Metodi Statistici e Matematici per l'Analisi delle Serie Idrologiche

Atti della Giornata di Studio
tenuta a Napoli, 7 Maggio 2004

A cura di

Domenico PICCOLO
Ordinario dell'Università degli Studi di Napoli Federico II
Dipartimento di Scienze Statistiche

&

Lucio UBERTINI
Ordinario dell'Università degli Studi di Roma "La Sapienza"
Dipartimento di Idraulica, Trasporti e Strade

TREND TERMOPLUVIOMETRICI, SICCITÀ E DISPONIBILITÀ DI ACQUE SOTTERRANEE

Maurizio Polemio, Domenico Casarano, Vittoria Dragone

CNR – IRPI, Sezione di Bari, c/o Politecnico di Bari, Via Orabona 4, 70125 Bari

Sommario

Lo studio caratterizza le modificazioni tendenziali delle principali variabili che determinano la disponibilità di risorse idriche. Verificata la recente ed anomala incidenza di periodi siccitosi, si valutano gli effetti tendenziali sulla disponibilità di acque sotterranee.
Si utilizzano dati mensili inerenti le precipitazioni meteoriche e le temperature atmosferiche di 126 stazioni collocate in Italia meridionale, tra il 1821 e il 2001. Si osservano cali tendenziali della piovosità effettiva in 114 stazioni con trend negativi fino a –9 mm/anno. La tendenza negativa riguarda più del 95% dell'area; il test di Mann-Kendall ne conferma la significatività su scala locale e regionale. In particolare, emerge un consistente deficit di precipitazioni a partire dal 1980. La tendenza è negativa dall'autunno alla primavera ed è molto accentuata in inverno. Se le variazioni tendenziali di temperatura non sono risultate evidenti ed omogenee, il calcolo della piovosità efficace ha segnalato una tendenza al calo ancora più grave di quanto osservato per la piovsità effettiva, stante la maggiore incidenza del calo pluviometrico nei mesi umidi.
Gli effetti sulle acque sotterranee sono valutati mediante serie storiche mensili, dal 1965 al 2003, relative a 63 stazioni piezometriche ubicate nei principali acquiferi della Puglia. Mediante metodi di statistica delle serie storiche si caratterizzano i rapporti intercorrenti tra piovosità, temperatura e variazioni piezometriche. I trend piezometrici risultano negativi: equivalgono a cali piezometrici considerevoli in tutte le unità idrogeologiche.

1. Introduzione

L'evoluzione del clima su scala planetaria e la possibile influenza delle attività umane sono sempre più spesso all'attenzione generale. Anche in occasione di eventi a scala locale, spesso si fa riferimento a tali fenomeni, a volte in modo generico e contraddittorio. Ciò è accaduto anche tra il 2000 e il 2002, quando prolungate siccità hanno colpito l'Italia meridionale, causando notevoli problemi per l'approvvigionamento idrico.
Questo studio ha come finalità la caratterizzazione delle tendenze evolutiva dei principali fattori climatici, piovosità e temperatura, e dei relativi regimi, significativi per la formazione della piovosità efficace o utile, l'aliquota della piovosità effettiva in grado di rendere disponibili risorse idriche. Sulla base di tali conoscenze, estese nel tempo, fino ad utilizzare tutti i dati strumentali disponibili e nello spazio fino a considerare tutta l'Italia meridionale, si valuta l'effetto di tali risultati sulla disponibilità di risorse idriche sotterranee in Puglia.
In termini di metodologie, si è fatto ricorso all'analisi della regressione lineare multipla, dell'autocorrelazione, della crosscorrelazione, allo studio della densità spettrale delle componenti residue delle serie storiche destagionalizzate e detrendizzate.
Particolare attenzione si è rivolta alla valutazione della correlazione esistente tra le serie storiche considerate. La correlazione spaziale è stata utilizzata al fine di colmare alcune brevi lacune presenti nelle serie selezionate. La correlazione è stata considerata anche per la

valutazione a scala regionale della significatività delle tendenze registrate, utilizzando una estensione del test di Mann-Kendall (Mann 1945, Kendall 1975, Dietz e Kileen, 1981).

2. Lo studio delle variabili climatiche

Le serie storiche mensili della piovosità e della temperatura atmosferica riguardano il territorio di Campania, Puglia, Calabria e Basilicata, nel periodo 1821-2001 (Eredia, 1918; SIMN 1916-2000). Le 126 stazioni utilizzate (figura 1), selezionate in base alla lunghezza e l'assenza di lacune delle serie storiche nonché la densità delle stazioni e la continuità delle variabili spazialmente elaborate, operano da prima degli anni '20 (Cotecchia et al., 2003).
Le brevi lacune presenti sono state colmate mediante le serie delle stazioni a minore distanza e meglio correlate. Sono state selezionate in genere 6 stazioni adiacenti, purché il coefficiente di correlazione fosse alto (r>0,7). La regressione multipla è stata applicata alle deviazioni dalla media della stazione, normalizzata in base alla rispettiva deviazione standard.
Le operazioni cartografiche e geostatistiche sono state effettuate in ambiente GIS, operando su una griglia di celle quadrate, di lato pari ad un chilometro. Il valore associato a ciascuna cella si determina pesando i dati relativi alle stazioni più vicine, con pesi inversamente proporzionali al quadrato della distanza. Utilizzando le funzionalità del GIS, sono state determinate numerose grandezze medie per l'intero territorio o per le regioni che lo costituiscono, tra le quali la *Piovosità Media Annua*, PMA, e l'*Afflusso Medio Annuo*, AMA (Tabella 1, Figura 1).
Per ciascuna serie storica è stata calcolata la retta di regressione lineare, con il metodo dei

Regione	PMA	AMA	TR	T/PMA	VT	VT/PMA
Puglia	644	12.500	-0,80	-0,12 %	-65	-10,1 %
Basilicata	893	8.900	-1,81	-0,20 %	-145	-15,9 %
Calabria	1043	15.700	-2,87	-0,28 %	-230	-22,0 %
Campania	1118	15.200	-2,44	-0,22 %	-196	-17,5 %

Tabella 1: Piovosità Media Annua (PMA, mm), Afflusso Medio Annuo (AMA, Mm^3), Trend (TR, mm/anno) e Variazione Tendenziale (VT, mm) nel periodo di studio.

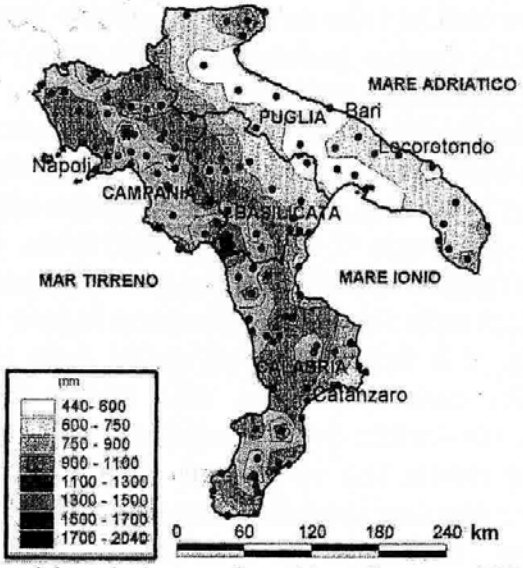

Figura 1: Stazioni termopluviometriche selezionate, piovosità media annua (1921-2001) e regioni.

minimi quadrati. Il coefficiente angolare di tale retta (TR) è indicativo della tendenza della piovosità annua di ogni serie storica studiata. Su 126 stazioni considerate, 114 hanno mostrato coefficienti angolari negativi, ovvero tendenza al calo pluviometrico, con valori fino a –9 mm/anno. Le altre 12 hanno mostrato valori positivi, con massimi pari a circa 2,5 mm/anno. Dei TR, risultano significativi" al 5% 60 andamenti negativi e solo 2 andamenti positivi.
L'area interessata da tendenza negativa è il 96% di quella complessiva. La tendenza al calo pluviometrico è maggiore dove piove di più: la tendenza negativa è contenuta entro –0,8 mm/anno dove PMA<700 mm, varia tra –1,5 e –3,0 mm/anno dove 700<PMA<1300 mm, e raggiunge il valore estremo di -6,5 mm/anno nelle zone con PMA>1800 mm.
In termini di afflusso, meno del 2% proviene da aree in cui si sono osservati incrementi, mentre l'87% interessa aree dove il trend è minore di -0,5 mm/anno. Nelle regioni più piovose la tendenza al calo è quindi più marcata anche se rapportata alla PMA (Tabella 1).

2.1 La significatività del trend pluviometrico

Il test statistico di Mann-Kendall (Mann 1945, Kendall 1975), segnala l'esistenza di una tendenza delle serie storiche ($x_i, i=1..n$). se la relativa variabile si scosta dallo zero. Tale test restituisce una variabile data dalla seguente espressione:

$$S = \sum_{i=2}^{n} \sum_{j=1}^{i-1} \mathrm{sgn}(x_i - x_j)$$

Tale variabile, nel caso i dati non presentino una tendenza positiva o negativa, si distribuisce attorno al valore medio nullo con varianza data dall'espressione:

$$\sigma^2 = \frac{n(n-1)(2n+5)}{18}$$

dove n è il numero di dati presenti in ciascuna serie storica.
La Figura 2 rappresenta la distribuzione dello scostamento di tale variabile rispetto al valore medio nullo, normalizzato mediante la rispettiva deviazione standard. La tendenza è negativa per il 98% dell'area, con uno scostamento negativo superiore a una e a due deviazioni standard rispettivamente per il 75 e il 39%.
Il test di Mann-Kendall assume l'ipotesi che i dati della serie storica siano indipendenti, cioè che non siano autocorrelati. Nel caso contrario, la probabilità per la variabile di test tende ad essere sottostimata, portando a rigettare l'ipotesi nulla (assenza di trend) anche in casi in cui essa è in realtà valida. Questo effetto deve essere considerato quando l'autocorrelazione per intervallo temporale unitario è maggiore di 0,1 (Hirsch et al., 1982). In questo caso, il test di Mann-Kendall deve essere applicato alla serie filtrata:

$$y_i = x_i - r_1 x_{i-1}$$

detta "pre-whitened" in quanto assume l'autocorrelazione nulla tipica di un processo "bianco".
Nel caso specifico, si è effettuato il "pre-whitening" della serie storica anche per coefficienti di autocorrelazione inferiori, nel caso in cui la deviazione negativa delle variabile di Mann-Kendall superasse 1,5 σ. La deviazione negativa della variabile di Mann-Kendall è risultata confermata anche in questo caso (Tabella 2), con qualche apprezzabile variazione solo delle serie con le tendenze negative più accentuate.
In termini di correlazione spaziale della statistica di Mann-Kendall, se S_i è la variabile di Mann-Kendall per la stazione i, è possibile calcolare una media regionale S se le serie temporali hanno uguale lunghezza e, quindi, uguale varianza σ^2. Se le diverse serie temporali sono incorrelate tra

Serie	<0	$<-\sigma$	$<-2\sigma$	$<-3\sigma$
originali	88,9%	69,0%	46,8%	23,8%
prewhitened	89,8%	72,2%	40,7%	11,1%

Tabella 2: Statistica della variabile di Mann-Kendall. Percentuali delle serie rispetto al numero totale disponibile.

loro, la varianza di S sarà σ^2/m, dove m è il numero di stazioni. Se le serie temporali sono tra loro correlate, e ρ_{ij} è il coefficiente di correlazione tra le serie storiche relative alle due stazioni i e j, è possibile definire il numero equivalente di stazioni m_{eq} (Douglas et al., 2000):

$$m_{eq} = \frac{m^2}{m + 2\sum_{k=1}^{m-1}\sum_{l=1}^{m-k}\rho_{k,k+l}}$$

La varianza della media regionale S sarà quindi $\sigma_S^2=\sigma^2/m_{eq}$. Le stazioni selezionate sono state divise, con criteri idrografici, in tre gruppi, definiti considerando i limiti di competenza delle tre Sezioni del SIMN (41 per Napoli, 28 per Bari e 56 per Catanzaro). Se si considerano le serie storiche originali (senza *pre-whitening*), risulta m_{eq} pari a 1,95 per Napoli, 1,85 per Bari, e 2,54 per Catanzaro e la media regionale S (in unità di deviazione standard), rispettivamente $-2{,}81\,\sigma_S$, $-1{,}17\sigma_S$, e $-3{,}59\ \sigma_S$. Per le serie *pre-whitened*, m_{eq} risulta pari a 1,84 (Napoli), 1,85 (Bari), e 2,47 (Catanzaro) mentre S rispettivamente $-2{,}26\ \sigma_S$, $-1{,}18\ \sigma_S$, $-3{,}21\ \sigma_S$. Nel caso dei dati in esame, considerando gli effetti dell'autocorrelazione, la tendenza negativa appare appena attenuata ed è quindi confermata nella sua sostanziale rilevanza.

Il test di Mann-Kendall permette anche una stima alternativa ed indipendente della tendenza complessiva qualora si assuma lo stimatore B, definito per ciascuna serie storica dalla mediana dei coefficienti angolari $\delta_{kl} = (x_k-x_l)/(k-l)$, con k ed l generico dato della serie, per tutte le combinazioni con $k \neq l$. Tale stimatore, essendo basato su una mediana, è più "robusto" rispetto alla presenza di valori estremi, anche anomali, nelle serie temporali. La Figura 3 mostra che lo scostamento dello stimatore B è in genere modesto rispetto al corrispondente trend TR, definito dalla retta di regressione.

2.2 Analisi delle medie mobili e delle recenti siccità

Dall'analisi delle medie decennali, generalmente piovosi risultano i decenni '30, '50, con l'eccezione di parte della Campania, e '70, mentre il maggiore deficit di precipitazioni è quello registrato dagli ultimi due decenni (1981-2000) (Cotecchia et al., 2003; Polemio e Casarano, 2004). Per tener conto della minore e variabile durata delle siccità, sono state analizzate le medie mobili biennali, triennali e quinquennali, di cui la Figura 4 rappresenta un esempio. Le medie pluriennali mostrano che i periodi siccitosi più significativi siano concentrati negli ultimi 25 anni. Il 2000-2001 ed il 1989-1991 sono i due periodi di siccità più gravi

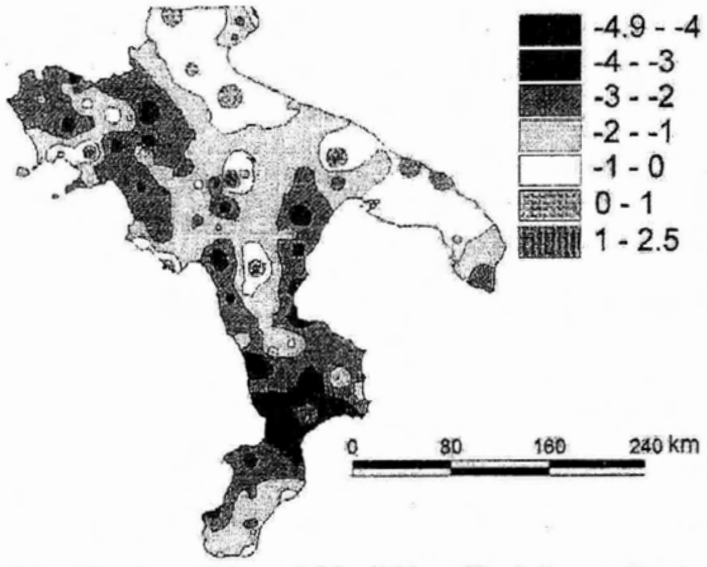

Figura 2: Mappa della variabile di Mann-Kendall normalizzata mediante la deviazione standard.

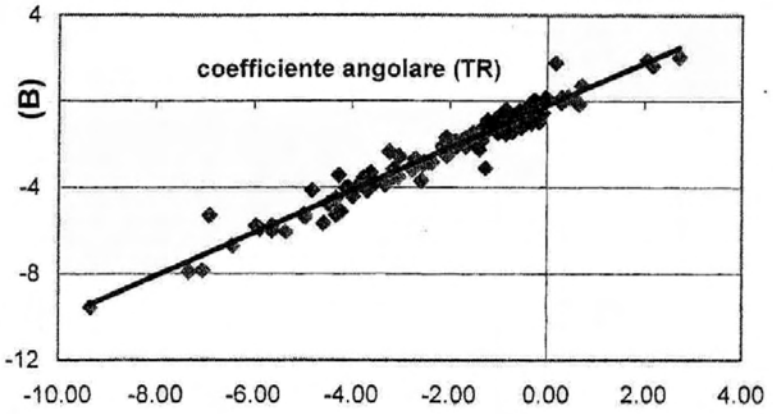

Figura 3: Scatter plot dello stimatore B rispetto al corrispondente trend TR (coefficiente angolare retta di regressione, mm/anno).

(minimi assoluti delle medie mobili di due e tre anni), seguiti da eventi alla fine degli anni '20 (in particolare in Puglia), e da eventi degli anni '40, con l'eccezione della Calabria. In Campania il periodo 1997-2001 segna un record negativo anche come media quinquennale; ovunque esso si situa nel 25° percentile inferiore, appena maggiore dei minimi assoluti verificatisi tra il 1942 ed il 1950 in Puglia e tra gli anni '80 e '90 in Basilicata e Calabria. Le medie mobili quinquennali si mantengono inferiori alla media, in modo ininterrotto, a partire dal 1978 per Basilicata e Calabria ed a partire dal 1983 per la Campania.

Per verificare se sia attendibile affermare che circa dal 1980 si è consilidata una generalizzata tendenza al calo pluviometrico, si è applicato il test t-Student alle serie storiche del periodo 1981-2001 e 1921-1980. Su 126 stazioni, 123 mostrano nell'ultimo ventennio piovosità media inferiore a quella dei 60 anni precedenti. In 95 casi si osservano deviazioni con probabilità inferiore al 5%, in 67 casi tale significatività è dell'1%.

2.3 Il regime pluviometrico e le modificazioni stagionali

L'analisi delle modificazioni del regime pluviometrico è stata impostata su base stagionale (Figura 5). Emerge che la tendenza negativa riguarda in prevalenza la stagione invernale. Il trimestre dicembre-febbraio, mediamente il più piovoso su gran parte dell'area esaminata, determina da solo, su base regionale, almeno il 75% della tendenza negativa complessiva. Il deficit di precipitazioni riscontrato negli ultimi 20 anni deriva prevalentemente dal mancato contributo delle precipitazioni invernali. Quasi ovunque in controtendenza l'estate, in cui i trend positivi sono dovuti a brevi eventi piovosi di notevole intensità. Visto il carattere spiccatamente arido della stagione, in termini di piovosità efficace tale controtendenza si dimostrerà inifluente.

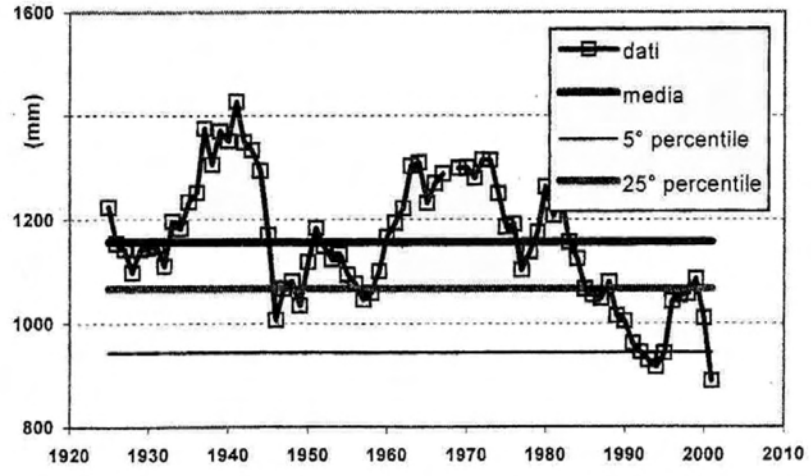

Figura 4: Media mobile di 5 anni dei valori relativa al territorio della Campania

Per 26 delle 126 stazioni sono disponibili dati mensili di temperatura a partire dal 1924. Da tali dati non emerge una tendenza univoca nel periodo, sebbene negli ultimi anni si siano spesso registrati valori superiori alla media. Il test di Mann-

Serie	>0	$>\sigma$	$>2\sigma$	<0	$<-\sigma$	$<-2\sigma$
originali	46,2%	30,8%	19,2%	53,8%	30,8%	23,1%
prewhitened	53,8%	19,2%	3,8%	46,2%	26,9%	7,7%

Tabella 3: Statistica della variabile di Mann-Kendall per le 26 serie termometriche

Kendall, applicato alle serie storiche di temperature medie annuali, non mostra una prevalenza significativa di trend negativi o positivi (Tabella 3). Si osserva che le serie originarie sono fortemente autocorrelate per Δt=1 anno (r_1 medio = 0,356), per cui è necessario il *prewhitening*. La distribuzione delle serie originarie è significativamente diversa da una gaussiana, con un eccesso di valori estremi (curtosi elevata). Il massimo del valore assoluto della tendenza è intorno a 0,013°C/anno, con variazione tendenziale (positiva o negativa) massima nel periodo pari a 0,9°C. Il *prewhitening* avvicina la distribuzione ad una gaussiana.
Il fattore temperatura è comunque determinante nell'accentuare gli effetti della scarsità di precipitazioni. A tal fine si è effettuata una stima degli andamenti della piovosità efficace. L'evapotraspirazione reale *Er* è stata calcolata mediante la formula di Turc (Turc 1954):

$$E_r = P/\sqrt{0.9+\left(P^2/L^2\right)}$$

con P piovosità annuale ed L dato da

$$L = 300 + 25T_p + 0.05T_p^3$$

dove T_p sostituisce T della formula di Turc ed è calcolato in funzione di piovosità e temperatura mensili P_i, T_i (i=1, 2, ...12) (Castany 1968):

$$T_p = \sum P_i T_i / P$$

Utilizzando come valori di input i dati mensili termopluviometrici relativi a ciascun anno idrologico, si è ottenuta una stima dell'evapotraspirazione annuale, utilizzata per calcolare la piovosità efficace PE come differenza tra piovosità effettiva ed evapotraspirazione reale. Nelle stazioni considerate, la piovosità efficace media è risultata tra 52 e 1283 mm. La tendenza nel periodo 1924-2001 è negativa per tutte le stazioni e varia tra –0,4 e –4,9 mm/anno. Nel periodo in esame, si ricava una variazione tendenziale negativa compresa tra il 33 ed il 39% del valore medio. Questa situazione, drammatica per gli effetti sulle risorse idriche, è dovuta a due fattori concomitanti. La forte tendenza negativa delle precipitazioni efficaci è dovuto al forte calo invernale della piovosità effettiva, quando l'evapotraspirazione reale è minima e molto minore di qeust'ultima; al contrario, la tendenza positiva estiva non fornisce contributi per il prevalere dell'evapotraspirazione.

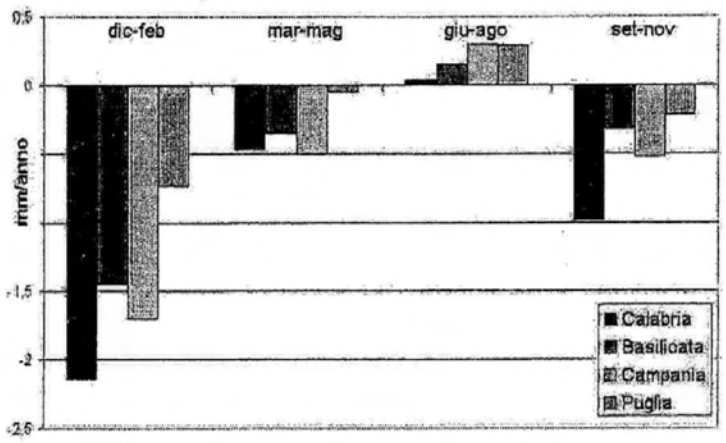

Figura 5: Trend della piovosità stagionale per ciascuna regione.

3. Gli effetti sulle acque sotterranee

Le *Risorse Idriche Sotterranee della Puglia* (RISP nel seguito) costituiscono un riferimento importante per lo sviluppo regionale, in conseguenza della modestissima disponibilità di risorse idriche superficiali. Il pregio delle RISP è peraltro elevato, almeno lontano dalla costa, tanto che si ritiene

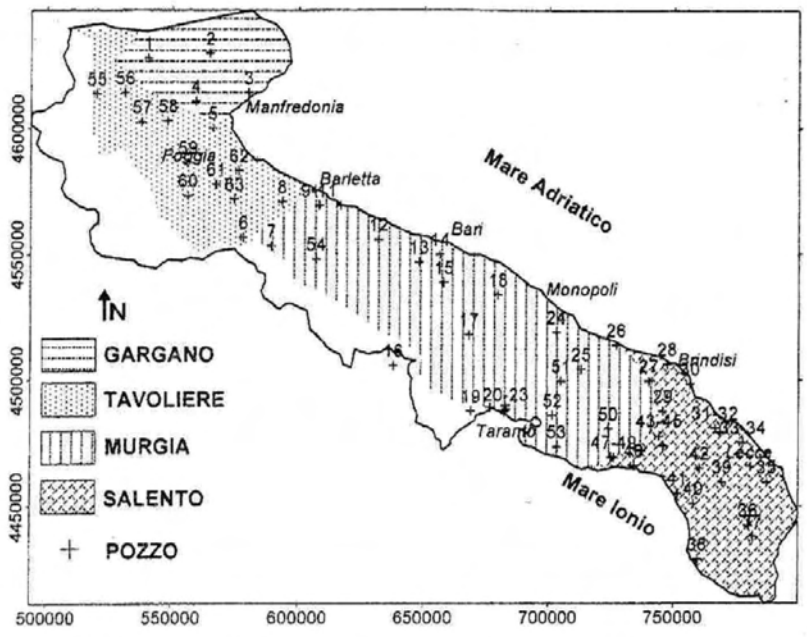

Figura 6: Unità idrogeologiche secondo REGIONE PUGLIA (1983) e pozzi piezometrici.

debbano costituire una risorsa strategica, destinata a fornire acqua di qualità, da gestire in vista di fabbisogni futuri di emergenza, in particolare in relazione al rischio di nuove siccità.

Le unità idrogeologiche sono convenzionalmente quattro (Regione Puglia, 1983): Gargano, Tavoliere, Murgia e Salento (Figura 6). Eccetto il Tavoliere, costituito da un acquifero poroso, le restanti unità idrogeologiche sono caratterizzate da ampi e potenti acquiferi con sede nelle rocce calcaree e/o calcareo-dolomitiche del Mesozoico (Polemio 2000).

Le serie piezometrice sono relativi a 63 pozzi, selezionati tra quelli segnalati dalla Regione Puglia (1983) e dal SIMN Bari (1916-2000). I dati più recenti (in genere dal 1995) sono inediti (Ente per lo Sviluppo dell'Irrigazione), i rilievi del 2003 sono stati svolti direttamente dall'IRPI Bari (Tabella 4).

Dato che la disponibilità di acque sotterranee dipende da molteplici fattori, sono state considerate, per ciascuna serie piezometrica, le serie idrogeologicamente più significative non solo di piovosità e temperatura ma anche di deflusso fluviale nonché, in modo qualitativo, stante l'indisponibilità di dati, il prelievo di acque sotterranee e l'uso di risorse esterne addotte dagli acquedotti (Polemio et al., 1999; Polemio e Dragone, 1999). Il complesso di tali dati è stato caratterizzato mediante analisi dell'autocorrelazione, della crosscorrelazione e della densità spettrale della componente accidentale. Quest'ultima applicazione permette di caratterizzare peculiarità dell'acquifero piuttosto che del ciclo idrologico, non sarà quindi descritta nel seguito (Polemio 1994, Polemio e Dragone 1999).

Le serie cronologiche piezometriche sono molto regolari per il Tavoliere. Nelle restanti unità idrogeologiche contengono numerose lacune: sono disponibili da un minimo di 17 rilievi mensili ad un massimo di 309; per tutte queste serie è disponibile regolarmente il periodo 1973-1978, con minore regolarità il 1995-1997.

I coefficienti piezometrici di autocorrelazione mostrano un andamento progressivamente decrescente, a partire da valori prossimi all'unità. Ciò comporta che le falde idriche pugliesi manifestano un rilevante effetto memoria, cioè la quota piezometrica di un dato mese dipende fortemente da quella dei mesi precedenti, in modo significativo e decrescente all'aumentare del ritardo, in genere fino a non meno di 3 mesi: ciò costituisce una peculiare caratteristica degli acquiferi, di notevole importanza soprattutto in periodi siccitosi. Più duraturo e

UI	N. pozzi	Dati disponibili		CA minimo	Tendenza più Probabile
		da	a		
Tavoliere	12	1929	1994	-0,034	Forte calo
Gargano	4	1975	1978	-0,003	Calo moderato?
Murgia	30	1965	2003	-0,020	Forte calo
Salento	17	1965	2003	-0,010	Calo

Tabella 4: pozzi per unità idrogeologica (UI). Tendenza osservata espressa dal minimo CA osservato (m/mese).

accentuato l'effetto memoria di Salento e Tavoliere, a riprova delle ottime caratteristiche di queste unità idrogeologiche.
Le relazioni tra le variabili piezometriche e quelle climatiche con sfasamenti temporali da 1 a 12 mesi hanno registrato valori di crosscorrelazione significativi per un ritardo di 1-4 mesi. L'effetto delle precipitazioni si risente fino a un massimo di 2-3 mesi, mentre la migliore correlazione con la temperatura si registra con un ritardo di 4 mesi. La circostanza che anche le variazioni termiche risultino significative, a luoghi più della piovosità, come nel caso del Tavoliere, è dovuta alla natura del clima, diffusamente semiarido. In tale clima, la temperatura è significativa per due diversi fenomeni: il primo, assolutamente naturale, è l'evapotraspirazione, che "regola" la disponibilità di piogge efficaci ai fini dell'infiltrazione, l'altro di natura antropica, è legato al deficit idrico estivo, dovuto principalmente alle alte temperature, che, in virtù delle prevalenti attività agricole, viene compensato mediante diffusi emungimenti.
Tali risultati confermano la rilevanza delle variabili termopluviometriche, il cui trend è stato caratterizzato a scala sinottica. Il trend piezometrico è stato espresso speditamente mediante il coefficiente angolare CA della retta di regressione (Tabella 4).
Le tendenze piezometriche erano già prevalentemente negative al 1997 (Polemio et. al, 1999; Polemio e Dragone, 1999). Procedendo dal Salento verso la Murgia CA decresce. I valori minimi, i peggiori, si osservano nell'interno della Murgia, in particolare di quella sudorientale, dove si registrano le massime quote piezometriche, con valori di CA minori di -0,02 m/mese. Nella Murgia, come anche per le altre unità idrogeologiche, il CA si approssima a zero, come naturale trattandosi di acquiferi costieri, procedendo dall'interno verso la costa. Per il Gargano si osservano situazioni intermedie tra Murgia e Salento; il numero limitato di pozzi disponibili e la brevità delle serie non permette approfondimenti (Polemio e Dragone, 1999). Nel caso del Tavoliere la drammatica tendenza al calo piezometrico è stata di recente confermata da rilievi effettuati nel 2002 (Polemio et al., 2003).
La Tabella 5 riportata i risultati statistici per i pozzi della Murgia e del Salento per i quali si dispone di dati di settembre-dicembre 2003. La siccità del 2000-2002 ha ulteriormente aggravato la situazione, in particolare per il Salento. CA ha nuovamente evidenziato, per tutti i pozzi, un valore negativo, generalmente peggiore di quello determinato al 1997, che comporta una tendenza diffusa, sia pure lenta in alcuni casi, al calo piezometrico. La situazione si è aggravata in particolare nel Salento. Tutto ciò nonostante la siccità sia di fatto terminata sul finire del 2002. Sulla base delle conoscenze in tema di trend piezometrico, e delle variabili da cui esso dipende, la tendenza piezometrica più probabile all'attualità è diffusamente grave (Tabella 4).

Pz	A	CA	VAR-CA
14	1965	-0,0020	-44
26	1973	-0,0018	-318
27	1973	-0,0089	-202
29	1973	-0,0027	-32
30	1973	-0,0035	-315
31	1978	-0,0026	-178
32	1973	-0,0075	-827
33	1973	-0,0038	-118
34	1973	-0,0100	-785
35	1973	-0,0087	-252
36	1973	-0,0092	-91
38	1973	-0,0025	19
39	1975	-0,0050	-233
41	1973	-0,0007	28
42	1965	-0,0002	-210
43	1968	-0,0030	-161
44	1973	-0,0060	-24
46	1973	-0,0046	-108

Tabella 5: Situazione piezometrica al 2003. Pozzo (Pz), inizio misure (A), coefficiente angolare della retta del trend piezometrico (CA, m/mese) e variazione percentuale rispetto al trend 1997 (VAR-CA, %).

4. Conclusioni

La tendenza al calo delle precipitazioni nel periodo 1921-2001 interessa la quasi totalità dell'area considerata. Sebbene generalizzata e di entità significativa, ovvero incompatibile con l'ipotesi di piovosità media costante nel tempo, tale tendenza non si delinea in modo omogeneo sull'area in esame, né in modo stazionario nel periodo considerato.
La tendenza al calo pluviometrico in valore assoluto più accentuata si verifica nella zona Tirrenica tra Calabria e Basilicata e nel Catanzarese, mentre la Puglia è caratterizzata da una tendenza decrescente più contenuta ma ben più rilevante ai fini delle siccità in quanto colpisce drammaticamente un territorio già poco piovoso. Il calo pluviometrico si è concentrato in particolare nella stagione invernale, solitamente la più piovosa in gran parte dell'area in esame. Tale circostanza causa una ancora più accentuata tendenza al calo della piovosità efficace.
La ricostruzione degli aspetti tendenziali, negli ultimi 30 anni, delle variazioni piezometriche ha mostrato un abbassamento considerevole della quota piezometrica in tutte le unità idrogeologiche pugliesi, con valori più accentuati per le aree interne della Murgia e del Tavoliere e in rapido peggioramento per il Salento.
Tutti gli acquiferi considerati mostrano un effetto memoria notevole, in alcuni casi molto rilevante, effetto imputabile alle buone caratteristiche idrogeologiche degli acquiferi considerati.
Gli elementi raccolti segnalano un progressivo depauperamento delle falde idriche proprio dove si concentrano le acque sotterranee di migliore qualità.

Bibliografia

Castany, G. (1968) *Prospection et exploitation des eaux soutrrraines*. Dunod, Paris, France.

Cotecchia V., Casarano D., Polemio M. (2003), "Piovosità e siccità in Italia meridionale tra il 1821 ed il 2001, *L'Acqua*, Associazione Idrotecnica Italiana", N°2/2003

Dietz E.J., Kileen A. (1981), "A Nonparametric Multivariate Test for Monotone Trend with Pharmaceutical Applications", *Journal of the American Statistical Association* 76, pp 169-174.

Douglas E.M., R.M. Vogel, C.N. Kroll, "Trends in floods and low flows in the United States: impact of spatial correlation", *Journal of Hydrology* 240 (2000), 90-105

Eredia F. (1918), *Osservazioni Pluviometriche raccolte a tutto l'anno 1915 dal R. Ufficio Centrale di Meteorologia e Geodinamica*, Consiglio Sup. delle Acque, Min. LL.PP.; Estratto a cura di G. Girardi, Ufficio Idrografico e Mareografico di Bari, 2001.

Hirsch R.M., Slack J.r.,Smith R.A., "Techniques of trend analysis for monthly water quality data", *Water Resouces Research*, Vol.18 No.1 107-121; Febbraio 1982

Kendall M.G. (1975), *Rank correlation methods*, Charles Griffin, London.

Polemio M., Casarano D., "Rainfall and drought in southern Italy (1821-2001)", *Proceedings of UNESCO-IAHS-IWHA Symposium "Water Science? A basis for civilization"*, Roma, Dicembre 2003, in corso di stampa su *IAHS Publ. 286*, 2004

Mann H.B. (1945), "Non parametric tests against trend", *Econometrica*, 13, 245-259.

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. (2000) "Degradation risk owing to contamination and overdraft for Apulian groundwater resources (Southern Italy)". *Water resources management in a vunerable*

environment for sustainable development, UNESCO-IHP, Grifo Publishers, Perugia, 185-194.

Polemio M. Petrucci O. (2003) "The drought and the lowering of groundwater resources: an example from Calabria region (Southern Italy)". *Int. Conf. "Hydrology of the Mediterranean and semi arid regions"*, Montpellier, Aprile 2003.

Polemio M., Di Cagno M, Dragone V. (1999) "Effetti antropici e naturali sul degrado quantitativo delle acque sotterranee del Tavoliere". *Quaderni di Geologia Applicata*, Pitagora Editrice, Bologna, 1999, 4, 153-162.

Polemio M., Dragone V. (1999) , "Serie storiche piezometriche delle unità idrogeologiche pugliesi: regime piezometrico, effetti climatici ed antropici",. *Pubbl. GNDCI n. 2015, Quaderni di Geologia Applicata*, Pitagora Editrice, Bologna, 1999, 4, 143-152.

Polemio M., Dragone V., Limoni P.P. (2003) "Groundwater as main resources of a wide semiarid region: the case of apulian region (Southern Italy)". *Atti del Int. Symp. "The basis of civilization. Water Sciences?", IAHS-UNESCO*, Roma.

Regione Puglia (1983). *Piano di risanamento delle acque*. BUR n. 132/83, L.R. del 19/12/83 n. 24.

SIMN (1916-2000), *Annali Idrologici*; Sezioni di Bari, Napoli e Catanzaro.

SIMN (1958), *Precipitazioni medie mensili ed annue e numero dei giorni piovosi per il trentennio 1921-1950 (Mappe Allegate)*, Sezioni di Bari, Napoli e Catanzaro.

SIMN (1976), *Elenco delle stazioni termopluviometriche del Servizio Idrografico*, Pubbl. n. 27.

Turc, L. (1954) "Le bilan d'eau des sols. Relation entre les precipitations, l'évaporation et l'écoulement" *Ann Agron.* **5**, 491–596; **6**, 5–131, Paris