



## L'evoluzione temporale dell'inquinamento salino negli acquiferi pugliesi

*Polemio M., Dragone V., Limoni P.P.*



# L'evoluzione temporale dell'inquinamento salino negli acquiferi pugliesi

*Polemio M.<sup>1</sup>, Dragone V., Limoni P.P.*

## Riassunto

Per valutare l'evoluzione dell'intrusione marina e la risultante contaminazione salina, è stata individuata una soglia limite di concentrazione salina, pari a 0,5 g/l, tra l'acqua interessata dalla contaminazione dell'acqua di mare e l'acqua dolce. L'analisi considera l'andamento dell'isoalina 0,5 g/l, riferita al periodo 1981-2003. Il fenomeno della contaminazione salina è stato anche caratterizzato considerando 17 serie temporali della concentrazione mensile dello ione cloro, un parametro che è strettamente correlato alle variazioni di concentrazione della salinità negli acquiferi costieri. I dati, riferiti al periodo 1968-2001, sono stati correlati alle serie temporali delle precipitazioni e delle temperature. L'evoluzione della contaminazione salina nelle acque sotterranee è strettamente connessa alle annate siccitose e al sovrasfruttamento degli acquiferi.

[Parole chiave: inquinamento, intrusione marina, ione cloro, Puglia.]

## Abstract

To assess the spatial and time trend of salt contamination due to seawater intrusion for Apulian groundwater, a salinity threshold value dividing fresh groundwater from seawater contaminated groundwater is determined. The trend of 0.5 g/l salinity contour line in the period 1981-2003 is analysed. The salt contamination is also characterised with respect to 17 time series of monthly chlorine concentration, a parameter which can highlight the seawater contamination effects. Data from 1968 to 2001 are considered and compared with rainfall and temperature time series. The increased saline contamination is closely related to droughty years and to the increasing discharge by wells.

[Key words: pollution, seawater intrusion, Apulia]

## PREMESSA

Il carattere prevalentemente carsico del territorio pugliese, in particolare della Murgia e del Salento, lo rende sia povero di risorse idriche superficiali sia ricco di copiose acque sotterranee, anche di pregiata qualità, che hanno a tutt'oggi non poco contribuito allo sviluppo economico e sociale delle comunità locali.

La natura di tali risorse idriche, le particolari fenomenologie che ne regolano i processi di alimentazione, deflusso e scarica, l'intrinseca vulnerabilità dei relativi acquiferi e l'influenza che è esercitata dall'intrusione marina sulle acque sotterranee, rendono quanto

mai delicato il problema di una loro oculata gestione e di un loro corretto impiego. Sono dunque di attualità i problemi relativi alla degradazione qualitativa delle acque sotterranee per inquinamento antropico, derivante dalla pratica di utilizzare il suolo e il sottosuolo come ricettacolo finale di rifiuti di varia natura e dall'eccessivo uso di prodotti chimici in agricoltura, nonché per contaminazione salina riconducibile alla sottovalutazione della pericolosità dell'intrusione marina (Polemio, 2000).

A questo proposito, il contributo si pone la finalità di caratterizzare gli aspetti evolutivi, spazio-temporali, del degrado per inquinamento salino delle risorse idriche sotterranee pugliesi,

---

<sup>1</sup> CNR IRPI Istituto di Ricerca per la Protezione Idrogeologica

puttrotto in atto nel territorio considerato, la Murgia e il Salento.

### 1. INQUADRAMENTO IDROGEOLOGICO DELLA MURGIA E DEL SALENTO

Nell'area di studio si distinguono due strutture idrogeologiche denominate della Murgia e Salento (Fig. 1). Le due strutture idrogeologiche hanno in comune diversi aspetti. Includono ampie potenti porzioni di un vasto acquifero costiero, costituito in entrambi i casi da rocce calcaree e/o calcareo-dolomitiche del

Mesozoico. Le rocce carbonatiche mesozoiche sono interessate da fenomeni carsici e sono caratterizzati da un grado di fratturazione variabile nelle tre dimensioni, mostrando quindi, a luoghi, una elevata permeabilità (Grassi, 1973; Cotecchia, 1977). La permeabilità si presenta significativamente disomogenea e anisotropa. In entrambe le strutture si verifica il fenomeno dell'intrusione continentale di acque marine, per la quale la circolazione delle acque sotterranee dolci è sostenuta, a letto, da un corpo idrico salino.

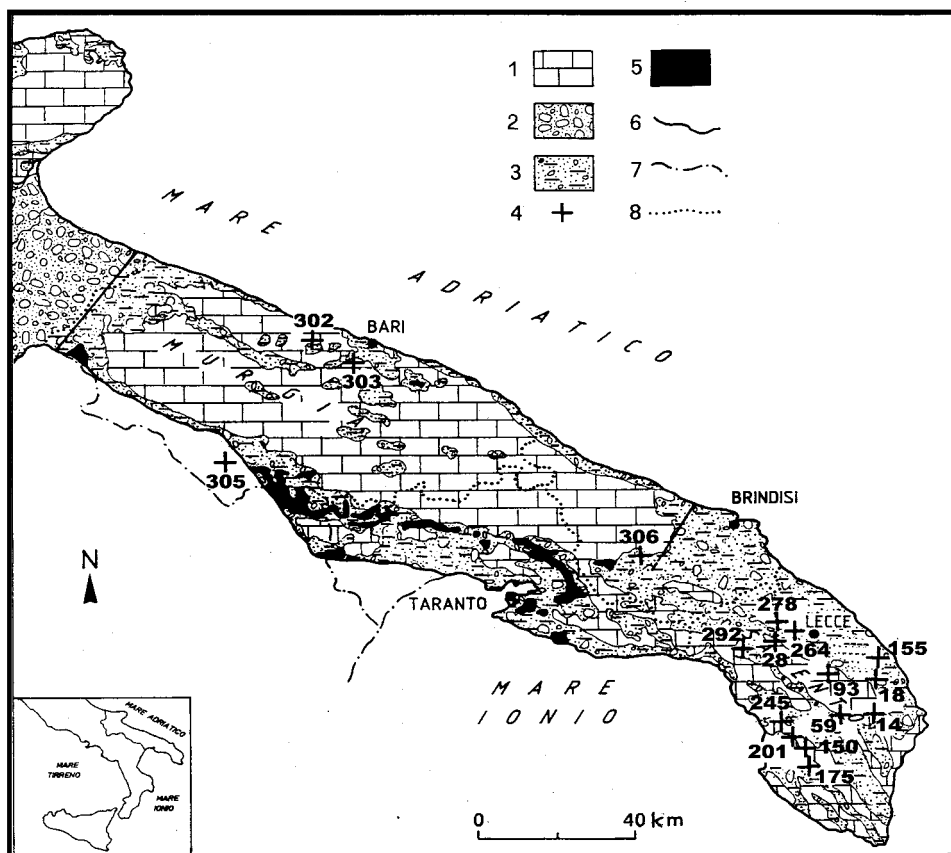


Figura 1. Carta idrogeologica schematica e ubicazione dei pozzi (da Cotecchia & Polemio, 1999, modificata). 1) Rocce carbonatiche, calcari, dolomie e calcari dolomitici e calcari dolomitici (strutture idrogeologiche della Murgia e Salento), 2) conglomerati e sabbie, 3) altri litotipi permeabili e acquiferi superficiali costituiti da calcareniti, sabbie argillose, sabbie, ghiaie o conglomerati, 4) pozzo, 5) litotipi poco permeabili, argille e argille marnose, 6) limite delle strutture idrogeologiche, 7) confine regionale, 8) confine provinciale.

Nella Murgia la circolazione idrica sotterranea è in pressione, eccetto lungo una ristretta fascia costiera. Le quote piezometriche massime si ritiene siano elevate, pari a circa 200 m s.l.m.. Nel Salento la circolazione idrica sotterranea è prevalentemente freatica. La struttura idrogeologica del Salento è caratterizzata dalla presenza di un'estesa falda idrica, denominata "profonda", per distinguerla da altre numerose falde idriche rinvenibili in acquiferi poco potenti ed estesi, generalmente affioranti, costituiti in prevalenza da sabbie, conglomerati e calcareniti. La falda idrica profonda del Salento raggiunge quote piezometriche di pochi metri al di sopra del livello del mare (al massimo 4÷5 m s.l.m.).

Per una più dettagliata caratterizzazione delle due strutture idrogeologiche, qui brevemente delineata, si rimanda per brevità alla note citate (in particolare Cotecchia & Polemio, 1999 e Cotecchia et al., 2004) e alla relativa bibliografia.

## **2. EVOLUZIONE SPAZIO-TEMPORALE DELLA SALINITÀ'**

Allo scopo di valutare l'evoluzione del fenomeno dell'intrusione marina, si è ritenuto di assumere un modello semplice che individui la assenza/presenza della contaminazione per intrusione marina. Tale modello si basa sull'ipotesi che nelle condizioni idrogeologiche della Murgia e del Salento il primo caso ovvero "assenza" si verifichi per salinità minori o uguali a 0,5 g/l (Polemio & Limoni, 2001). Tale limite o soglia è sostanzialmente un limite superiore per le acque sotterranee di migliore qualità e, in genere, in prima approssimazione, non è superato nei casi in cui sia assente la contaminazione salina per intrusione marina, come emerso con riferimento all'area in studio considerando le analisi complete svolte su circa 500 campioni di acque sotterranee (Cotecchia & Polemio, 1999). Tale limite è coerente con quanto emerso a seguito di studi della salinità delle acque di alimentazione in funzione delle precipitazioni liquide e solide (Cotecchia et al., 1973).

Definito tale modello, è ora possibile utilizzare semplici dati di salinità per la valutazione dell'evoluzione spazio-temporale degli effetti dell'intrusione marina. Il metodo proposto prevede che si traccino e si

confrontino, con metodologie geostatistiche, gli andamenti della cosiddetta isoalina di riferimento, la 0,5 g/l, in più orizzonti temporali, nel caso di studio per gli anni 1981, 1989, 1997 e 2003, per cui sono stati raccolti dati a sufficiente densità. I dati meno recenti e le relative elaborazioni sono stati attinti dal Piano Regionale di Risanamento delle Acque (P.R.A.) (Regione Puglia, 1981); l'isoalina temporalmente successiva proviene dal Piano Regionale Generale degli Acquedotti (P.R.G.A.) (LL.PP., 1989). I dati di salinità delle acque sotterranee relativi al 1997 sono stati raccolti, secondo le modalità descritte da Cotecchia & Polemio (1999), dai pozzi costituenti la rete di monitoraggio della Regione Puglia, gestita all'epoca dall'Ente per lo Sviluppo dell'Irrigazione e la Trasformazione Fondiaria in Puglia, Lucania e Irpinia (Colucci et al., 1998). Infine, i dati del 2003 sono stati raccolti in proprio dal CNR IRPI, eseguendo una specifica campagna di rilievi e di campionamento da pozzi selezionati, considerando le perforazioni utilizzate negli antecedenti orizzonti temporali.

Nelle Figg. 2-4 sono riportati gli andamenti dell'isoalina 0,5g/l riferiti rispettivamente al 1989, 1997 e 2003, e le aree nelle quali, rispetto all'antecedente posizione dell'isoalina, l'isoalina rappresentata è avanzata o arretrata rispetto alla linea di costa. Si dovrà ritenere che nel primo tipo di aree gli effetti in termini di inquinamento salino del fenomeno dell'intrusione marina abbiano peggiorato la qualità delle acque sotterranee e che nel secondo essi siano cessati.

L'aggravarsi del fenomeno di degrado qualitativo per intrusione marina è, in genere, funzione di due diverse cause, che spesso si sovrappongono. Ad una situazione geologico-strutturale, la cui geometria è sostanzialmente stazionaria, che presenta le condizioni necessarie a che l'intrusione marina si compia, si sommano sia il prelievo di acque sotterranee sempre crescente negli ultimi venti anni (Cotecchia & Polemio, 1997) sia gli effetti di duraturi periodi siccitosi (Polemio & Casarano, 2004), causa diretta dell'abbassamento dei livelli piezometrici per deficit di ricarica, ma anche indiretta dell'ulteriore aumento degli emungimenti, soluzione senza alternative all'indisponibilità delle risorse superficiali, distribuite dagli acquedotti, durante i periodi siccitosi. Il sovrapporsi delle cause sopra descritte crea un notevole richiamo dall'alto,

dove circola l'acqua dolce e dove si concentrano le porzioni filtranti dei pozzi, di acqua salata proveniente dal basso, con conseguente dilatazione verso l'alto della zona di transizione.

Esaminando le modificazioni verificatesi nel periodo 1981-1989, coinciso peraltro con un succedersi di annate siccitose, in particolare dal 1980 in poi (Polemio & Casarano, 2004), si nota un generale arretramento della isoalina di riferimento, con piccole e modestissime eccezioni (Fig. 2), come già rilevato da Cotecchia & Tadolini (1993). La progressione dell'intrusione marina è stata particolarmente intensa, soprattutto lungo la fascia costiera murgiana e lungo l'arco ionico tarantino. Si riduce anche nel Salento, l'estensione dell'area con contenuto salino inferiore a 0,5 g/l, che già nel 1981 era abbastanza ristretta; l'effetto è particolarmente rilevante soprattutto nelle zone prossime a Lecce.

Nel 1997 si è registrato un notevole avanzamento dell'isoalina di riferimento rispetto al 1989 (Fig. 3), ma anche, solo parzialmente, rispetto al 1981. Ciò è dovuto al verificarsi di una notevole piovosità tra il 1996 e il 1997, periodo che ha solo attenuato gli effetti dell'anomala successione di periodi siccitosi verificatesi dal 1980 (Polemio & Casarano, 2004).

Considerando i dati del 1997, il miglioramento è sensibile nella Murgia nord-occidentale. A sud di Bari è possibile rilevare un progressivo e abbastanza omogeneo arretramento della 0,5 g/l, dal 1981 al 1997. Nell'area di Brindisi la situazione migliora leggermente, fatta eccezione per una ristretta area nella porzione centrale, dove si registra un peggioramento, con la scomparsa della 0,5 g/l rilevata nel 1989.

Spostandoci nel Salento, si rileva una profonda modificazione dell'andamento dell'isoalina 0,5 g/l. Tendenzialmente nelle porzioni centrali della penisola si riscontra un miglioramento mentre, nelle aree più prossime alla costa adriatica e nelle propaggini più meridionali della penisola salentina il peggioramento è evidente. Lungo l'arco ionico tarantino si ha un miglioramento generalizzato.

Esaminando le modificazioni verificatesi nel periodo 2003-1997, si nota un arretramento dell'isoalina di riferimento, con piccole e modestissime eccezioni nell'intera Murgia e soprattutto nel territorio fra Brindisi e Taranto, denominato soglia messapica (Cotecchia et al.,

2004) (Fig. 4). Il Salento mostra invece un netto miglioramento in termini di contenuto salino, fatta eccezione per modeste aree sul versante ionico. La siccità verificatasi tra il 2000 e la prima metà del 2002, la più grave degli ultimi 80 anni (Polemio & Casarano, 2004), ha, ancora una volta, colpito le risorse idriche sotterranee, riducendone la disponibilità e degradandone la qualità. Gli effetti negativi dell'ultima siccità si osservano nonostante le copiose piogge intercorse tra la fine della stessa e i rilievi di cui alla Fig. 4.

E' interessante notare che in ampie porzioni di territorio, lungo la fascia costiera adriatica e ionica, la contaminazione da intrusione marina delle acque di falda, che si estrinseca, in questo caso, in valori della salinità sempre maggiori a quello di riferimento, è uno stato qualitativo per certi versi irreversibile o, sarebbe meglio dire, con elevata probabilità stazionario (Fig. 5). In altre parole, vi è una continua fascia costiera, di ampiezza variabile nello spazio, sempre a salinità maggiore di 0,5 g/l dal 1981 ad oggi, a prescindere dalla verificatasi variabilità dei fattori climatici che determinano la ricarica (Polemio & Casarano 2004), dei prelievi e dalle mutevoli condizioni al contorno che determinano l'intrusione marina. Trattasi di aree a suscettività all'intrusione marina da alta a molto alta.

Di converso, vi sono una vasta area interna della Murgia ed una ristretta area, una sorta di isola, posta nella porzione centrale del Salento, che non hanno risentito, almeno per ora e fin dal 1981, degli effetti dell'intrusione marina. Tali porzioni di acquifero si possono ritenere a suscettività all'intrusione marina da bassa a nulla.

Fra le due zone, quella di presenza e di assenza costante della contaminazione salina per intrusione marina, vi è una notevole porzione di territorio soggetta alle fluttuazioni che il fenomeno in parola subisce, come peraltro ben evidenzia l'isoalina di riferimento 0,5 g/l che, nel corso dei quattro intervalli di rilevazione, ha subito notevoli spostamenti verso la costa o versa l'interno.

L'analisi spazio-temporale effettuata relativamente all'ultimo ventennio evidenzia l'accentuata variabilità del contenuto salino delle acque sotterranee pugliesi.

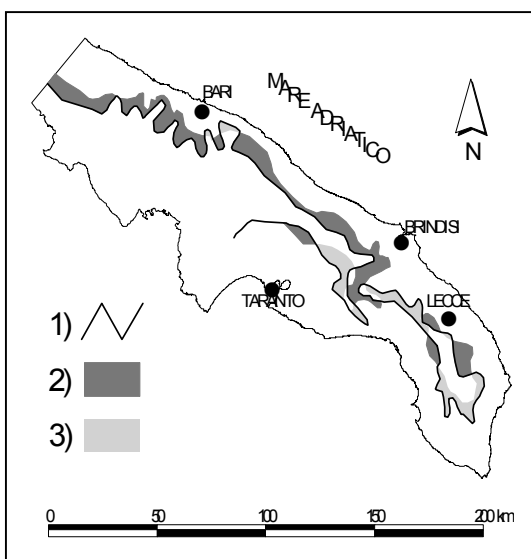


Figura 2. Evoluzione temporale della isosalina 0,5 g/l di riferimento nel periodo 1981-1989; 1) isosalina del 1989, 2) avanzamento e 3) arretramento della isosalina rispetto a quella del 1981.

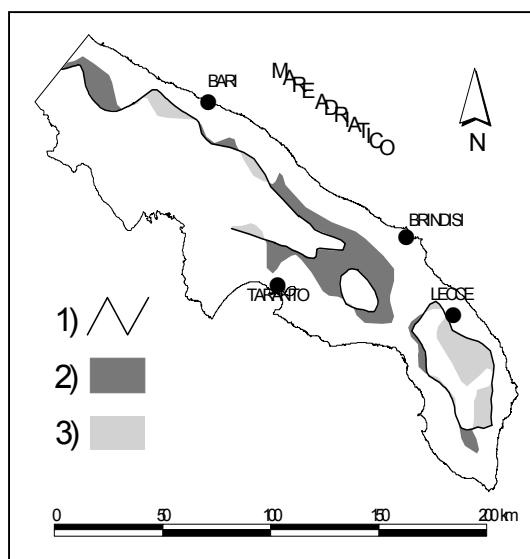


Figura 4. Evoluzione temporale della isosalina 0,5 g/l nel periodo 1997-2003; 1) isosalina del 2003, 2) avanzamento e 3) arretramento della isosalina rispetto a quella del 1997.

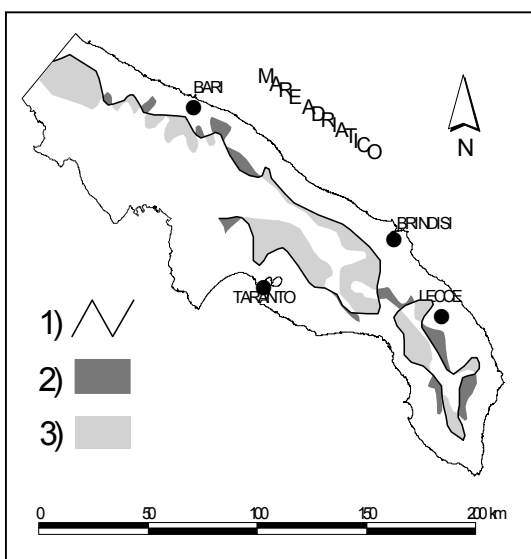


Figura 3. Evoluzione temporale della isosalina 0,5 g/l nel periodo 1989-1997; 1) isosalina del 1997, 2) avanzamento e 3) arretramento della isosalina rispetto a quella del 1989.

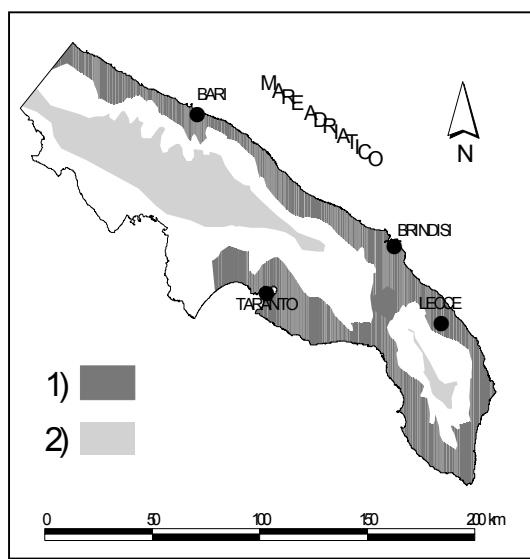


Figura 5. Evoluzione temporale della isosalina 0,5 g/l in tutto il periodo considerato; 1) aree con contenuto salino sempre > 0,5 g/l; 2) aree con contenuto salino sempre < 0,5 g/l.

La caratterizzazione di tale variabilità e la relativa interpretazione possono risultare alquanto difficili e complesse poiché a fattori naturali si sommano quelli antropici, che molto spesso sono di difficile quantificazione.

Il miglioramento e/o peggioramento della salinità, che si osserva negli intervalli temporali considerati, può essere legato a fattori antropici locali quali l'aumento degli emungimenti, la diminuzione dei prelievi nelle aree in cui l'incremento della contaminazione salina ha reso inservibili i pozzi, con conseguente aumento dei prelievi in altre zone, spesso limitrofe oppure la diminuzione dei prelievi per sopraggiunta disponibilità di risorse distribuite da acquedotti. Alquanto diffusi devono invece ritenersi gli effetti della variabilità dei fattori climatici che determinano l'entità della ricarica.

Una più accurata caratterizzazione della variabilità della salinità richiede l'analisi di serie temporali più definite, con la disponibilità di dati annuali e mensili.

### 3. SERIE TEMPORALI DELLA QUALITÀ E TENDENZA DEL DEGRADO

La disponibilità di serie temporali di dati inerenti la qualità che siano lunghe e regolari riguarda parametri che siano stati raccolti in relazione a prescrizioni normative, come nel caso delle acque emunte per fini potabili. In tali casi la determinazione della salinità non era prevista esplicitamente ma la stessa può essere stimata mediante altri parametri.

La Concentrazione dello ione Cloro, nel seguito CC, può essere strettamente correlata alla salinità delle acque sotterranee di acquiferi soggetti al fenomeno dell'intrusione salina. In effetti, utilizzando i dati di analisi di circa 500 campioni prelevati nel territorio di studio risulta che la retta di regressione lineare tra CC e salinità si associa ad un valore di  $R^2$  pari a 0,966. Per lo stesso campione di dati emerge che la concentrazione di cloro più probabile per acque sotterranee che abbiano salinità uguale a 0,5 g/l è 60 mg/l e che per  $CC > 100$  mg/l la salinità è sempre maggiore di 0,5 g/l. Infine, acque prive di contaminazione di origine marina presentano nel campione di dati  $20 < CC < 50$  mg/l.

In forza della buona correlazione, sono stati raccolti i dati con frequenza mensile relativi alla concentrazione dello ione cloro, per circa un trentennio, in alcuni pozzi in esercizio

potabile della Murgia e del Salento (Fig. 1), stante la cortese disponibilità dell'AQP. Tali dati sono risultati disponibili per un massimo di circa 30 anni, nel periodo 1968-2001, relativamente a 17 pozzi.

Nonostante gli sforzi compiuti, per l'intero intervallo temporale la regolarità dei dati mensili è risultata in genere bassa.

L'analisi del trend del cloro è stata quindi condotta sulla base di valori medi annuali, anche in virtù della lente, modeste o assenti variazioni osservate in genere di mese in mese in ogni serie disponibile. La sintesi dei principali valori statistici relativi alle serie annuali è riportata in Tab. 1. Tale tabella riporta per ogni pozzo il codice identificativo, la struttura idrogeologica, il minimo, la media e il massimo della concentrazione annuale di cloruri rilevata nel periodo di osservazione.

La concentrazione media annua di cloro è contenuta nell'intervallo 32-354 mg/l; nel caso dei quattro pozzi della Murgia l'intervallo è 32-63 mg/l mentre nei restanti 13 pozzi salentini è 40-354 mg/l. Premesso che le modalità di campionamento e di analisi dei campioni di dati utilizzati per lo studio della correlazione sono probabilmente più accurate e di certo diverse da quelle utilizzate in relazione ai 17 pozzi selezionati, nei limiti di attendibilità del confronto, non quantificabili con rigore, questa prima valutazione evidenzia che il 69% dei pozzi del Salento ha CC media annua al di sopra di 100 mg/l ovvero è di certo interessata da intrusione marina mentre nessuno dei pozzi della Murgia è in tali condizioni. Dei restanti pozzi salentini il 23% ha superato almeno in un anno tale concentrazione, circostanza mai verificatasi in Murgia. Solo un pozzo del Salento non ricade nei suddetti casi.

Per ciascun serie temporale è stato definito il trend lineare mediante la determinazione del Coefficiente Angolare CA delle rette di regressione (Tab. 1). Si noti che i dati più recenti per il calcolo del trend sono anteriori all'ultima siccità nel caso della Murgia (1998) e solo in parte coevi con l'inizio della stessa per il Salento (in genere 2000). Il trend, ovvero il valore di CA, è generalmente negativo in Murgia (pozzi 302-305) ad eccezione del pozzo 306. In realtà, il trend del pozzo 306 non è risultato statisticamente significativo al 5%; in effetti trattasi di un pozzo dalla CC sempre molto bassa e molto probabilmente scervo da effetti tangibili di intrusione marina. In base alla

**Tab. 1 - Valori statistici relativi alla concentrazione annua dello ione cloro (mg/l). SI) Struttura Idrogeologica, M) Murgia, S) Salento, AI) Anno di Inizio e AF) Anno di Fine delle osservazioni disponibili, CA) Coefficiente Angolare della retta di regressione (mg/l anno).**

Pozzo	302	303	305	306	28	264	93	155	14	59	18	278	201	175	150	245	292
SI	M	M	M	M	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S	S
Min	25,7	28,2	18,9	25,5	85,2	237,4	80,5	38,1	56,1	74,5	31,1	134,8	201,4	170,4	138,5	178,7	266,3
Media	35,6	63,0	33,6	32,3	106,1	314,9	146,6	58,9	90,9	91,1	40,0	189,1	227,4	204,9	193,7	214,4	354,1
Max	40,4	80,9	57,8	51,1	141,3	378,4	238,2	258,5	147,1	104,9	65,7	236,1	261,3	244,9	273,4	230,3	390,5
AI	1973	1973	1968	1975	1973	1969	1973	1980	1973	1971	1981	1973	1968	1969	1975	1981	1973
AF	1998	1998	1998	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2000	2001	2000	2000
CA	-0,076	-0,164	-0,557	0,007	1,532	2,187	5,719	3,160	2,560	0,058	0,084	-0,478	0,773	2,042	1,063	1,295	-0,759

sola salinità, la qualità delle acque sotterranee della Murgia è quindi tendenzialmente migliore sul finire del 1998.

Il quadro emerso è coerente con quanto segnalato dalla quasi coeva situazione rappresentata in Fig. 3, che segnala una diffusa tendenza al miglioramento della salinità in Murgia tra il 1989 e il 1997.

Se si escludono i due pozzi 278 e 292 che, unitamente al 306, sono prossimi alla cosiddetta soglia messapica, nel Salento la situazione sul finire del 2000 si presenta in modo differente, in quanto la totalità dei pozzi mostra un trend dello ione cloro crescente, con CA positivo e compreso tra 0,06 e 5,719 mg/l anno.

Le serie storiche più regolari e durature sono state selezionate per effettuare ulteriori e più complesse elaborazioni statistiche (Tab. 2).

La variabilità delle serie storiche può essere interpretata come la sovrapposizione di diverse componenti, tra le quali quella tendenziale e quella stagionale. L'analisi della stagionalità prevede la scomposizione della serie di dati in modo da fornire informazioni circa l'andamento stagionale e quindi in merito al regime della concentrazione dello ione cloro, ovvero della salinità, e della sua ciclicità. Per i pozzi ubicati nella Murgia si osserva che il regime di CC presenti un andamento che, con non trascurabili variazioni da pozzo a pozzo, può essere schematizzato come crescente durante la stagione estiva, arida e quindi anche irrigua, durante la quale il naturale calo del livello piezometrico è accresciuto dall'elevato emungimento per l'irrigazione. Tale incremento procede almeno fino a settembre e in genere

fino ad ottobre. Nei mesi invernali, in genere da ottobre a marzo o almeno fino a gennaio, CC sembra prevalere un andamento decrescente fino al minimo assoluto. Ad eccezione di un pozzo, la variazione del minimo e del massimo è minore del 6% della concentrazione media; la variazione mensile è quindi abbastanza contenuta. Per quanto riguarda il Salento, il regime di CC è meno regolare nonché variabile da pozzo, senza che un "modello" di regime sia identificabile. Lo ione cloro è, tra i principali contenuti nelle acque sotterranee, alquanto particolare in quanto la variabilità della sua concentrazione non si deve tanto a processi interni quanto alla diluizione con corpi idrici esterni a diversa concentrazione, come nel caso delle acque di infiltrazione o delle acque riconducibili all'intrusione marina.

L'apprezzabile ciclicità di CC per la Murgia appare essere, dal punto di vista meramente statistico, in buona relazione con il regime delle piogge, con un unico massimo autunno-invernale e un unico minimo estivo, delle temperature atmosferiche, con andamento opposto a quello delle piogge, e con quelle delle piogge nette, nulle dal termine della primavera fino all'autunno.

L'interpretazione è più complessa se si considera che il CC delle piogge in Puglia ha una forte variabilità spazio-temporale (Cotecchia et al., 1971). La CC e la salinità annua delle piogge tra maggio 1967 e aprile 1968 variò rispettivamente da 9 a 43 mg/l e da 45 a 153 mg/l in funzione principalmente della distanza dal mare; a distanza maggiore di 6 km furono rispettivamente minori di 20 e 80 mg/l.



**Tab. 2 - Valori statistici relativi alla concentrazione dello ione cloro (mg/l) mensile. SI) Struttura Idrogeologica, M) Murgia, S) Salento, AI) Anno di Inizio e AF) Anno di Fine del periodo selezionato, ND) Numero Dati mensili disponibili.**

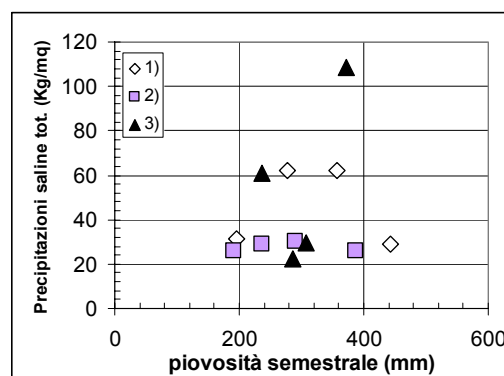
Pozzo	302	303	305	306	28	93	14	59	201	175	150	292
UI	M	M	M	M	S	S	S	S	S	S	S	S
AI	1975	1978	1978	1978	1979	1979	1979	1979	1979	1979	1979	1979
AF	1985	1986	1988	1988	1981	1983	1981	1984	1983	1983	1983	1983
ND	132	93	108	111	32	36	33	45	33	35	33	33
Min	14,2	20,4	10,7	21,4	92,1	78,1	63,9	49,7	191,7	127,8	177,5	326,6
Media	36,7	65,3	33,6	31,1	95,1	94,2	22,9	90,1	213,0	190,6	184,7	375,9
Max	59,8	87,5	42,6	124,4	99,4	120,7	78,1	185,2	227,2	198,8	194,6	390,5
Dev. Stand	4,1	14,2	4,2	10,2	3,5	8,9	4,8	18,4	9,4	12,7	4,2	13,5

Tra maggio 1967 e aprile 1968 in Puglia la CC delle piogge variò tra il minimo di settembre e il massimo di gennaio; alquanto simile fu la variabilità della salinità (Cotecchia et al., 1971). Infine, si deve considerare che le piogge della stagione arida depositano i propri sali al suolo e che si aggiungono al notevole apporto di sali al suolo dovuto alle precipitazioni secche, stimate pari al 44% del totale annuo (Cotecchia et al., 1973). Le esperienze svolte in questo ultimo caso segnarono che, in virtù delle precipitazioni secche, non ovunque le concentrazioni delle precipitazioni secche e liquide al suolo furono maggiori in autunno-inverno di quelle in primavera-estate, tra il 1969 e il 1971.

In ogni caso, nei mesi con piogge nette non nulle la CC delle acque di infiltrazione sarà molto maggiore di quella delle corrispondenti piogge per concentrazione delle stesse per evapotraspirazione, per effetto dei sali depositati dalle piogge della stagione arida, trasformati in evapotraspirazione, e per le precipitazioni secche. Il CC delle acque di alimentazione, stimato da Cotecchia et al. (1973) tenendo conto di tutti questi fenomeni, è variabile da 42 mg/l (località Noci), nell'interno della Murgia, dove si collocano le principali aree di ricarica, a 103 mg/l (località Bari), in prossimità della costa adriatica murgiana, in lieve eccesso ma in sostanziale buona coerenza con quanto riportato per i pozzi della Murgia (Tab. 1).

D'altra parte, il contenuto totale in sali e in particolare di quelli di origine marina, a cui si

deve il contenuto in cloro delle precipitazioni, decresce fortemente con la piovosità, come mostrato da Tulipano et al. (1984) in relazione alla piovosità mensile. Essendo l'apporto di sali che precipitano al suolo distinguibili in base all'origine, continentale e marina, essendo a quest'ultima dovuta la presenza di cloro, evidentemente dovuta all'effetto dei venti diretti dal mare verso la terraferma, non si può escludere che la quantità di soluto pervenuta al suolo ogni anno sia complessivamente poco variabile in termini di massa e che, soprattutto, sia poco dipendente se non del tutto indipendente dalla piovosità stagionale o annua complessiva, come sembra desumersi dalla rappresentazione grafica dei dati rilevati da Cotecchia et al. (1973) (Fig. 6).



**Figura 6. Piovosità semestrale e precipitazioni saline liquide e solide totali in 3 stazioni a distanza crescente dal mare (dati da Cotecchia et al., 1973); 1) Bari S.I.; 2) Bari lab.; 3) Noci.**

In realtà, vista la natura complessa dei fenomeni che determinano il trasporto dei soluti nella zona non satura e la notevole variabilità spaziale dei parametri che condizionano i fenomeni stessi, l'effettiva salinità delle acque di ricarica può essere condizionata, tra i parametri finora considerati, soltanto dall'intensità di pioggia, calcolata al più per durate mensili.

Tutto ciò considerato, in mancanza di dati quantitativi, ogni ulteriore valutazione qualitativa sul regime del chimismo delle acque di infiltrazione appare poco significativa ai fini dell'interpretazione di quanto osservato.

Considerando il regime di CC per i pozzi murgiani, si deve ritenere che abbia conferma l'ipotesi che scarsa sia su questi l'effetto dell'intrusione marina indotto dall'emungimento (tale influenza è da ritenersi nulla almeno nel caso del pozzo 305, in virtù della distanza dal mare, circa 40 km, la massima per i pozzi selezionati, e del notevole carico piezometrico). Da questo punto di vista, come confermato dalle successive analisi statistiche, la crescente piovosità autunno-invernale sembra ben correlarsi, in termini di regime, con le riduzioni delle concentrazioni di cloro delle acque sotterranee preesistenti, effetto che via via si attenua nella stagione arida.

L'anomalo andamento dei pozzi salentini si deve interpretare, allo stato delle conoscenze, ritenendo notevole l'effetto indotto in termini di contaminazione salina e quindi riconoscendo un ruolo accentuato svolto dai prelievi, realisticamente caratterizzati da una scarsa o non significativa stagionalità, visto l'uso dei pozzi in questione.

In campo idrogeologico la manifestazione quantitativa di un dato fenomeno o variabile non dipende solo dal tempo ma anche dai valori che la variabile stessa, in questo caso CC, o altre da cui essa almeno in parte dipende, hanno assunto in precedenza. Nel primo caso si può rilevare un carattere della variabile chiamata persistenza, che consiste nelle capacità della variabile di assumere valori nel tempo correlabili con i precedenti. Essa si determina mediante l'analisi dell'autocorrelazione, basata sulla determinazione del coefficiente di correlazione lineare fra la variabile casuale  $X_t$  e  $X_{t-k}$ , con  $t$  e  $k$  numeri intero positivi, al variare del numero d'ordine  $t$  della serie temporale e di  $k$ , definito *lag*, sfasamento o ritardo temporale. Nel caso si

consideri una seconda variabile, è possibile effettuare l'analisi della crosscorrelazione: il calcolo del coefficiente di correlazione lineare, detto in questo caso di crosscorrelazione, si determina tra le variabili casuali  $X_t$  e  $Y_{t-k}$ , al fine di evidenziare l'effetto esercitato sul valore della variabile  $X_t$ , detta principale, al tempo  $t$ -esimo, dai valori assunti dalla variabile  $Y_{t-k}$ , detta secondaria, al tempo  $t-k$ .

Tra le serie inizialmente selezionate (Tab. 2), l'analisi dell'autocorrelazione e della crosscorrelazione è risultata effettivamente significativa per le serie temporali dei pozzi 303 e 305 della Murgia e 14, 59, 201, 150 e 292 del Salento. Per la crosscorrelazione sono state utilizzate anche le serie termopluviometriche più opportune tra quelle rese disponibili dal Servizio Idrografico e Mareografico Nazionale.

Tutte le serie di CC presentano una breve ma significativa persistenza o effetto memoria: in genere la massima autocorrelazione si raggiunge con ritardo di un mese e il coefficiente è circa pari a 0,4. La quantità di ione cloro presente oggi, in altre parole condiziona fortemente quanto potrà essere rilevato dopo un mese. Questo effetto si esaurisce rapidamente, in genere entro un mese. Le uniche eccezioni sono relative al pozzo 305, per cui la massima autocorrelazione si ha con ritardo di 3 mesi, e per il pozzo 201, per cui il massimo coefficiente di autocorrelazione si ha sempre con ritardo di un mese ma è pari a 0,81.

La crosscorrelazione tra CC e piovosità mensile risulta generalmente negativa o opposta: al crescere della piovosità la CC decresce. La crosscorrelazione è più marcata nel Salento dove il coefficiente di crosscorrelazione massimo è in valore assoluto maggiore (tra 0,23 e 0,31) di quanto osservato in Murgia (tra 0,10 e 0,20); questa circostanza è di certo dovuta al maggiore contrasto di CC tra acque sotterranee e piogge nel caso del Salento. In entrambi i casi il ritardo con cui si registra il massimo si spinge fino a 4 mesi.

La crosscorrelazione tra CC e temperatura mensile è ovunque positiva: all'aumentare della temperatura cessano le piogge e aumentano i prelievi diffusi, con l'effetto di favorire l'incremento di CC per effetto diretto o indiretto dell'intrusione marina. Il ritardo con cui massimo è il coefficiente di crosscorrelazione varia da 1 a 3 mesi. Il coefficiente varia da 0,15 a 0,39, essendo i valori massimi tipici del Salento.

## CONCLUSIONI

Dal punto di vista metodologico è confermata l'esistenza di settori acquiferi notevolmente protetti dall'intrusione marina, di settori esposti in modo duraturo e grave all'inquinamento salino e, infine, di una vasta porzione di territorio in cui la qualità dell'acqua emunta dipende esclusivamente dalla nostra capacità di gestire in modo sostenibile le risorse idriche sotterranee.

L'analisi statistica ha dimostrato che l'uso di semplici parametri qualitativi, ampiamente e regolarmente acquisiti, possono essere utili per caratterizzare gli effetti tendenziali dell'inquinamento salino e dell'intrusione marina e che potrebbero agevolmente essere utilizzati per realizzare modelli di previsione statistici, efficaci per previsioni dalle durate variabili fino a diversi mesi.

La notevole variabilità del contenuto salino nel tempo e nello spazio, nonché il generale incremento della salinità nel corso dell'ultimo ventennio mostrano che il rischio di degrado qualitativo per contaminazione salina delle risorse idriche sotterranee della Murgia e del Salento non debba essere assolutamente sottovalutato.

La causa preponderante del peggioramento della salinità è la mancanza di una corretta pianificazione dell'uso e quindi di una gestione sostenibile delle risorse idriche sotterranee, soggette, attualmente, ad un ampio sovrasfruttamento, finalizzato al soddisfacimento di una domanda crescente in modo incontrollato e, a lungo termine, insostenibile per le risorse naturali. Dall'analisi dei dati rilevati, emerge, infine, come l'evoluzione del fenomeno di contaminazione salina delle acque sotterranee sia gravissima in particolare nel Salento.

## BIBLIOGRAFIA

COLUCCI V., LIMONI P.P., SERRAVEZZA C. (1998) - *La rete di controllo idrometrografico e qualitativo delle falde idriche pugliesi*. Acque Sotterranee, Anno XV, 59, 55-61.

COTECCHIA V. (1977) - *Studi e ricerche sulle acque sotterranee e sull'intrusione marina in Puglia (Penisola Salentina)*. Quaderni dell'Istituto di Ricerca sulle Acque, 20, 1-466.

COTECCHIA V., GRASSI D. & POLEMIO M. (2004) *Carbonate aquifers in Apulia and seawater intrusion*. In: 32nd IGC "Some Engineering Geology case histories in Italy", 1-16.

COTECCHIA V. & POLEMIO M. (1997) - *L'inquinamento e il sovrasfruttamento delle risorse idriche sotterranee pugliesi*. VI Workshop del Progetto Strategico «Clima, Ambiente e Territorio nel Mezzogiorno», I, 447-484.

COTECCHIA V. & POLEMIO M. (1999) - *Apulian groundwater (Southern Italy) salt pollution monitoring network*. Flemish Journal of Natural Science, Ghent, Belgium, 197-204.

COTECCHIA V. & TADOLINI T. (1993) - *Problematiche ambientali in Murgia e Salento (Puglia) connesse alla contaminazione progressiva delle acque di falda ad opera dell'ingressione marina*. V Workshop del Progetto Strategico «Clima, Ambiente e Territorio nel Mezzogiorno», Aprile 1993, Amalfi, 489-501.

COTECCHIA V., TADOLINI T., TITTOZZI P. (1971) - *Influenza del chimismo delle piogge sulle acque sotterranee della Puglia*. Geologia Applicata e Idrogeologia, 6, 175-196, Bari.

COTECCHIA V., TADOLINI T., TITTOZZI P. (1973): *Precipitazioni secche in Puglia e loro influenze sul chimismo delle acque alimentanti la falda sotterranea*. Geologia Applicata e Idrogeologia, 8/II, (253-284), Bari.

GRASSI D. (1973) - *Fondamentali aspetti dell'idrogeologia carsica della Murgia (Puglia), con particolare riferimento al versante adriatico*. Geologia Applicata e Idrogeologia, VIII, parte II, 285-313.

LL.PP. (1989). *Piano regionale generale degli acquedotti (Regione Puglia)*. Ministero dei Lavori Pubblici, Bari.

POLEMIO M. (2000) - *Degradation risk owing to contamination and overdraft for Apulian groundwater resources (Southern Italy)*. Water resources management in a vulnerable environment for sustainable development, Editore da K. Andah, UNESCO-IHP, Grifo Publishers, Perugia, 185-194.

POLEMIO M. & CASARANO D. (2004) - *Rainfall and drought in southern Italy (1821-2001)*. The Basis of Civilization – Water Science?, IAHS Publ. 286, 217-227.

POLEMIO M. & LIMONI P.P. (2001) - *L'evoluzione dell'inquinamento salino delle acque sotterranee della Murgia e del Salento*. Memorie della Società Geologica Italiana, 56, 327-331.

REGIONE PUGLIA (1981) - *Piano regionale Risanamento delle Acque*. Boll. Uff. Reg. Puglia.

TULIPANO L., FIDELIBUS M.D., SCIANNAMBLO D.,  
DRAGONE M. (1984) - *Variabilità di alcune  
caratteristiche chimiche di acque di pioggia  
campionate in Murgia (Puglia) in relazione alla  
pluviometria*. Geologia Applicata e Idrogeologia, 19,  
161-172, Bari.