggiore della quota piezometrica o del tetto dell'acquifero, per un congruo intorno di ciascun pozzo. Nel seguito sono riportati, per brevità, soltanto i correlogrammi relativi alle stazioni F2, F3 e F6 (figg. 6-8).

Considerando i pozzi in area urbana, F1, F2, F6 e F9, l'autocorrelazione presenta un andamento simile e lievemente decrescente con il ritardo (fig. 4). Si osserva che la falda idrica mostra un rilevante effetto memoria, che si avverte ancora dopo circa 5 mesi, in apparente contrasto con il carattere freatico dell'acquifero, spiegabile, però, considerando l'effetto antropico, ossia, principalmente le perdite dalle reti idriche, che limitano di molto la naturale variabilità della quota piezometrica. Si noti, a tale riguardo, che, in sostanza, per questi pozzi si registrano minimi valori delle massime escursioni piezometriche (tab. 2).

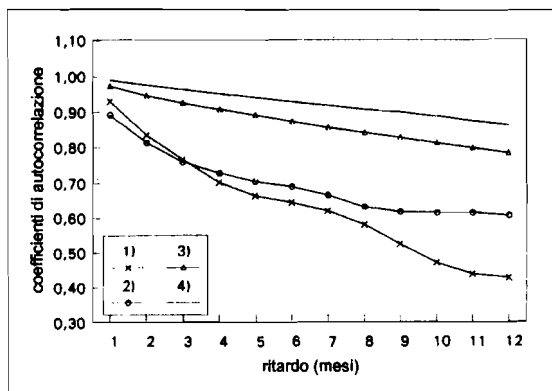


Figura 4. Correlogramma della quota piezometrica dei pozzi in area urbana. Pozzi: 1) F1, 2) F2, 3) F6, 4) F9.

Le cross-correlazioni effettuate tra precipitazioni e livello idrico evidenziano, in tutti i casi «urbani», la debole influenza che le piogge determinano sulle variazioni piezometriche stagionali. L'effetto delle precipitazioni si risente fino a un massimo di 2-3 mesi. Il massimo coefficiente di correlazione è risultato pari a 0,07. Dal calcolo della cross-correlazione tra pozzo F6 e il deflusso superficiale, si evince che il valore massimo del coefficiente, comunque non alto, pari a circa 0,2, si registra in corrispondenza di 2-3 mesi. Si può inoltre osservare che, con un ritardo temporale nullo esiste una forte correlazione tra deflusso e pioggia e che tale correlazione è praticamente nulla dopo quattro mesi. Infine, le figg. 6 e 7 mostrano che la quota piezometrica è in correlazione discordante con la temperatura, per i ritardi più significativi, cioè fino a 3 mesi. In tale caso si ottiene la migliore correlazione, con un coefficiente pari a -

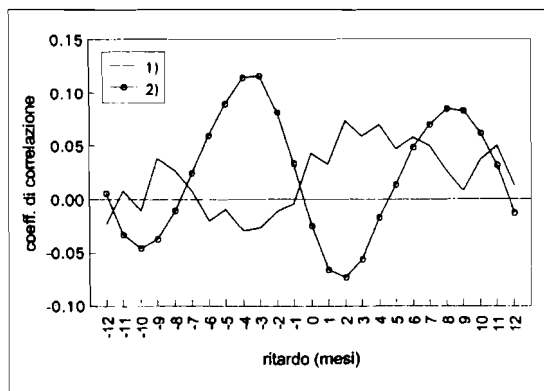


Figura 6. Cross-correlazione della quota piezometrica F2. 1) Piovosità al P4, 2) temperatura al T2.

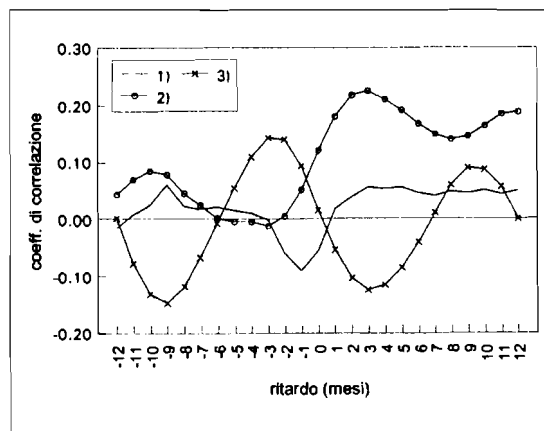


Figura 7. Cross-correlazione della quota piezometrica F6. 1) Piovosità al P7, 2) deflusso al D4, 3) temperatura al T4.

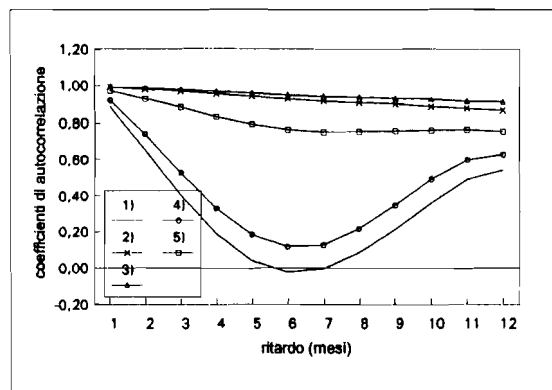


Figura 5. Correlogramma della quota piezometrica dei pozzi in area agricola. Pozzi: 1) F3, 2) F4, 3) F5, 4) F7, 5) F8.

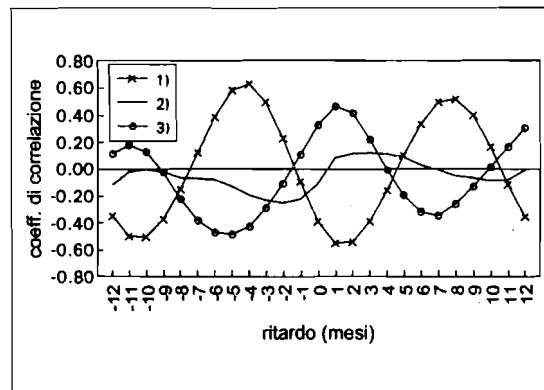


Figura 8. Cross-correlazione della quota piezometrica F3. 1) Temperatura al T2, 2) piovosità al P4, 3) deflusso al D1.

0,07. Questo risultato può essere interpretato stante la bassissima significatività delle correlazioni pioggia-piezometria, considerando quanto segue. Durante la «stagione umida», in sostanza da ottobre a marzo circa, il fattore idrologico prevalente è la piovosità, che generalmente eccede l'evapotraspirazione reale. In tale periodo, grossomodo, la piovosità cresce al decrescere della temperatura. Durante la «stagione arida», il fattore che condiziona principalmente il bilancio idrologico è la temperatura. Gli incrementi di temperatura atmosferica, che si registrano a partire dal mese di marzo circa, provocano, infatti, un crescente deficit idrico, rendendo necessari maggiori quantitativi di acqua, soprattutto per la tutela delle coltivazioni. In sostanza, la temperatura diviene un elemento per stimare in modo indiretto l'effetto dei prelievi stagionali, legati appunto, principalmente, all'aumento estivo della temperatura. In conclusione, quindi, le correlazioni tra le serie temporali di dati relativi a questi pozzi hanno evidenziato, nel complesso, che le variazioni piezometriche risentendo poco delle variabili naturali, a cui sono correlate secondo coefficienti che assumono generalmente bassi valori, sono influenzate da altre cause esterne, che data la loro ubicazione in centri urbani, possono facilmente imputarsi all'effetto antropico.

L'analisi dell'autocorrelazione dei pozzi in area agricola segnala che per le stazioni F4, F5 e F8 esiste un'autocorrelazione lentamente decrescente e sempre significativa, a testimonianza di una forte memoria storica (fig. 5). Per le stazioni F3 e F7, invece, l'autocorrelazione decresce rapidamente fino ad un minimo che si registra per 6 mesi di ritardo. Il differente comportamento, mostrato dai pozzi F3 e F7, potrebbe essere dovuto, tenuto anche conto delle frequenti variazioni granulometriche dei terreni costituenti l'acquifero superficiale, al carattere multistrato dell'acquifero in tali aree.

Il ricorso alla cross-correlazione (figg. 7 e 8) segnala che l'influenza delle precipitazioni è massima per un ritardo di 2-3 mesi per i pozzi F7 e F8, di 6 mesi nel pozzo F4 e per valori intermedi nel pozzo F5. Il diverso valore del ritardo più significativo è risultato correlabile con la soggiacenza. Per le stazioni F4, F5, F7 e F8 la quota piezometrica raggiunge la massima correlazione con la temperatura, di tipo discordante, con uno sfasamento temporale di 2-3 mesi. Il ritardo più significativo per il deflusso è di 1 o 2 mesi. Le quote piezometriche risultano in correlazione massima, in ordine decrescente, con il deflusso (coefficiente di correlazione maggiore di 0,5), con la temperatura (0,4 circa) e con la piovosità (0,1-0,2).

Per quanto riguarda la stazione F3, la variabile temperatura è in correlazione negativa con la piezometria, così come accade nelle altre stazioni, ma con uno sfasamento temporale inferiore di un solo mese. La falda idrica risente dell'effetto delle precipitazioni con un ritardo da 2 a 4 mesi. Infine, l'impulso determinato dal deflusso superficiale provoca una risposta rapida della falda, ritardata soltanto di uno o due mesi, e rapidamente «dimenticata» dal sistema acquifero nei mesi successivi. Si può quindi concludere, confrontando anche il valore della soggiacenza misurata per la stazione F3, che i tempi rapidi di risposta dell'acquifero, nei confronti delle variabili climatiche e di deflusso, sono spiegabili considerando il basso valore della soggiacenza, pari a circa 7 m, per quanto stimabile dai dati disponibili. L'entità del ritardo più significativo si dimostra, quindi, uno strumento per la valutazione della «comunicabilità» tra l'esterno e la falda idrica sotterranea.

#### 4.1. Analisi spettrale

Sono state selezionate due serie temporali, relative alle stazioni piezometriche F2 e F3, ubicate rispettivamente in area urbana e in area agricola, in quanto rappresentative delle due principali tipologie di comportamento della falda idrica sotterranea in relazione agli «impulsi» naturali ed antropici.

Le suddette serie sono state scomposte, secondo un modello additivo, seguendo la tradizionale impostazione dell'analisi delle serie temporali ed utilizzando il metodo X-11. Si distinguono tre componenti in ciascuna misura: la componente ciclo-trend, quella stagionale e quella accidentale o irregolare. Dalla serie accidentale è stata ricavata, attraverso l'analisi spettrale, la densità spettrale (POLEMIO & DRAGONE, 1999 e relativa bibliografia). L'analisi spettrale ha messo in evidenza il persistere di una non trascurabile componente ciclica nel comportamento della falda idrica. In particolare, l'andamento della densità spettrale relativa alla stazione F3 (fig. 9) mostra l'influenza fondamentale che la ciclicità semestrale, fondamentalmente da legarsi all'alternarsi della stagione piovosa a quella arida, ha nella componente accidentale. Le maggiori influenze sono state comunque registrate nei campi delle basse frequenze, ad evidenziare la grande capacità modulatrice, ossia la buona memoria, dell'acquifero. Al contrario, il grafico relativo alla stazione F2 (fig. 10) mostra la distribuzione dei picchi in un campo molto ampio di frequenze, in particolare evidenzia il forte condizionamento nel campo delle alte frequenze. Nel caso del pozzo urbano la componente acci-



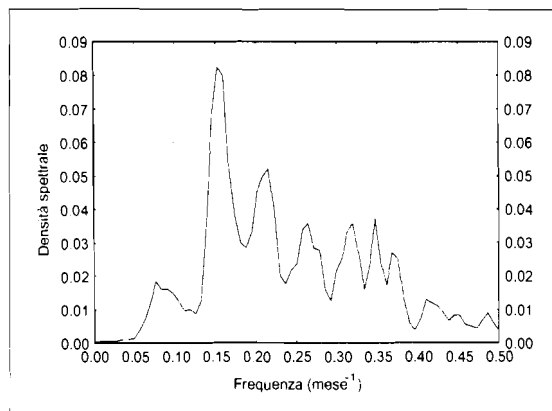


Figura 9. Densità spettrale della componente irregolare o accidentale della stazione F3.

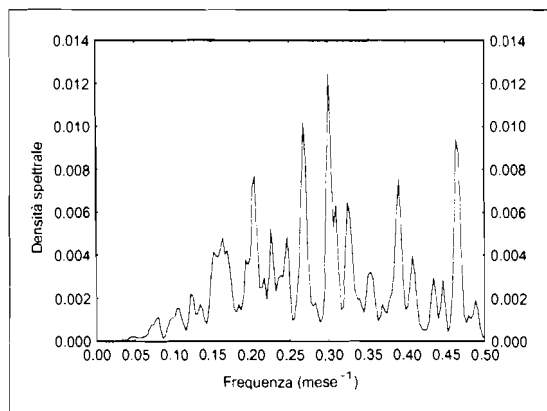


Figura 10. Densità spettrale della componente irregolare o accidentale della stazione F2.

dentale appare del tutto casuale. Il comportamento osservato non può essere imputabile altro che all'influenza antropica.

## 5. CONCLUSIONI

Mediante l'utilizzo di metodi di statistica applicati alle serie storiche è stato possibile evidenziare alcuni caratteri dell'acquifero superficiale del Tavoliere e della relativa falda idrica, quali il regime piezometrico, i rapporti intercorrenti tra le precipitazioni meteoriche, il deflusso fluviale e le variazioni piezometriche.

Lo studio del regime della falda idrica sotterranea ha evidenziato una sostanziale diversità di comportamento tra pozzi ubicati in aree agricole e pozzi ubicati in aree urbane, diversità dovuta all'influenza che sui secondi hanno le perdite dalle reti idriche.

La ricostruzione degli aspetti tendenziali, negli ultimi 60 anni, delle variazioni piezometriche ha mostrato un sensibile abbassamento della quota piezometrica nei pozzi ubicati in aree agricole, al contrario, nei pozzi ubicati in aree urbane si registra un innalzamento della stessa. Il calo piezometrico misurato nei pozzi agricoli trova una giustificazione nel crescente utilizzo che si è fatto delle acque della falda sotterranea e in particolare durante la siccità con cui si sono conclusi gli anni '80.

Per quanto riguarda gli aspetti strettamente idrogeologici, evidenziati dal presente studio, è possibile fare le seguenti osservazioni: la falda sotterranea risulta maggiormente influenzata dai deflussi superficiali che dalle precipitazioni; l'entità del ritardo più significativo nelle cross-correlazioni è anche utile per la valutazione della «comunicabilità» tra la

falda idrica sotterranea e l'esterno; l'acquifero mostra un rilevante effetto memoria, imputabile alla notevole estensione, alla discreta potenza e, in genere, alle buone caratteristiche idrologiche dell'acquifero, che modulano notevolmente qualsiasi impulso «climatico» esterno che sia di breve durata.

Gli elementi raccolti segnalano un progressivo depauperamento della stessa. La falda idrica sotterranea del Tavoliere potrebbe essere vista, al contrario, come una potenziale riserva idrica da utilizzare quale risorsa integrativa in particolari condizioni di emergenza, così come verificatosi, in modo caotico e disorganizzato, sul finire degli anni '80. Si rende necessaria, quindi, una politica gestionale della risorsa idrica sotterranea che consenta all'acquifero di accumulare acque sotterranee nei periodi umidi, in cui abbondano le acque di superficie, per restituirle nei periodi aridi, svolgendo una funzione di compensazione pluriennale.

## BIBLIOGRAFIA

A.A.V.V. (1988) - *Carta Geologica dell'Appennino Meridionale (1988)*. Atti 74° Congr. Soc. Geol. It., Sorrento, 13-17 Settembre 1988.

COTECCHIA V., FERRARI G., FIDELIBUS M.D., POLEMIO M., TADOLINI T., TULIPANO L. (1995) - *Considerazioni sull'origine e rinnovabilità delle acque presenti in livelli sabbiosi profondi del Tavoliere di Puglia*. Atti del «2° Convegno Nazionale sulla protezione e gestione delle acque sotterranee: metodologie, tecnologie e obiettivi», Quaderni di Geologia Applicata, supplemento 1-1995.

COTECCHIA V. & POLEMIO M. (1995) - *L'inquinamento e il sovrasfruttamento delle risorse idriche sotterranee pugliesi*. 6° Workshop Progetto strategico Clima, Ambiente e Ter-

ritorio nel Mezzogiorno, Taormina, 13-15 Dicembre 1995.

IPPOLITO F., COTECCHIA V., DE MARCHI G. & DENTICE R. (1958) - *Indagine sulle acque sotterranee del Tavoliere di Puglia*. Cassa per il Mezzogiorno, Roma. 1-56.

POLEMIO M. (1994) - *Il regime della falda costiera ionica di Metaponto*. Convegno sul tema: «Il ruolo dei fluidi nei problemi di ingegneria geotecnica». Mondovì (Cuneo) 1994.

POLEMIO M. & DRAGONE V. (1999) - *Serie storiche piezometriche delle unità idrogeologiche pugliesi: regime*

*piezometrico, effetti climatici e antropici*. Atti del 3° Conv. Naz. sulla Protezione e Gestione delle Acque Sotterranee per il III Millennio, Parma.

TADOLINI T., SDAO F., FERRARI G. (1990) - *Grado di vulnerabilità della falda superficiale del Tavoliere di Foggia nei confronti di possibili inquinanti antropici*. Atti del I Conv. Naz. sulla Protezione e Gestione delle Acque Sotterranee, pp.291-303. Modena.

TRAMONTE R. (1955) - *Contributo allo studio delle acque sotterranee di Capitanata*. Laterza editore. I-III, Bari.