

Metodologie di studio e difesa dall'inquinamento salino degli acquiferi

V. COTECCHIA, M. LATTANZIO & M. POLEMIO

CNR, CERIST - Bari

*VI Workshop
Progetto Strategico
Clima, Ambiente e Territorio nel Mezzogiorno
Taormina, 13-15 Dicembre 1993*

Riassunto

Questo contributo individua alcuni rilevanti casi d'inquinamento salino delle acque sotterranee. Si rileva che le cause dell'inquinamento salino sono molteplici, le principali sono: l'intrusione continentale delle acque marine; la risalita, lungo il reticolo idrografico, di acque marine, la lisciviazione dei terreni e delle rocce e, infine, l'attività umana. Gli effetti di quest'ultima sono complessi e non semplicemente schematizzabili. Il contributo si conclude descrivendo i principali metodi per prevenire, rimediare e fermare la salinizzazione.

Parole chiave: Idrogeologia, Risorse idriche, Inquinamento.

Abstract

Study and protection methods of aquifer saline pollution

This contribution characterizes some remarkable cases of saline contamination of the groundwater. It is known that the causes of the saline contamination are manifold, the principal causes are: the continental intrusion of the marine waters; the upcoming, along the hydrographic network, of marine waters, the leaching of soils and rocks and, finally, the human activity. The effects of this are complex and not easily to describe in a schematic way. The contribution concludes describing the main methods to prevent, remedy and stop the salinization.

Key words: Hydrogeology, Water resources, Pollution.

1. Introduzione

L'inquinamento salino delle falde idriche sotterranee è un fenomeno che determina la diminuzione del gradimento dell'acqua, fino a renderla inutilizzabile, per gli usi potabili, civili, agricoli, zootecnici ed industriali.

Alcuni effetti diretti derivanti dall'uso di acque a maggiore salinità sono: l'aumento del consumo di detergenti, la formazione d'incrostazioni nelle caldaie, i maggiori costi di trattamento, soprattutto nelle utilizzazioni industriali, l'influenza sulla crescita delle piante e la riduzione del raccolto.

Si consideri che, in generale, all'aumentare della salinità dell'acqua corrisponde una diminuzione della crescita delle piante. Il comportamento delle piante rispetto alla variazione della salinità è diverso in funzione della specie. Esistono sostanzialmente due tipi di piante: quelle che tollerano le variazioni di concentrazioni saline, senza subire effetti rilevanti, e quelle che sono sensibili alla salinità. Le specie del primo gruppo non tollerano tenori di salinità superiori ai 15 g/l; quelle del secondo subiscono diminuzioni sensibili del tasso di crescita per salinità inferiori ai 6 g/l. Ad esempio, le carote sono sensibili alla salinità anche per valori pari allo 0,6 g/l (ATKINSON *et al.*, 1986).

La domanda complessiva d'acqua dolce in Italia è stimata in 56 miliardi di metri cubi annui, in pratica un prelievo annuale pro capite di 980 m³, il massimo in Europa e il terzo valore nel mondo sviluppato, secondo l'OCSE (Organizzazione per la Cooperazione e lo Sviluppo Economico); ci precedono solo gli USA e il Canada, paesi con ben altre disponibilità ambientali. Ci seguono, a distanza, Germania, Giappone, Francia e Inghilterra. In Italia il 60 per cento dei consumi è destinato all'agricoltura (irrigazione e acqua per il bestiame), il 25% all'industria e il 15% agli usi domestici (PRATESI, 1996). In particolare, nelle zone collinari l'acqua serve spesso per irrigare colture che non ne avrebbero bisogno. In pianura si forzano con l'irrigazione le colture più varie e s'estendono quelle più idrovore, come il grano-turco, il kiwi e le barbabietole. Non sorprende quindi che la qualità delle acque sotterranee è già stata compromessa in alcune

zone costiere d'Italia (per esempio in Puglia, in Sicilia e lungo la costa romagnola) in quanto, per effetto dell'eccessivo emungimento dai pozzi, si produce l'intrusione marina negli acquiferi. La rottura dell'equilibrio tra alimentazione naturale e prelievo provoca l'arretramento, verso l'interno del territorio, e il sollevamento dell'interfaccia fra acqua dolce e acqua salata.

Un caso di studio di particolare interesse è costituito dalle unità idrogeologiche pugliesi (COTECCHIA, 1977). Il drammatico e progressivo degrado delle acque sotterranee pugliesi, principale fonte idrica regionale, è fondamentalmente legato all'intrusione marina per sovrasfruttamento (COTECCHIA e POLEMIO, 1995).

Il grave stato qualitativo delle risorse idriche sotterranee pugliesi e nazionali enfatizza l'importanza di metodi per prevenire, rimediare e fermare la salinizzazione.

2. Fonti dell'inquinamento salino

L'inquinamento salino può essere ricondotto a quattro modalità principali.

La prima, rischiosa per i pozzi situati in prossimità della costa, risiede nel fenomeno dell'intrusione marina nelle terre emerse, per cui acque salate penetrano, formando un vero e proprio cuneo al di sotto delle acque dolci sotterranee.

La seconda causa della salinizzazione è la risalita lungo gli alvei dei fiumi delle acque marine sotto quelle fluviali, per cui le prime contaminano quelle fluviali e quelle di falda con cui vengono in contatto.

La terza causa è la lisciviazione di terreni e rocce. Il flusso idrico sotterraneo contribuisce a solubilizzare, in determinate condizioni idrogeologiche, sostanze che incrementano la salinità delle acque sotterranee.

La quarta causa è imputabile all'attività umana e si realizza secondo i modi più vari. Ad esempio, gli alti tassi di cloruri riscontrati in alcune acque di falda si possono mettere in relazione con gli scarichi di consistenti allevamenti zootecnici. Si può di-

stinguere il tipo d'inquinamento salino antropico in industriale, civile, agricolo e zootecnico.

Le fonti d'inquinamento, possono esserè di superficie e di profondità. Volendo formulare alcuni esempi, si consideri, nel primo caso, la salinità proveniente dalla "salamoia" derivante dall'attività mineraria di determinati tipi e dal percolato delle discariche. Dal basso proviene la salinizzazione per l'intrusione di acque di mare. Un'altra fonte profonda, di tipo antropico, è costituita dai pozzi disperdenti. Si tratta di pozzi dai quali s'iniettano acque reflue d'origine industriale, civile, di raffreddamento, di drenaggio o di pioggia; in alcuni casi si tratta di acque salmastre in quanto derivanti da particolari lavorazioni o lavaggi.

Oltre al sovrasfruttamento, la risalita delle acque saline, d'intrusione marina o d'altra provenienza, può essere dovuta al calo piezometrico causato dagli scavi, quali quelli derivanti dall'attività mineraria o dalle modificazioni per abbassamento e/o allargamento del reticolo idrografico.

3. Le attività antropiche e l'equilibrio acqua dolce-salata negli acquiferi costieri

I maggiori danni alle risorse idriche sotterranee derivano dalla lentezza, rispetto alla sensibilità umana, con cui il crescente sfruttamento degli acquiferi altera il rapporto tra acque dolci e salate. Il fattore tempo, spesso dell'ordine della decina d'anni, rende difficile, in particolare per gli utenti, mettere in relazione la causa con gli effetti. Per una reale valutazione degli effetti del maggiore utilizzo di un acquifero sono necessari una buona conoscenza dell'acquifero e delle relazioni acqua salata/dolce. Il livello di conoscenza deve essere tale da permettere valutazioni preventive degli effetti mediante l'uso di modelli numerici. In genere, si rende anche necessario compiere rilievi sull'evoluzione dell'intrusione, mediante frequenti campagne di raccolta dati.

In alcuni casi, l'intrusione marina s'estende subito dopo che inizia o cresce lo sfruttamento delle risorse idriche sotterranee (acquiferi piccoli e/o molto permeabili), in altri, invece, gli effetti

possono comparire molti anni dopo l'inizio dello sfruttamento (acquiferi confinati, aperti al mare o semiconfinati di notevoli dimensioni e/o mediamente permeabili), specie quando l'acqua di mare "entra" lontano dalla costa (in ambiente neritico).

In tutto il mondo si sono verificati casi d'intrusione marina, per sovrasfruttamento e non, ai danni delle risorse idriche sotterranee; nel seguito si descrivono alcuni particolarmente significativi.

L'acquifero costiero di Suani, costituito da calcareniti, arenarie e calcari intercalati a strati argilloso-siltosi, posto in prossimità di Tripoli, in Libia, è di tipo freatico. L'intenso sfruttamento mediante pozzi, posti a circa 6 Km dalla costa, ha fatto salire da 0,3 ad oltre 10,0 g/l il TDS, in soli diciotto anni, dal 1976 al 1993 (SULEIMAN, 1995).

L'acquifero confinato di Riera d'Horta, nel delta di Besos (Barcellona, Spagna), è quasi totalmente invaso dall'acqua di mare. L'estrazione dell'acqua salata tramite pozzi ad uso industriale, vicini alla costa, protegge i pozzi situati all'interno, in modo che si riesce ad estrarre ancora acqua dolce (CUSTODIO *et al.*, 1976) (Fig. 1).

La pianura costiera di Israele (SCHOMORAK, 1967) "contiene" un acquifero multistrato in cui si è avuta una diversa velocità di penetrazione dell'interfaccia acqua dolce/salata in ognuno degli strati. Negli anni d'osservazione dal 1954 al 1966, si è rilevato, per esempio, un notevole avanzamento dell'interfaccia che nelle sue manifestazioni più evidenti è stato di circa 30 m l'anno.

L'acquifero del Nord Humberside, vicino la foce del Fiume Humber, (Regno Unito), è caratterizzato da rocce calcaree, variamente permeabili, coperte da circa 20 m di depositi morenici sostanzialmente poco permeabili (FOSTER *et al.*, 1976). Si è osservata la penetrazione dell'acqua marina dal 1951 al 1973 ed il lento avanzamento di quest'ultima (Fig. 2). Tale circostanza è dovuta alla protezione garantita dalla copertura di depositi poco permeabili che, nonostante le oscillazioni tidali di circa 10 m, attenua il fenomeno dell'intrusione salina, effettivamente apprezzabile solo a breve distanza dal reticolo idrografico.

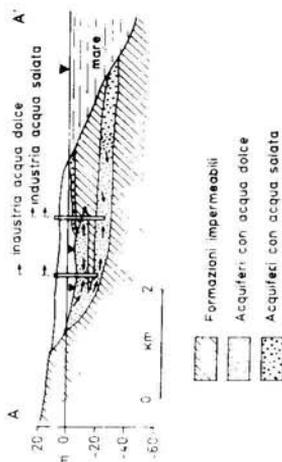
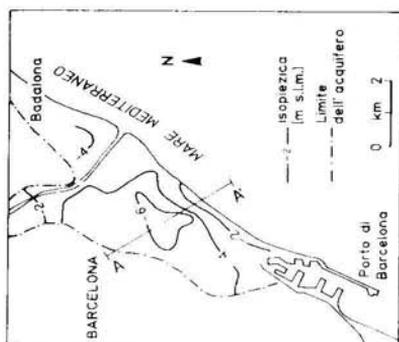
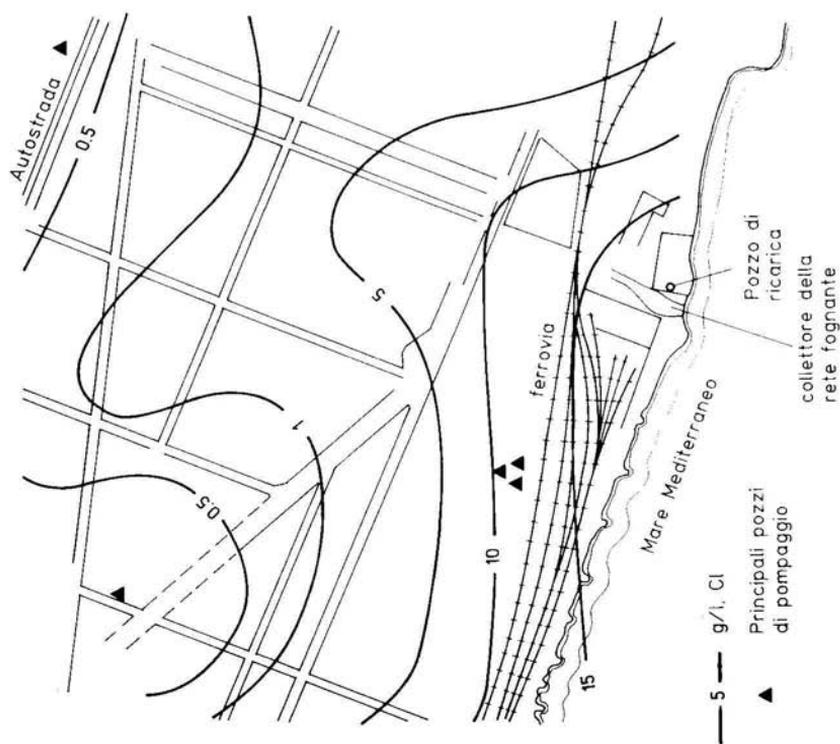


Fig. 1 - Intrusione marina nei pressi del Riera d'Horta nel delta di Besos (Barcellona, Spagna; da CUSTODIO, 1987).

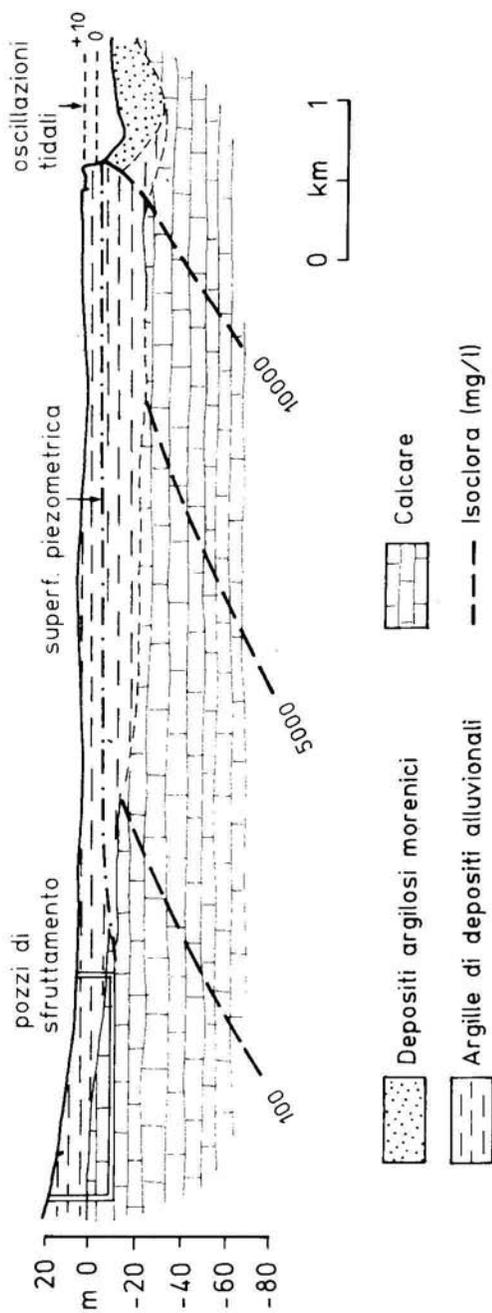


Fig. 2 - Sezione Idrogeologica schematica dell'acquifero calcareo del Nord Humberside (da FOSTER *et al.*, 1976).

L'area della duna costiera olandese, vicino Amsterdam, è interessante in quanto, in questo caso, non appaiono importanti effetti di risalita delle acque salate per lo sfruttamento delle acque sotterranee, poiché alcune lenti d'argilla, essendo in sostanza impermeabili, hanno fornito una sufficiente protezione delle risorse idriche sotterranee (HUISMAN, 1957).

La pianura costiera di Sant Pere de Ribes-Sitges (a sud di Barcellona, Spagna) è caratterizzata da sedimenti non consolidati, ghiaie, sabbie e argille che giacciono su calcari cretaci permeabili. Gli affioramenti di calcare "bordano" tale pianura, sia nell'interno del territorio sia lungo la costa mediterranea. In questo caso è proprio tramite i calcari che si compie la penetrazione dell'acqua marina, che non trova ostacoli naturali (Fig. 3) (CUSTODIO e GALOFRÉ, 1977).

Presso la costa Atlantica di Malika, vicino Dakar, nel Senegal, esiste un acquifero sabbioso, la cui falda è sostenuta dalle acque marine d'intrusione, studiato da Debuissou (1970). Mediante una fitta rete di piezometri e un prolungato monitoraggio, è stata rilevata la risalita della zona di transizione, a seguito del pompaggio, ed è stato accertato che il progressivo incremento della concentrazione dello ione cloro nelle acque emunte tende a stabilizzarsi su un valore costante.

Spesso gli acquiferi compromessi possono essere multistrato oppure si tratta di più acquiferi sovrapposti; a causa delle attività estrattive, possono crearsi effetti secondari, tramite connessioni o brevi circuiti tra gli strati o gli acquiferi. Ad esempio, l'intenso sfruttamento di un acquifero profondo crea un gradiente verso il basso che permette all'acqua salata, salmastra o inquinata, presente in un acquifero sovrastante, di penetrare nell'acquifero profondo, attraverso i tratti finestrati dei rivestimenti dei pozzi o lungo le discontinuità tra pareti delle perforazioni e i tubi dei pozzi, mal costruiti o rifiniti, inquinando le risorse idriche più pregiate. E' quanto avviene nella già menzionata area del delta di Besos, vicino Barcellona in Spagna (Fig. 1).

Le acque dell'acquifero multistrato di Bangkok sono state sfruttate a seguito della crescente richiesta, ad integrazione di quelle di superficie derivate dal fiume Chao Phraya. L'acqua è

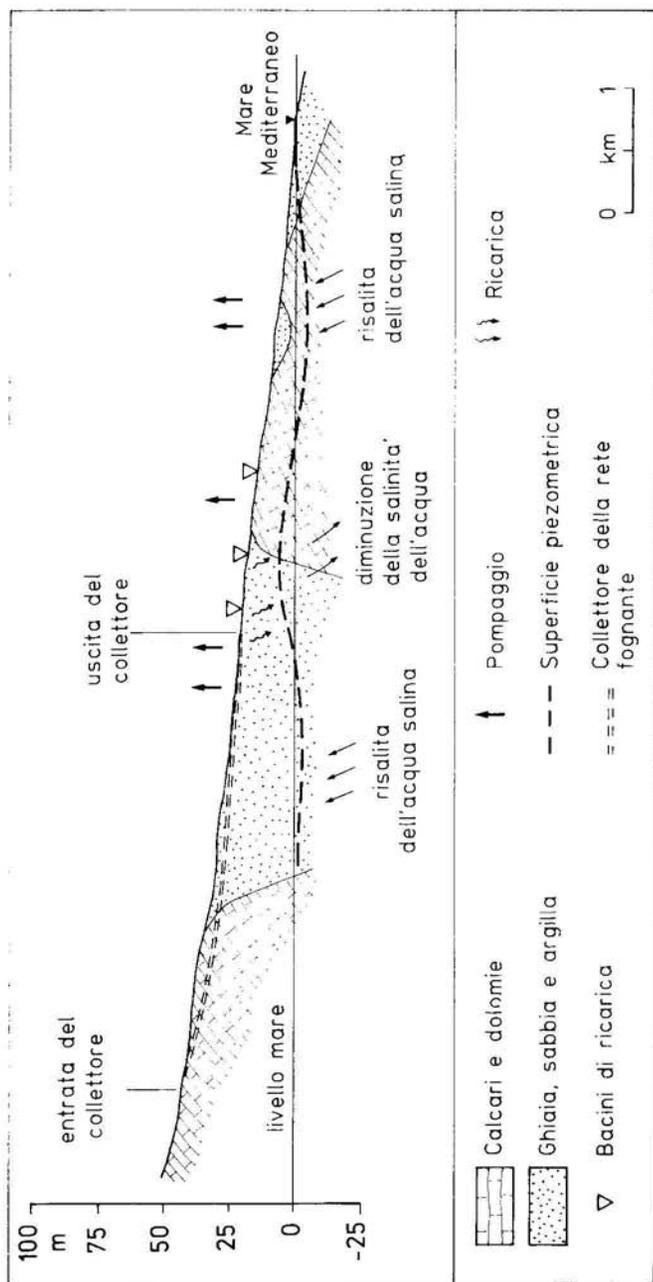


Fig. 3 - Sezione idrogeologica della Piana di Sirges - Sant Pere de Ribes, lungo l'affluente di Vilafranca, a sud di Barcellona, Spagna (da CUSTODIO e GALOFRÉ, 1977).

stata estratta da quattro strati acquiferi posti a diversa profondità; l'eccessivo pompaggio ha però causato sia la subsidenza del terreno sia l'inquinamento salino. Nell'area di Bangkok, nelle particolari formazioni geologiche che caratterizzano il sistema multistrato (argille, sabbie, ghiaie, gneiss e quarziti), esiste un flusso d'acqua salata che è la combinazione di quelle connate, provenienti dalla lisciviazione dell'acquifero, e di quelle marine d'intrusione (GANGOPADHYAY e DAS GUPTA, 1995). In questo caso si è utilizzato un modello numerico ad elementi finiti quasi-tridimensionale per valutare l'estensione dell'invasione dell'acqua salata, sotto le diverse condizioni d'esercizio del sistema, allo scopo di formulare un'appropriata strategia di gestione.

Dall'analisi dei casi di studio emerge che l'inquinamento per intrusione marina delle acque sotterranee dipende spesso dalle attività antropiche; s'elencano di seguito alcune di queste cause:

- estrarre dall'acquifero un volume idrico annuo superiore o non commisurato alla ricarica totale;
- concentrare l'estrazione, specie vicino alla costa, superando il valore critico della portata per cui l'acqua salina irrompe nella porzione dolce della falda idrica (non è chiaro se, per ostacolare l'inquinamento salino, a parità di portata media, è preferibile un pompaggio più intenso ed intermittente o continuo ma meno intenso);
- non compiere studi geologici esaurienti, che eventualmente individuino strati orizzontali impermeabili, che potrebbero limitare la salinizzazione, o che considerino le discontinuità verticali permeabili, come faglie, giunti aperti o filoni eruttivi (per esempio in vulcaniti antiche, rocce queste generalmente a bassa permeabilità), che potrebbero favorire l'inquinamento salino;
- sottovalutare l'influenza delle oscillazioni di marea, nel caso d'acquiferi altamente permeabili, sulle variazioni della salinità dell'acqua;
- non realizzare programmi di sfruttamento e reti di controllo della salinità, con la stesura di rapporti periodici sulla tendenza dell'intrusione salina;

- ritenere sufficienti alcuni anni di risultati buoni per pensare ad un'operazione di pompaggio sicura nel tempo;
- non proteggere il più possibile le fonti di ricarica di un acquifero;
- non isolare e cementare accuratamente pozzi e/o sondaggi, anche quando oramai inutili;
- l'urbanizzazione, la "pavimentazione" del terreno, il suo consolidamento, la deforestazione o la diminuzione della copertura vegetale, che riducono l'infiltrazione dell'acqua nel sottosuolo e quindi la ricarica naturale;
- la creazione di moderni sistemi d'irrigazione, che diminuiscono l'eccesso d'acqua sul terreno e quindi l'infiltrazione;
- la canalizzazione di fiumi e dei loro affluenti, con lo scopo d'evitare o diminuire le piene e le esondazioni, annullando l'infiltrazione delle acque esondate;
- la regimazione dei fiumi, tramite dighe o sbarramenti, che diminuisce la ricarica degli acquiferi;
- la bonifica di polder e/o di zone paludose, tramite il pompaggio dell'acqua contenuta in questi bacini, generalmente salmastra o salata, che può creare il sollevamento dell'interfaccia;
- lo scavo di canali o il loro approfondimento, per favorire la navigazione o per collegare aree interne con la costa, che può provocare, durante la stagione secca, quando il flusso nel canale è scarso, l'invasione di una "lingua" d'acqua salata nell'entroterra, tramite lo stesso canale;
- le modificazioni della linea di costa, tramite la creazione di nuovi porti, l'allargamento o il dragaggio di quelli esistenti, le opere a mare quali frangiflutti o banchine costiere e l'estrazione di ghiaia e sabbia dalle spiagge e dai canali fluviali;
- i drenaggi temporanei o permanenti negli scavi, durante l'esecuzione di piani interrati per edifici, di tunnel, di sottopassaggi o metropolitane, che possono abbassare la superficie piezometrica, favorendo la risalita dell'interfaccia tra le acque dolci e quelle salate;

- alcune opere sotterranee, quali tunnel, acquedotti, fognature e fondazioni, che possono causare un effetto sbarrante al flusso dell'acqua dolce verso la costa.

4. Metodi per la difesa dall'inquinamento salino

Si descrivono nel seguito alcuni metodi, adottati in vari paesi nel mondo, per fermare o controllare l'inquinamento salino e in particolare l'intrusione dell'acqua marina, mantenendo lo sfruttamento e limitando i danni.

Si rileva, come accade, per esempio, per l'acquifero calcareo del Nord Humberside (Fig. 2), l'esistenza di acquiferi costieri protetti dall'intrusione marina per la presenza di barriere naturali a bassa permeabilità, tali come cambiamenti di facies, sovrascorrimenti o faglie. L'esperienza dimostra che non si deve in ogni modo fare completo affidamento su queste barriere naturali, prescindendo da un frequente monitoraggio, che si dovrebbe sempre realizzare per un ottimale utilizzo delle risorse idriche sotterranee soggette al rischio d'inquinamento salino. Infatti, il caso di Llobregat (vicino Barcellona) è un chiaro esempio di un acquifero profondo apparentemente protetto, che dopo 10÷12 anni ha mostrato un'evidente intrusione marina. Arad, Kafri e Fleisher (1975) descrivono un caso significativo in cui la salinizzazione di un acquifero confinato, nella pianura di Judea, nel golfo di Tel-Aviv, si è avuta a causa delle faglie perpendicolari alla linea di costa, con effetti negativi non previsti.

Per difendersi dall'intrusione nell'isola di Malta, come pure in alcune isole hawaiane e nelle Canarie, sono stati costruiti, trasversalmente ai pozzi di pompaggio e circa al livello mare, canali d'ispezione e gallerie radiali, nei quali è installata un sistema di chiuse che controlla direttamente l'entrata dell'acqua salata. Queste opere in realtà sono forme di "pescaggio" d'acqua dolce prima che questa venga inquinata dall'acqua marina. Una rappresentazione schematica di vari interventi adottati nelle isole suddette è riportata in Fig. 4.

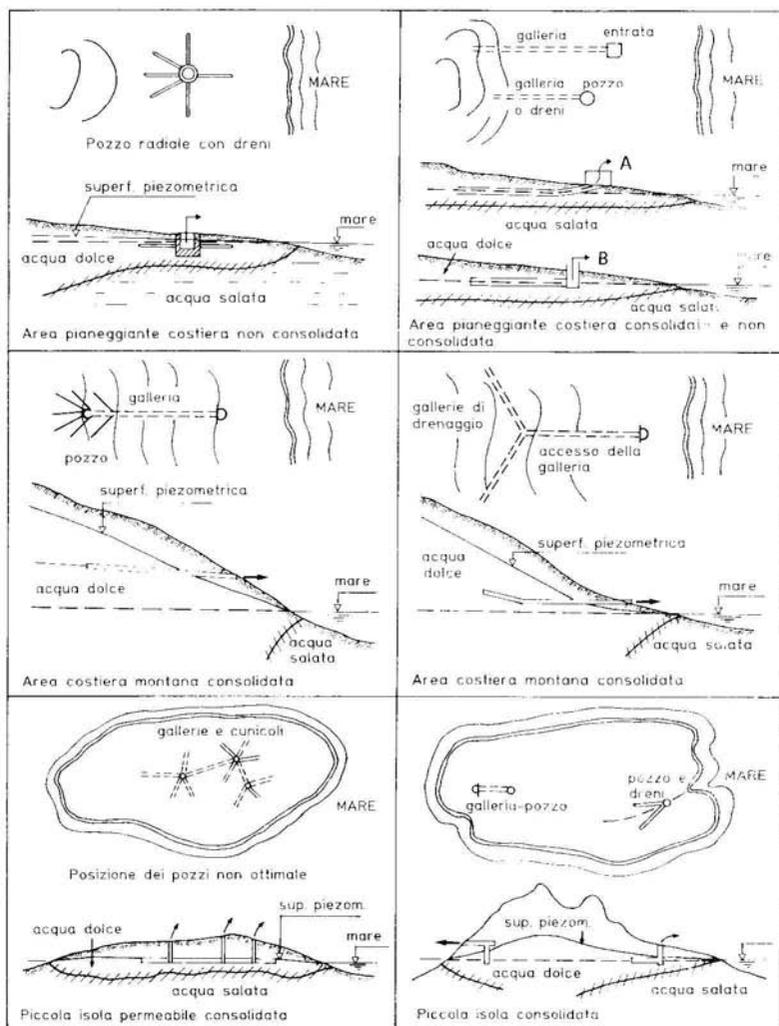


Fig. 4 - Schemi di opere di sfruttamento di falde idriche costiere. Casi reali delle Canarie, delle Hawaii e dell'isola di Malta (da CUSTODIO, 1987).

Per mantenere l'equilibrio idrodinamico in un acquifero senza avere contaminazione salina, si ricorre spesso alle ricariche artificiali e alle barriere idrauliche. La barriera idraulica lungo la costa (esempi interessanti esistono in California, BRUINGTON e SEARS, 1965; e BRUINGTON, 1972) può consistere nella ricarica, puntuale o areale, d'acqua dolce, nel pompaggio d'acqua marina, o nella combinazione di entrambe le tecniche. Si tratta di mantenere un carico idraulico, tramite la ricarica d'acqua dolce, che riesca a bilanciare il "carico" dell'acqua salata, cioè tale che ostacoli l'intrusione salina. Se aumenta la profondità dell'acquifero sarà necessario un maggior carico d'acqua dolce. In alcuni casi, per esempio nel caso di un acquifero freatico, la barriera idraulica può essere creata tramite canali costieri perdenti, trincee o zone d'infiltrazione (Fig. 5).

Tale metodo è stato applicato alle dune vicino Amsterdam (Roebert); in aree urbanizzate invece esso pone problemi quali la mancanza di sufficiente spazio, l'interferenza con le strade ed il costo del terreno da espropriare; per questo può essere più conveniente adottare una ricarica puntuale, tramite pozzi.

La realizzazione di barriere idrauliche con acque dolci ha molti fattori condizionanti, tra cui i principali sono: la disponibilità dell'acqua, la durata di questa disponibilità, la distanza dalla barriera dalle fonti, la qualità dell'acqua, la necessità che sia trattata prima che possa essere immessa e la capacità di immagazzinamento dell'acquifero. La realizzazione di barriere idrauliche è possibile se si consegue un vasto consenso, cosa che si è riuscito ad ottenere per esempio in California (BRUINGTON e SEARS, 1965).

Alcune possibili fonti d'acqua per la ricarica sono le acque dei fiumi, le acque reflue depurate o quelle di raffreddamento. Un caso reale è quello realizzato nella Piana Sitges-Sant Pere de Ribes, a Sud di Barcellona (Fig. 3). L'affluente di Vilafranca fa scorrere per circa 20 km le acque reflue in esso scaricate più a monte. Lungo questo percorso ha luogo una moderata auto depurazione; l'acqua fluente permette la ricarica mediante bacini artificiali, realizzati con dighe in terra poste lungo l'alveo. In due anni e mezzo questa ricarica ha migliorato la salinità delle acque

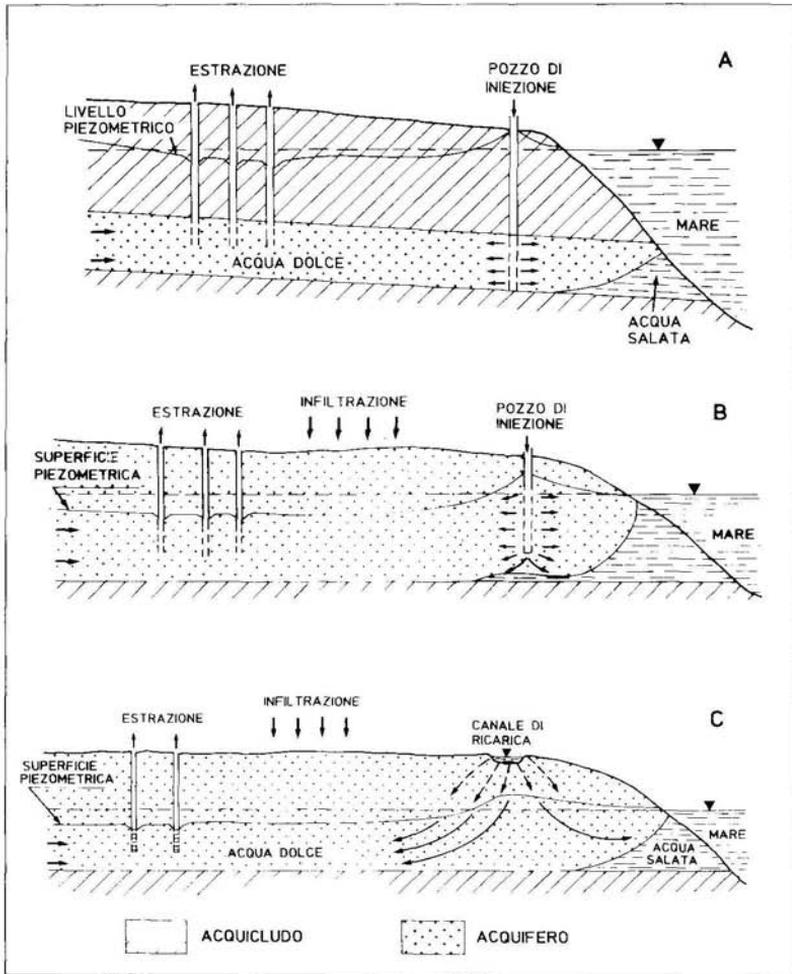


Fig. 5 - Differenti tipi di barriera idraulica con ricarica: A) mediante pozzi, in un acquifero confinato; B) mediante pozzi in un acquifero freatico; C) mediante canale di ricarica, in un acquifero freatico (la ricarica avviene attraverso la zona non satura).

sotterranee nella zona interessata gravemente dall'intrusione salina (CUSTODIO e GALOFRÉ, 1977).

Un altro caso si riferisce all'acquifero di Llano de Palma (Isole Baleari, Majorca, Spagna) utilizzato esclusivamente per l'irrigazione, (Fig. 6): il generale miglioramento è il risultato che si ha sia per la ricarica sia per lo stretto controllo sui nuovi pozzi (Iglesias e Porras, 1978). Una lunga esperienza in queste applicazioni esiste in California, in Olanda e in Israele.

Il processo d'infiltrazione è più semplice, anche se, come già detto, spesso meno conveniente, quando la superficie di ricarica è molto estesa, al contrario della ricarica puntuale; il flusso dell'acqua attraverso una zona non satura favorisce l'autodepurazione della stessa, permettendo l'uso d'acqua di minore qualità.

Il metodo della ricarica artificiale è in ogni caso costoso e quindi necessita valutare sia i benefici che i costi.

La fattibilità della ricarica artificiale dipende da molti fattori e soprattutto dalle caratteristiche dell'acquifero preso in considerazione; in generale l'esperienze maturate in un caso non possono essere integralmente trasferite in un altro. Si dovranno fare delle prove accurate allo scopo di trovare il giusto sistema di ricarica, il miglior pretrattamento dell'acqua prima che venga immessa, ottimizzando l'efficacia dei dispositivi di cui l'opera si compone.

Per minimizzare l'intrusione dell'acqua di mare e le perdite d'acqua dolce nel mare, si deve studiare il processo di ricarica assieme a quello di estrazione. Per una corretta progettazione e gestione è sempre utile fare ricorso a modelli numerici di simulazione dell'acquifero e degli effetti delle opere.

Negli acquiferi confinati o quando esiste uno strato a bassa permeabilità vicino alla superficie topografica, l'unica soluzione per la ricarica è quella dei pozzi d'immissione. Nella figura 5 sono schematizzati vari casi in diversi tipi di acquiferi.

A Los Angeles (California), per evitare pozzi a diversa penetrazione, è stato usato un unico pozzo che immette acqua in un sistema multiacquifero, separando i diversi punti d'immissione con cementazioni e packer. Questo pozzo permette di ricaricare

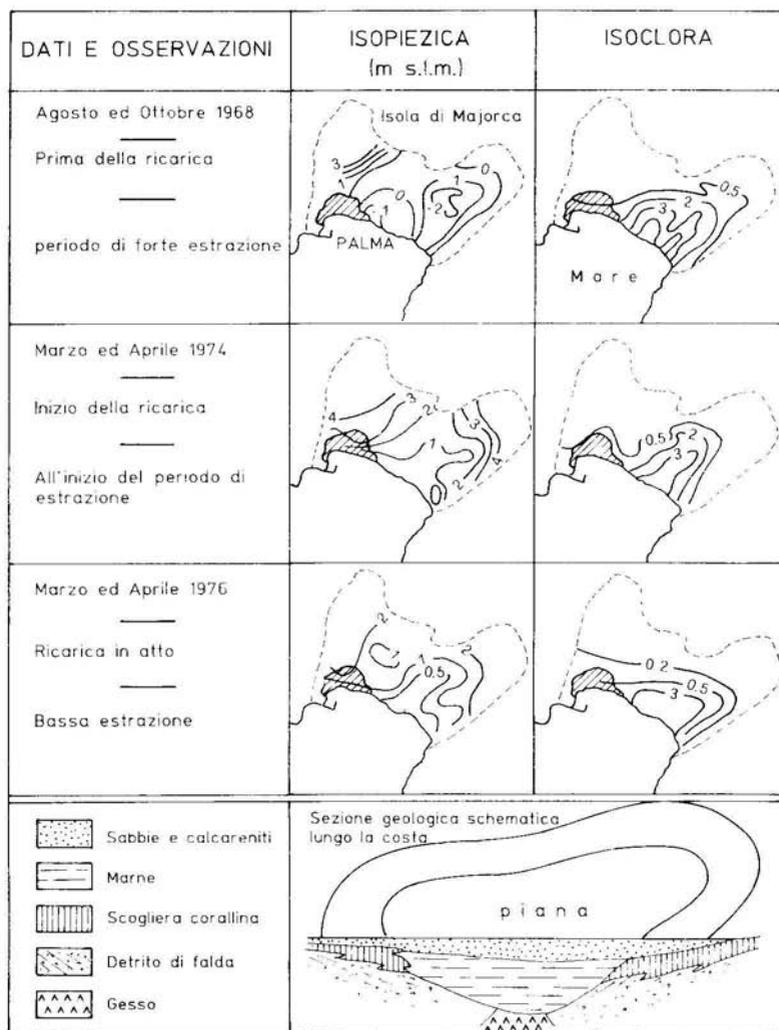


Fig. 6 - Cambiamenti della quota della superficie freatica e della concentrazione di cloro delle acque sotterranee come conseguenza di una ricarica mediante pozzi con acque reflue trattate (da CUSTODIO, 1987, modificata).

diversamente i vari strati acquiferi interessati dall'acqua d'intrusione (Fig. 7). L'uso dei pozzi d'immissione ha lo svantaggio che sono necessari sia periodici interventi di spurgo del pozzo (nel caso della West Coast Basin Barrier, Los Angeles, lo spurgo dei pozzi è praticato con l'intervallo di uno o due anni) sia disponibilità economiche elevate per la realizzazione dei pozzi e per la fornitura dell'acqua, che deve essere di buona qualità, per evitare che intasi in breve tempo i filtri del pozzo.

Quando s'inietta l'acqua si deve necessariamente evitare che entri aria, che riduce l'efficienza del pozzo, e può provocare pericolose rotture dei dispositivi in pressione.

Lo spurgo periodico dei pozzi spesso si effettua installando una pompa che funziona fino al ripristino della capacità del pozzo. Nei pozzi di ricarica di Besos e di Llobregat vicino Barcellona, che immettono acqua trattata, è installata una pompa permanente che effettua periodicamente lo "spurgo".

Il trattamento può essere facilitato con l'uso di prodotti chimici (polifosfati, acido cloridrico, acido solfamminico o acido ammidosolforico, cloro, ecc.) a seconda della natura delle sostanze intasanti. I prodotti chimici usati devono però essere scelti con accuratezza, per non danneggiare il pozzo.

Il metodo delle barriere idrauliche può causare però, specie in aree prossime alla costa, la perdita parziale in mare dell'acqua dolce iniettata. Questo è un altro aspetto negativo di tale metodo, per cui bisogna valutare se è più importante l'aumento della riserva acquifera oppure la percentuale d'acqua persa a mare. Se quest'ultima è molto alta, la ricarica può essere effettuata con acqua di qualità inferiore (acque salmastre o acque reflue), tenendo sempre sotto controllo comunque la possibilità d'inquinamento da parte di queste acque non pregiate.

Una soluzione, anche se costosa, all'inconveniente della perdita idrica che si può verificare con le barriere idrauliche, potrebbe essere l'installazione a monte di una seconda barriera di pozzi, questa volta di estrazione, che preleva parte dell'acqua iniettata, qualitativamente non buona. Casi reali sono stati studiati da Sheahan (1977) e da Vandenberg (1975), in California.

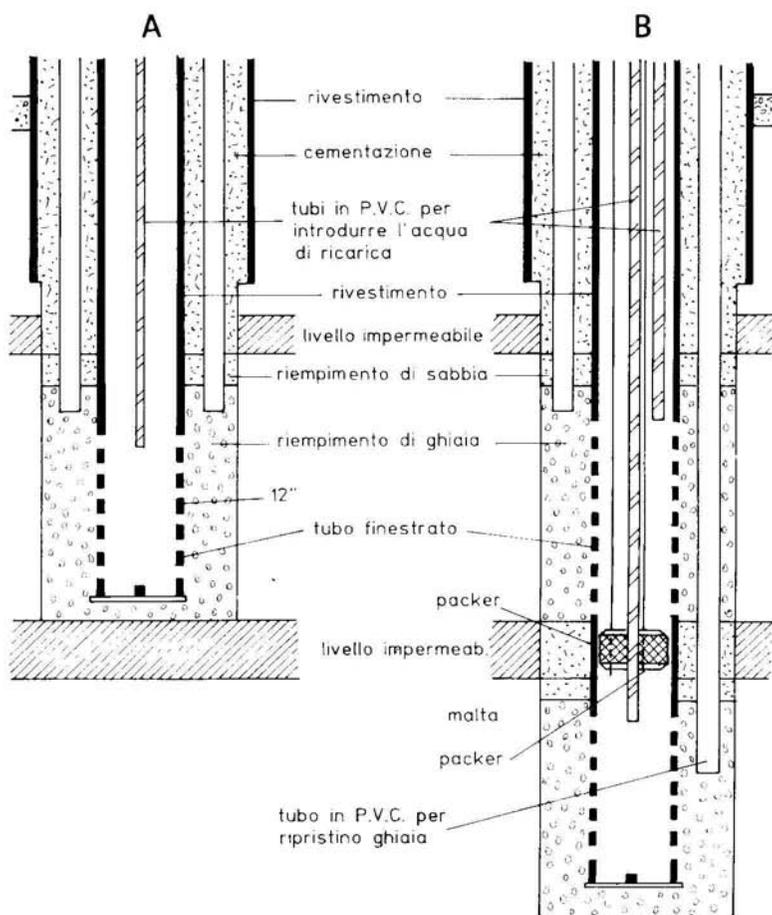


Fig. 7 - Schema dei pozzi di ricarica della falda della barriera di "Alamitos" (California) a uno (A) e a due (B) livelli di immissione.

Come già accennato, alle barriere idrauliche che immettono acqua dolce possono alternarsi quelle che emungono; tale metodo consiste nel creare una barriera di pozzi costieri che pompano l'acqua d'invasione marina, inevitabilmente mista ad acqua dolce, scaricandola poi a mare (Fig. 8). Anche questo metodo è molto costoso, soprattutto per l'energia necessaria al pompaggio; un caso sperimentale è quello del bacino di Oxarnad in California (COE, 1972). Questa tecnica va applicata integrandola con altri metodi protettivi e riducendo sia la portata che la durata d'esercizio dei pozzi di sfruttamento dell'acquifero. Si può quindi ricorrere all'estrazione da pozzi ormai salati e abbandonati, situati vicino alla costa. E' quello che accade quasi involontariamente nell'aria del delta di Besos e di Llobregat (Fig. 1), dove l'industria locale utilizza per i suoi fini l'acqua salata estratta lungo la costa, proteggendo involontariamente i pozzi ubicati nell'entroterra (CUSTODIO, 1987). In California (Orange Country), lungo la costa, si ricorre alla combinazione di barriere parallele di pompaggio e d'iniezione; la reciproca presenza è indispensabile affinché il sistema funzioni.

Un altro metodo di controllo diretto della risalita del cono d'intrusione utilizza un singolo pozzo, nel quale si pongono due pompe in due livelli di controllo, ben separati da un packer. La pompa più profonda è immersa nell'acqua salata; l'altra è installata più in alto, nella porzione dolce della falda idrica. La presenza di uno strato intermedio semipermeabile può essere molto favorevole. Il fine è intercettare una portata d'acqua salina, prelevata quindi dal tratto finestrato più profondo, tale che la zona di transizione si mantenga costantemente tra i due tratti finestrati e non salga fino a quello da dove s'emungono le acque dolci. Questo metodo ha il vantaggio della necessità di un solo pozzo, che coincide con quello d'estrazione, ma comporta il rischio di contaminazione dell'acqua dolce a causa d'errori nella cementazione; inoltre, ha un costo elevato, per la complessità costruttiva e il consumo notevole d'energia delle due pompe. Invece che un unico pozzo ci sono stati casi in cui si è costruito un secondo pozzo (vicino a quello che s'attesta nella falda dolce) più profondo, che "controlla" l'acqua salata. Studi teorici sono stati con-

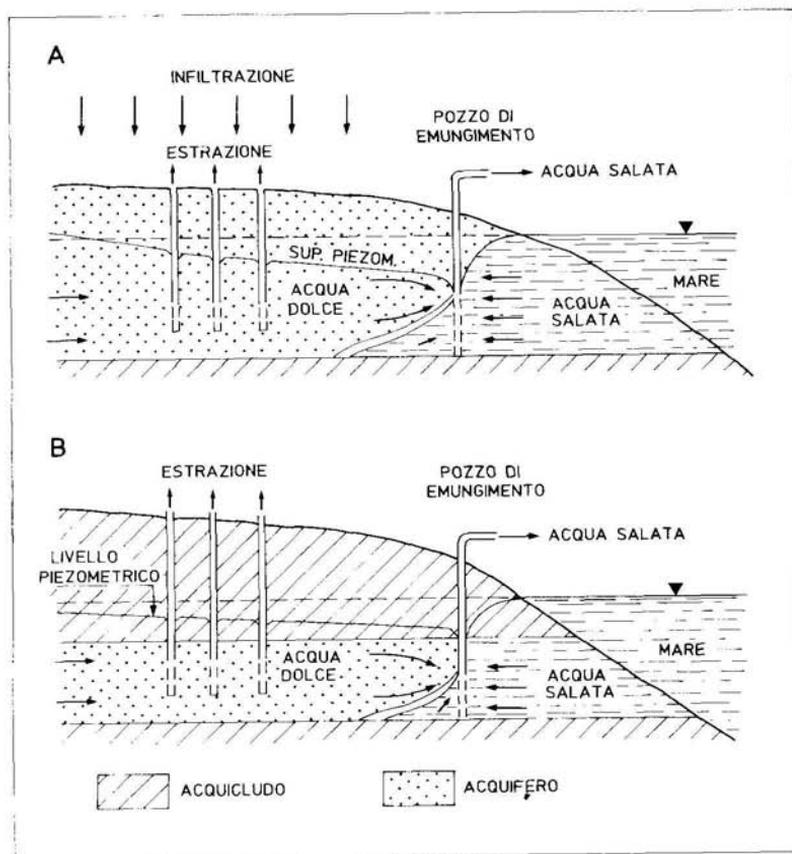


Fig. 8 - Controllo dell'intrusione marina mediante barriera idraulica dovuta all'emungimento: A) acquifero freatico; B) acquifero confinato.

dotti da BABUSHKIN (1963 a, b), WOLANSKI e WOODING (1973), SUGIO e UEDA (1973), MOLENKAMP (1980).

L'iniezione d'aria negli acquiferi è, già da alcuni decenni, un metodo di controllo del moto delle acque sotterranee. L'iniezione d'aria può sia accelerare che ritardare il movimento dell'acqua; in particolare, una barriera d'aria può essere usata per impedire o rallentare il flusso d'acqua salina verso la falda idrica dolce. Le iniezioni d'aria, usate su entrambi i lati di una barriera idraulica d'acqua dolce, riducono i costi e le quantità d'acqua necessarie, diminuendo la conducibilità idraulica. Esiste infatti una relazione, generalmente esponenziale, tra il grado di saturazione e la conducibilità idraulica per cui al diminuire del primo, in virtù dell'aumento dell'aria intergranulare, diminuisce anche la seconda.

Per ostacolare l'inquinamento salino, bisogna in ogni caso individuare e controllare i pozzi e i sondaggi non realizzati correttamente oppure deterioratisi nel tempo. Generalmente è più semplice cementare i pozzi sospetti, in quanto la localizzazione di tali difetti non è un procedimento molto semplice e non sempre è possibile. La verifica del cambiamento della salinità durante i primi minuti di pompaggio, come pure gli studi sulla circolazione verticale dell'acqua all'interno di pozzi sospetti, per mezzo di amperometri ad alta sensibilità o di traccianti, generalmente radioattivi, sono procedure molto utili.

Finora si è prestata poca attenzione all'abbandono dei pozzi, che invece possono diventare una fonte diretta d'inquinamento della falda acquifera (Fig. 9); a tutt'oggi sono stati adottati effettivamente pochi rimedi per tale controllo.

Le barriere fisiche sono un'altra importante soluzione del problema dell'intrusione marina. Queste consistono in veri e propri "muri", sufficientemente impermeabili, costruiti lungo la costa e, se possibile, penetranti in tutto lo spessore dell'acquifero (Fig. 10).

Certo è che queste barriere non risolvono il problema del sovrassfruttamento, ma possono impedire del tutto l'intrusione salina.

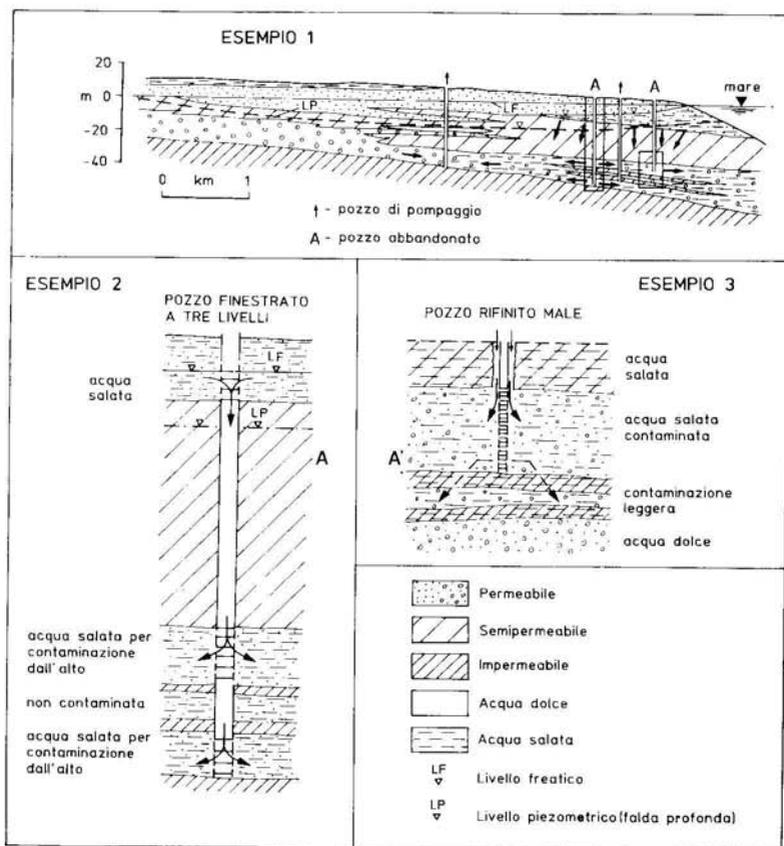


Fig. 9 - Esempi d'inquinamento salino attraverso pozzi mal realizzati o abbandonati (da Custodio, 1987, modificata).

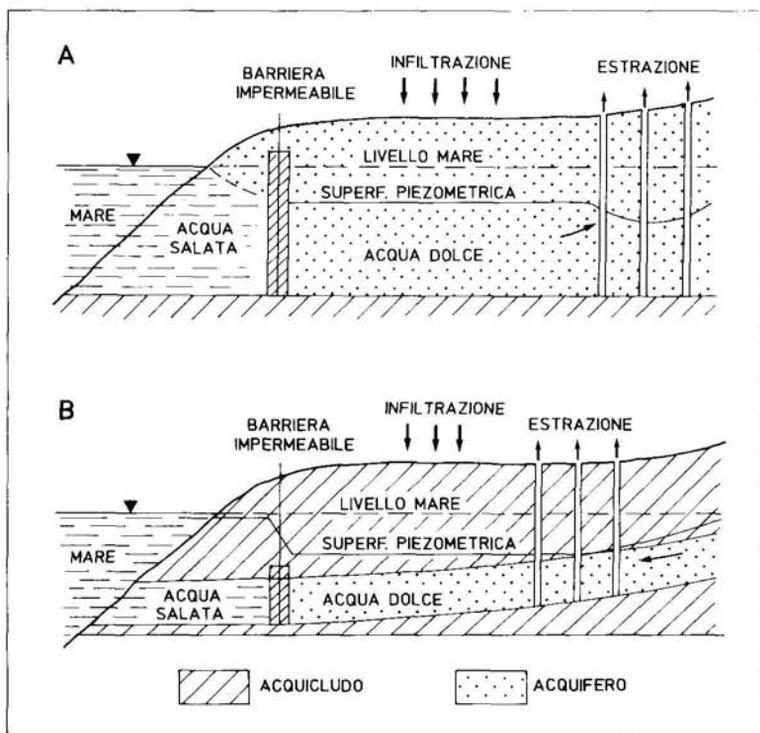


Fig. 10 - Controllo dell'intrusione marina mediante barriera impermeabile: A) acquifero freatico; B) acquifero confinato.

Tali barriere possono essere realizzate tramite "paratie" di pali o con il riempimento di profonde trincee con argilla, cemento o calcestruzzo. Gli inconvenienti sono i costi molto alti e la profondità cui spingersi. Per ovviare a questi svantaggi, è più conveniente ridurre la conducibilità idraulica nella zona satura con iniezioni di cemento, bentonite, sostanze bituminose, di qualche prodotto chimico come gel-silicei, lacrilato di calcio o di sostanze espansive. Generalmente le iniezioni avvengono mediante sondaggi disposti ad intervalli da due a quattro metri, generalmente in due o tre file parallele alla costa.

L'efficacia di tale operazione dipende molto dall'accuratezza del lavoro; nelle formazioni molto permeabili però è molto difficile ottenere una riduzione sostanziale della permeabilità. Per questioni di costo, la profondità raggiungibile con questa tecnica è limitata, generalmente non ha superato i 30 metri.

In conclusione, anche questo metodo presenta degli svantaggi, la limitata profondità raggiungibile, la difficoltà in presenza di strati ad alta permeabilità, la difficile manutenzione delle opere in aree sismiche. Non si può menzionare nessun esempio riuscito, in quanto i progetti considerati sono stati abbandonati dopo lo studio di fattibilità e l'analisi costi-benefici.

Lo smaltimento d'acque reflue opportunamente trattate, in acquiferi costieri ormai salati, può fornire, in presenza di particolari condizioni idrogeologiche, acque dolci. Vicino Miami (Florida), un acquifero profondo calcareo, altamente permeabile, contiene acqua salata e salmastra, e riceve acque reflue trattate (GARCIA-BENGOCHEA *et al.*, 1973), allo scopo d'ottenere un miglioramento della qualità delle acque.

E' importante poter smaltire in una falda idrica salinizzata acque di scarico, ma è ancora più importante se da questo sistema s'ottengono risorse idriche. Vi sono molti studi a tal proposito: Moulter (1970), Brown e Silvey (1973a, 1973b e 1977), Larson e Papadopulos (1977), Schuurmans e van der Akler (1981) e Esmail e Kimbler (1967).

Un'ultima possibilità, non meno importante per la salvaguardia delle risorse idriche sotterranee, è l'utilizzo di "altre" acque al posto di quelle dolci della falda; infatti, si potrebbe ri-

correre a quelle salmastre e/o salate in alcune attività industriali e per lo scambio di calore. Tutto questo comporta un vero e proprio cambiamento socio-economico e tecnologico. Non è da sottovalutare l'importanza che avrebbero una maggiore sensibilizzazione, sui temi del corretto uso delle risorse idriche, e una parallela politica territoriale per l'acqua.

Bibliografía

- ARAD A., KAFRI U., FLEISHER E., 1975 - *The Na' Aman springs, Northern Israel: salinization mechanism of an irregular freshwater - sea water interface*. Journal of Hydrology, Vol. 25, 81-104. Elsevier.
- ATKINSON S. F., MILLER G., CURRY D. S., LEE S. B., 1986 - *Salt water intrusion*. Lewis Publishers, Michigan.
- BABUSHKIN V.D., 1963a - *Ekspluatatsiya lins bez primeneniya merpo zaschie ot podsasyvaniya solenykh vod snizu. (Exploitation of water lenses without applying the protective measures from salt water entrainment upwards)*. M., Izd vo AN USSR, 95-106.
- BABUSHKIN V.D., 1963b - *Methods of exploiting and evaluating the resources of fresh water lenses. The Development of Ground Water Resources with Special Reference to Deltaic Areas*. United Nations, Water Resources Series n° 24. ECAPE, 188-191.
- BROWN D.L., SILVEY W.D., 1973a - *Underground waste management and artificial recharge*. II Int. Symp. on Underground Waste Management and Artificial Recharge, New Orleans. AAPG - USGS - IASH. Vol. 1, 379 - 419.
- BROWN D.L., SILVEY W.D., 1973b - *Underground storage and retrieval of fresh water from a brackish-water aquifer*. Underground Waste Management and Artificial Recharge: Vol. 1, New Orleans Symp., Int. Assoc. Scientific Hydrology - American Geophysical Union, 349 - 414.
- BROWN D.L., SILVEY W.D., 1977 - *Artificial recharge to a fresh-water sensitive brackish-water and aquifer*. Norfolk, Virginia. U.S. Geological Survey, Prof. Paper 939. pp. 54. Washington.
- BRUINGTON A.E., 1972 - *Salt water intrusion into aquifers*. Water Resources Bulletin. Vol. 8, N° 1, 150-160.
- BRUINGTON A.E., SEARES F.D., 1965 - *Operating a sea water barrier project*. Proc. Am. Soc. Civil Engineers, Journal Irrigation and Drainage Division. Vol. 91, IRI. 117-140.
- COE J.J., 1972 - *Sea water intrusion extraction barrier*. Am. Soc. Civil Engineers, J. Irrigation and Drainage Div. IR 3, 387-403.
- COTECCHIA V., 1977 - *Studi e ricerche sulle acque sotterranee e sull'intrusione marina in Puglia (Penisola Salentina)*. CNR - Quaderno n. 20 IR-SA-CNR, Roma.
- COTECCHIA V., POLEMIO M., 1995 - *L'inquinamento e il sovrasfruttamento delle risorse idriche sotterranee pugliesi*. VI Workshop del Progetto Strategico "Clima, Ambiente e Territorio nel Mezzogiorno", Dicembre 1995, Taormina.
- CUSTODIO E., 1981 - *Metodo de calculo de las mezclas de agua resultante de la recarga artificial con aguas residuales tratadas en el acuífero cautivo del delta del Besos*. IV Asamblea Nacional de Geología y Geofísica Zaragoza, 1981. Instituto Geografico Nacional. 18 pp.

- CUSTODIO E., 1987 - *Groundwater problems in coastal areas*. International Hydrogeological Programme. UNESCO, Belgium, 1-596.
- CUSTODIO E., GALOFRÉ A., 1977 - *Basin recharge in the Sitges Plain (Barcelona, Spain) used for the temporary disposal of municipal waste water*. Memorics Birmingham Congress, U.K. Int. Assoc. Hydrogeologists. Vol. XIII, 41-57.
- CUSTODIO E., SUAREZ M., GALOFRÉ A., 1976 - *Ensayos para el analisis de la recarga de aguas residuales en el delta del Besos*. II Asamblea Nacional de Geodesia y Geofísica. Barcelona. Instituto Geográfico y Catastral, Madrid.
- DEBUSSON J., 1970 - *La nappe aquifere du cordon dunaire de Malika (Senegal)*. Bull. BR M, 2nd Serie Sec. III, N. 3, 149-161, Paris.
- ESMAIL O.J., KIMBLER O.K., 1967 - *Investigation of the technical feasibility of storing fresh water in saline aquifers*. Water Resources Research, Vol. 3, N° 3, 683-695.
- FOSTER S.S.D., PARRY E.L., CHILTON P.J., 1976 - *Groundwater resource development and saline water intrusion in the Chalk aquifer of North Humberside*. Natural Environment Research Council, Institute of Geological Science. U.K., rep. 76/4, 34 pp. London.
- GANGOPADHYAY S., DAS GUPTA A., 1995 - *Simulation of salt - water encroachment in a multi-layer groundwater system, Bangkok, Thailand*. Hydrogeology Journal, Vol. 3, n. 4, 74-87.
- GARCIA-BENGOCHEA J.I., et al., 1973 - *Recharge of treated waste waters and rainfall runoff into deep saline aquifers of South Florida, USA*. Atti II Convegno Internazionale sulle Acque Sotterranee. Palermo. ESA/AIH/AIRH. 687-700.
- HUISMAN L., 1957 - *The determination of the geohydrological contacts for the dune - water catchment area of Amsterdam*. General Assembly of Toronto, Int. Assoc. Scientific Hydrology, Pub. 44, 168-182. Gentbrugge.
- IGLESIAS A., PORRAS J., 1978 - *Re-use of treated sewage for sea water intrusion control in Llano de Palma (Balearic Islands)*. Seminar on Selected Water Problems in Islands and Coastal Areas with special regard to Desalinization and Groundwater. Malta. U.N. Economic Commission for Europe. Paper SEM5/R13, 8 pp.
- LARSON S.P., PAPADOPULOS S.S., 1977 - *Simulation of wastewater injection into a coastal aquifer system near Kahulu, Maui, Hawaii*. Proc. Hydraulics in the Coastal Zone. Am. Soc. Civil Engineers. College Station, Texas, 107-116.
- MOLENKAMP G.L., 1980 - *Some results obtained with an analytical solution in a radial symmetric profile. Research on Possible Changes in the Distribution of Saline Seepage in the Netherlands*. Committee for Hydrological Research, TNO, Proceedings and Information, N° 28. The Hague. 77-101.

- MOULER E.A., 1970 - *Freshwater bubbles: a possibility for using saline aquifers to store water*. Water Resources Research, Vol. 6, N° 5. Octobre. 1528-1531.
- PRATESI, 1996 - *L'acqua rubata*. Panda, WWF, XXX, 3, 8-9.
- ROBERTS A.J., - *Freshwater development and salt water encroachment in the Amsterdam dune water catchment area*. City of Amsterdam Water Supply Board.
- SCHIMORAK S., 1967 - *Salt water encroachment in the Coastal Plain of Israel*. Inter. Assoc. Scientific. Hydrology, Haifa. Pub. 72, 305-318.
- Schuurmans R.A., van der AKKER C., 1981-*Artificial removal of intruded saline water in a deep aquifer*. VII Salt Water Intrusion Meeting. Uppsala. Sveriges Geologiska Undersokning. Rapporten och Meddelanden, N° 27. Uppsala. 239-246.
- SHEAHAN N.I., 1977 - *Injection/extraction well system - a unique sea water intrusion barrier*. Ground Water, Vol. 15, N° 1. 32-50.
- SUGIO S., UEDA T., 1973 - *Analysis of fresh-salt water interface in aquifer during salt water draining*. Proc. Int. Symp. on Development of Ground Water Resources. Madras. Council of Scientific and Industrial Research. India. Vol. 12. IV-1-IV-8.
- SULEIMAN, 1995 - *Deterioration of quality of groundwater from Suani wellfield, Tripoli, Libya, 1976-93*. Hydrogeology Journal, Vol. 3 n. 2.
- VANDENBERG A., 1975 - *Simultaneous pumping of fresh and salt water from a coastal aquifer*. Journal of Hydrology. Vol. 24. 37-43. Amsterdam.
- WOLANSKI E.J., WOODING R.A., 1973 - *Steady flow to sink pair symmetrically situated above and below a horizontal diffusing interface*. Water Resources Research, Vol. 9, N° 2. 415-425.