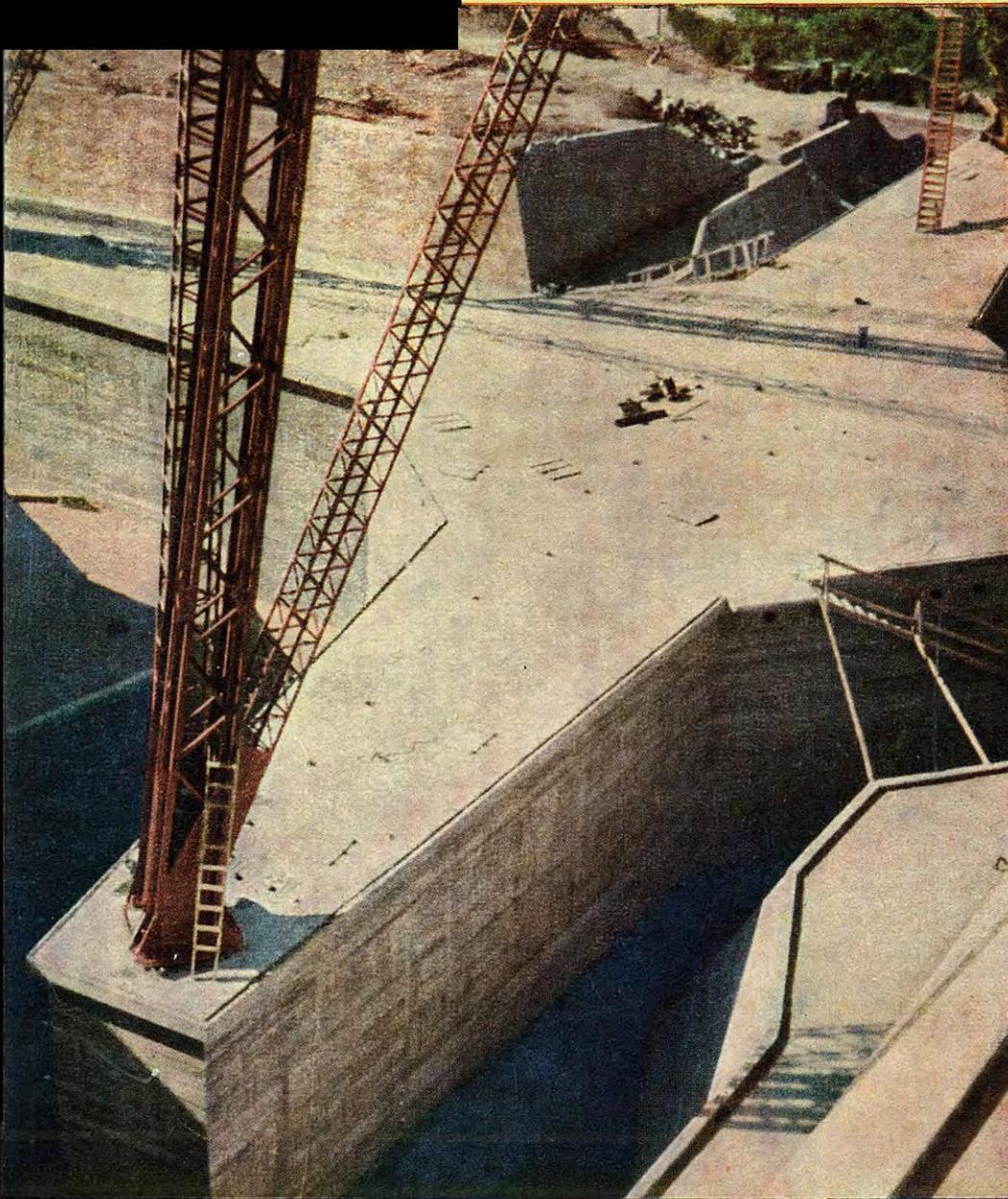


# GEO **TECNICA**

**GEOLOGIA TECNICA - FONDAZIONI  
COSTRUZIONI DI TERRA**

RIVISTA TECNICA BIMESTRALE  
ORGANO DELL'ASSOCIAZIONE GEOTECNICA ITALIANA



**DIRETTORI:**

ARRIGO CROCE  
FELICE IPPOLITO

In questo numero:

**V. Cotecchie:** Influenza dell'acqua marina sulle falde acquifere in zone costiere, con particolare riferimento alle ricerche d'acqua sotterranea in Puglia.

**G. Sapio:** Sulla resistenza alla penetrazione dell'ago di Proctor.

**Note Tecniche.**

**Rassegna delle Relazioni e delle discussioni tenute al III Cong. Int. di Geotecnica:**

**L. De Vito:** Riassunti della relazione generale e delle memorie presentate alla quarta sezione.

**Notiziario.**

**Bibliografia.**

# 3

MAGGIO - GIUGNO

ANNO II - 1955

Attraversamento elettrico dello stretto di Messina, basamento in costa calabra  
CO. SI. A. C. - Compagnia Siciliana Appalti e Costruzioni S. p. A. - Via G. Vaglica, 22 - PALERMO - Tel. 13.131

EDIZIONE



MILANO

# Editoriale

## Influenza dell'acqua marina sulle falde acquifere in zone costiere, con particolare riferimento alle ricerche d'acqua sotterranea in Puglia

Il problema dell'invasione delle rocce del continente da parte dell'acqua del mare e i suoi effetti sul deflusso di acque dolci sotterranee, in corrispondenza di aree costiere, rappresentano oggi dei problemi di grande attualità in Italia e all'estero, particolarmente in quei casi in cui, per la mancanza di sorgenti o di corsi d'acqua a deflusso perenne, si debba procedere all'utilizzazione delle acque di falda per lo sviluppo e la trasformazione agraria di zone costiere.

L'argomento, affrontato per la prima volta da GHYBEN ed HERZBERG alla fine del secolo scorso, in occasione della penetrazione dell'acqua del mare in alcuni pozzi situati sulle coste dell'Olanda e in alcune isole a Nord della Germania, ha suscitato, nella prima metà di questo secolo, un interesse sempre più vivo, in seguito al crescente fabbisogno di acque sotterranee, tanto è vero che oggi si contano non pochi lavori che discutono le modalità con le quali si presenta il fenomeno dell'invasione dell'acqua marina in varie località della terraferma e di molte isole.

Nonostante la diffusione del fenomeno, di esso non esiste però una esauriente trattazione scientifica. I principi che regolano l'equilibrio idraulico dell'acqua dolce sotterranea flottante sull'acqua del mare, penetrata nelle rocce del continente, ancor oggi, per la maggior parte degli autori, restano quelli stabiliti dalla nota legge di GHYBEN ed HERZBERG, la quale non tiene conto degli aspetti dinamici assunti dal fenomeno, in particolare durante l'emungimento da pozzi. A complicare notevolmente lo studio del fenomeno intervengono poi sia la diffusione salina fra l'acqua marina e l'acqua dolce, sia le complesse reazioni chimiche che avvengono fra le acque salmastre e le rocce con le quali esse sono a contatto.

Una precisa messa a punto del fenomeno, sotto gli aspetti geoidrologico, idrodinamico e geochimico assieme, viene svolta nell'articolo dell'ing. COTECCHIA, che la nostra rivista è lieta di pubblicare in questo fascicolo. La disamina del problema è fra l'altro condotta dall'autore, oltre che sulla scorta degli elementi fino ad oggi acquisiti dalla letteratura, sulla base di alcune interessanti osservazioni svolte in me-

rito alle ricerche di acqua sotterranea in corso nella terra di Bari e nella penisola Salentina, ad opera dell'Ente per lo sviluppo della irrigazione e la trasformazione fondiaria in Puglia e Lucania.

Lo studio, svolto con lo scopo di promuovere una più approfondita indagine scientifica nelle ricerche riguardanti la Puglia, pone chiaramente in luce i gravi danni che possono derivare, alla qualità dell'acqua estratta dai pozzi, da una inconsulta utilizzazione delle falde di acqua dolce, in contatto con l'acqua del mare, e nello stesso tempo suggerisce i mezzi idonei ad evitare tali danni, con particolare riferimento ai pozzi finora eseguiti nella penisola Salentina.

## Sulla resistenza alla penetrazione dell'ago di Proctor

Ben nota a tutti gli ingegneri che si occupano della formazione di rilevati o della costruzione di strade ed aeroporti è la prova, ideata da R. R. PROCTOR, per misurare la resistenza di un terreno costipato (o come alcuni dicono «compattato») con un certo contenuto di acqua. Verso il 1930, quando PROCTOR nel corso di studi e lavori per la costruzione di dighe di terra negli Stati Uniti d'America effettuò le prime determinazioni del genere, le conoscenze sul comportamento delle rocce sciolte in regime plastico erano del tutto embrionali ed, al tempo stesso, la relativa tecnica sperimentale era ancora ai primi passi.

PROCTOR, nell'ideare la prova, fu spinto dalla necessità di rispondere, sia pure empiricamente, a due precise domande. Innanzi tutto occorre stabilire se un determinato terreno fosse idoneo per la costruzione di una diga di terra, tenendo presente il metodo di costruzione, che a quell'epoca si andava affermando, del rullaggio con mezzi di cantiere pesanti. Evidentemente per rispondere a tale quesito occorreva determinare, anche se per via empirica, la capacità del terreno di resistere agli sforzi esterni.

Avendo in secondo luogo osservato che, adottando un determinato mezzo di costipamento, il risultato dipendeva dal contenuto di acqua con il quale si effettuava il costipamento medesimo, sorgera il problema di controllare quotidianamente e si può dire ora per ora il

valore del contenuto di acqua con il quale il terreno veniva posto in opera.

Questi due problemi — l'uno fondamentale nella progettazione di una diga di terra e più in generale di manufatti di terra di qualunque tipo, l'altro di grande importanza pratica all'atto della costruzione — si presentano ovviamente ancora oggi. Molti progressi però sono stati compiuti dall'epoca in cui PROCTOR ideò la sua prova di penetrazione.

In quanto alla determinazione della resistenza di un dato terreno, costipato con certe modalità e con un dato contenuto di acqua, si può dire che la prova di PROCTOR sia completamente superata. Ci si avvale oggi di indagini, che, se ancora lasciano in ombra molti punti di un problema che è senza dubbio fra i più complessi della Geotecnica, consentono tuttavia una visione molto più chiara del problema.

Anche sull'argomento della rapida determinazione del contenuto di acqua di un terreno sono state svolte molte ricerche ed ideati svariati metodi di misura. Tuttavia, da questo punto di vista, la prova di penetrazione con l'ago di PROCTOR trova ancora utile applicazione. La sua adozione presuppone che esista, per un dato terreno costipato con un certo mezzo, una corrispondenza ben determinata fra valore della resistenza alla

penetrazione e contenuto di acqua di costipamento. Questo presupposto si è effettivamente verificato? In generale si ritiene di sì.

Basta però riflettere un momento sul significato del termine «resistenza alla penetrazione» perché subito affiori qualche dubbio. Si può ammettere che tale resistenza sia indipendente dalla forma e dalle dimensioni dell'ago, quando invece per un problema analogo, sebbene non esattamente paragonabile — quello del carico limite dei terreni di fondazione — teoria ed esperienza dimostrano che una tale dipendenza esiste? Si può ammettere che il tempo e perciò la velocità con la quale si effettua la prova non debbano essere considerati nel definire la resistenza alla penetrazione?

Questi ed altri aspetti del problema sono stati affrontati dall'Ing. Giovanni SARIO sul piano sperimentale attraverso un'indagine — illustrata nella nota che pubblichiamo — sufficientemente estesa perché se ne possa trarre una più chiara visione dell'andamento del fenomeno che si produce durante una prova di penetrazione e perché altresì sia lecito dare alcune indicazioni sulle modalità di esecuzione della prova, che occorre siano rispettate per ottenere risultati attendibili.

## L'INGEGNERE

RIVISTA TECNICA MENSILE

Direttore: MARIO PANTALEO

*Organo Ufficiale dell'Associazione Nazionale Ingegneri e Architetti Italiani (A. N. I. A. I.) — La Rivista a cui lo Stato ha concesso il maggior contributo assegnato alla stampa*

## IL CALORE

RIVISTA TECNICA MENSILE

Direttore: FRANCESCO ROMA

*Organo Ufficiale dell'Associazione Nazionale per il Controllo della Combustione (A. N. C. C.)*

## INGEGNERIA SANITARIA

RIVISTA TECNICA BIMESTRALE

Direttore: GIROLAMO IPPOLITO

*Organo dell'Associazione Nazionale di Ingegneria Sanitaria*

EDIZIONI



MILANO

ISTITUTO PROPAGANDA INTERNAZIONALE: Via Tadino 62. MILANO - Telef. 278.130; 222.855

FILIALE DI ROMA - VIA CIVININI 37, TEL. 878.816

# INFLUENZA DELL'ACQUA MARINA SULLE FALDE ACQUIFERE IN ZONE COSTIERE, CON PARTICOLARE RIFERIMENTO ALLE RICERCHE D'ACQUA SOTTERRANEA IN PUGLIA

VINCENZO COTECCHIA (\*)

**SOMMARIO:** Nella prima parte di questo studio l'A. illustra i fondamenti geoidrologici ed idraulici del fenomeno, fissando i limiti entro i quali può ritenersi valida la teoria di GHYBEN ed HERZBERG. Successivamente egli tratta degli aspetti generali del pompaggio da pozzi che interessano i « sistemi a due fluidi » e dei conseguenti spostamenti subiti dalla superficie di separazione dell'acqua dolce, dall'acqua del mare (« interfaccia »).

Nella seconda parte l'A., dopo una breve e sintetica descrizione geologica ed idrogeologica della Terra di Bari e della penisola Salentina, tratta della geochimica delle acque sotterranee contenute nel sottosuolo pugliese. Quindi egli mostra come le osservazioni di carattere teorico, svolte nella prima parte, si addicano alle ricerche in corso, inerenti alla utilizzazione della « falda profonda » contenuta nelle formazioni calcaree fessurate della Puglia.

Nelle conclusioni egli stabilisce infine gli orientamenti e i criteri che è necessario seguire nel completamento di dette ricerche.

## Premessa

Allo scopo di valorizzare l'economia agraria di talune regioni dell'Italia meridionale, l'Ente per lo sviluppo dell'Irrigazione e la Trasformazione Fondiaria in Puglia e Lucania ha affrontato da alcuni anni il problema della captazione, a mezzo di pozzi, delle acque sotterranee a scopo irriguo nelle zone di sua competenza, ove scarseggiano o mancano del tutto corsi d'acqua con portate fluenti nella stagione primaverile-estiva. In relazione a tale problema, fin dall'inizio della sua attività, detto Ente ha promosso ed eseguito in Puglia una vasta campagna di ricerche, attraverso la perforazione di 153 pozzi, in buona parte a distanze di pochi km dalla costa (1).

Prospettive non sempre favorevoli sono emerse nei riguardi della qualità delle acque di falda rinvenute. Le acque dolci, circolanti nei calcari cretaci della regione, galleggiano sull'acqua di mare che invade gli strati inferiori della formazione rocciosa. D'altra parte, se al fenomeno essenzialmente statico, dipendente dalla differenza di densità tra acqua dolce ed acqua marina, si somma l'aspetto dinamico, determinato dal defluire della falda verso il mare e dall'emungimento attraverso pozzi, nonchè gli effetti di equilibrio chimico, conseguenti al mescolamento di soluzioni saline diverse ed allo scambio ionico con le rocce a contatto, si avrà una idea della complessità del fenomeno da

tenere in conto, nello stabilire le modalità di attingimento alla falda di acqua dolce, se si vuol evitare la captazione di acque salmastre.

Oltre ai 153 pozzi dianzi menzionati, sono stati già eseguiti, a cura dello stesso Ente Irrigazione e nelle zone stesse di ricerca, altri 100 pozzi per conto della Sezione Riforma Fondiaria e molti altri per privati. Mentre i primi 153 pozzi sono però, allo stato attuale, chiusi in attesa che abbia termine la fase di ricerca, le acque dei pozzi eseguiti per conto di terzi sono state in parte già immesse al consumo.

Pertanto, in considerazione del fatto che, in determinate circostanze, l'emungimento da numerosi pozzi in una stessa zona ha già avuto inizio, prima che gli studi e ricerche avessero termine, e in rapporto al vasto programma di utilizzazione irrigua che si intende attuare in futuro, chi scrive prospetta, nel presente lavoro, gli aspetti generali del fenomeno della penetrazione di acqua marina nei pozzi, in relazione a quanto è possibile trarre dagli elementi emersi dalle ricerche fino ad ora eseguite e in vista dei gravi danni che possono derivare dalla utilizzazione incondizionata e inconsulta della falda acquifera contenuta nei calcari.

Fenomeni analoghi a quello di cui si ha riscontro in Puglia sono stati esaminati e descritti da molti autori, relativamente a varie altre regioni europee ed extra-europee (2). Nelle regioni costiere dell'Africa sud-occidentale ed orientale, della California, della Florida,

(\*) Dott. Ing. Vincenzo COTECCHIA, Professore Incaricato di Geologia Applicata nell'Università di Bari.

(1) Un'ampia bibliografia sull'argomento è contenuta nell'opera [2], edita a cura dell'Unesco.

dell'Australia, del Pakistan, dello Stato d'Israele, dell'India, nelle isole Hawaii e sulle coste dell'Olanda e del Belgio sono stati osservati fenomeni di penetrazione di acque marine vere e proprie nei pozzi, dei quali spesso si è imposto l'abbandono progressivo, con notevoli danni derivati all'economia di intere zone costiere.

Malgrado però la diffusione di tale fenomeno, di esso non esiste, dal punto di vista scientifico, una trattazione esauriente che consenta in ogni caso la facile e rapida risoluzione di problemi del genere. Ciò è certamente dovuto alla molteplicità dei fattori che intervengono nel fenomeno stesso, dei quali è oltremodo difficile tener conto in una impostazione matematica del problema.

Nel presente lavoro, trattando degli aspetti generali del fenomeno, saranno riassunte ed illustrate alcune fra le più interessanti osservazioni condotte altrove in casi analoghi. Verranno quindi svolte alcune importanti considerazioni di carattere geoidrologico e geochimico sulle acque sotterranee rinvenute in Puglia e sui primi orientamenti da seguire nella utilizzazione di esse.

Solo sulla base di tali considerazioni sarà possibile stabilire un piano concreto di accertamenti da svolgere sui pozzi di ricerca eseguiti, allo scopo di definire in misura concreta la potenzialità della falda in studio e le modalità secondo le quali converrà procedere allo sfruttamento di essa.

## I fondamenti idraulici e geoidrologici del fenomeno

### Validità della teoria di Ghyben ed Herzberg.

Questa teoria, brevemente esposta nella gran parte dei testi che si occupano di Idrogeologia [3], [4], [5], [6], riguarda particolarmente talune condizioni di equilibrio in cui viene a trovarsi una falda freatica in un'isola o penisola, ovvero in zone costiere geologicamente costituite da rocce permeabili — per porosità o per fessurazione — fino a profondità inferiori al livello medio marino.

Gli studi e gli esperimenti relativi a tale problema furono condotti da Badon GHYBEN e da A. HERZBERG fra il 1890 e il 1900. Di essi il primo svolse le sue osservazioni su pozzi esistenti in talune zone costiere dell'Olanda, il secondo su pozzi eseguiti nell'isola di Norderne (Frisona Orientale) a Nord della Germania, giungendo entrambi alle stesse conclusioni.

Dove la costa è formata da rocce permeabili e la falda acquifera, alimentata dalle acque piovane, si rinviene a quota di poco superiore al livello medio marino, l'acqua dolce scorre generalmente verso il mare e in prossimità della spiaggia si mescola all'acqua marina. Questa, in conseguenza della permeabilità delle rocce del continente, si rinviene entroterra alla base della falda freatica, a profondità sempre maggiori sotto il livello medio marino, via via che ci si allontana dalla linea di spiaggia, di talchè l'acqua dolce, in virtù della sua densità, inferiore a quella del mare, flotta sull'acqua marina sotterranea, attraverso una superficie di contatto la cui giacitura è funzione, in ogni punto, della differenza di densità fra i due tipi di acque e della quota della falda freatica sul livello medio marino (fig. 1).

Perchè sia soddisfatto l'equilibrio idrostatico, una colonna  $H$  di acqua dolce, la cui densità si assume per semplicità uguale esattamente ad 1, è bilanciata da una colonna  $h$  di acqua marina, la cui densità sia  $\rho_s$ , se sussiste:

$$H \times 1 = h \rho_s$$

Essendo  $H - h = t$  la quota della falda sul livello medio marino, si deduce:

$$h = \frac{t}{\rho_s - 1} \quad (1)$$

HERZBERG, assegnando al Mare del Nord la densità  $\rho_s = 1,027$ , ottiene  $h = 37 t$ . BROWN e PARKER [7], assumendo per il mare della Florida  $\rho_s = 1,025$ , ottengono  $h = 40t$ . SENSIDONI [8] [9], per alcune regioni costiere

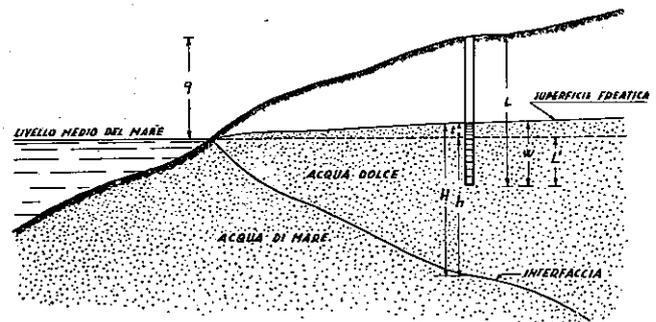


Fig. 1 - Falda freatica in una formazione permeabile costiera invasa dall'acqua del mare. Nella realtà dei casi risulta generalmente  $h = 32-40 t$ .

della Libia e della Puglia, giunge a valori di  $h$  di gran lunga inferiori a quelli ora detti.

Invero, come si dirà in seguito, da analisi chimiche eseguite su alcuni campioni di acqua di mare prelevati a distanza di qualche km dai litorali adriatico e jonico della Puglia, le concentrazioni dello ione Cl risultano mediamente uguali a 21,25 g/l, per il mare Adriatico, ed a 21,75 g/l per il mare Jonico, di talchè le clorinità Cl (\*) di detti mari risultano rispettivamente eguali a 20,64 e 21,18 g/kg. Applicando la nota formula di KNUDSEN [10] che dà la densità  $\rho_s$  a  $0^\circ$  in funzione della clorinità:

$$\rho_s = 1 + (-0,069 + 1,4708 Cl - 0,00157 Cl^2 + 0,0000398 Cl^3)/1000 .$$

(\*) Si definisce clorinità il numero di grammi di alogeni (Cl, Br, J) che sono precipitati dal nitrato di argento in 1 kg di acqua marina, quando gli alogeni siano considerati come cloruri. La concentrazione così definita è espressa in millesimi di peso. Per avere la effettiva quantità di cloro, in g/kg, la clorinità va moltiplicata per 0,9985. La rimanente parte rappresenta bromo e jodio [10].

si ottiene per l'Adriatico  $\rho_s = 1,0299 \text{ kg/l}$  e per lo Jonio  $\rho_s = 1,0307 \text{ kg/l}$ .

A tali densità corrispondono rispettivamente valori di  $h$  eguali all'incirca a  $32 \div 33 \text{ t}$ .

Proseguendo nella discussione della teoria di GHYBEN ed HERZBERG, la maggior parte degli studiosi è concorde nel ritenere che il pompaggio dell'acqua dolce, galleggiante sull'acqua del mare, provochi un sollevamento della superficie di separazione, fra acqua dolce

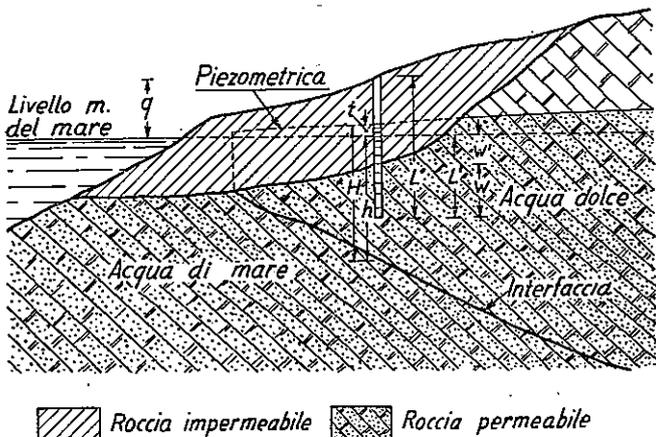


Fig. 2 - Falda in pressione in una formazione permeabile costiera invasa dall'acqua del mare. La figura si riferisce al caso in cui la scomparsa dei terreni permeabili, in un tratto di costa, sotto terreni più recenti di natura impermeabile impedisca il normale deflusso della falda in direzione del mare, costringendo l'acqua dolce ad aggirare lo sbarramento rappresentato dai terreni impermeabili e a riversarsi ai margini di questi, direttamente nel mare a quota zero. Il tratto di piezometrica rappresenta la traccia, nel piano della figura, della superficie piezometrica relativa alla falda d'acqua dolce in movimento.

ed acqua salata, tanto maggiore quanto più elevata risulta la depressione della superficie libera della falda prodotta dal pompaggio. Detta superficie di separazione — che per semplicità d'ora in poi chiameremo «interfaccia» — si deformerebbe a forma di cono (\*), con l'asse in direzione del pozzo e col vertice verso l'alto. Molti studiosi ritengono anzi — erroneamente, come dimostreremo — che il sollevamento massimo di tale vertice stia al valore della depressione della falda, in corrispondenza del pozzo, nel rapporto  $h:t$ , cosicché, se la superficie libera della falda si deprime fino a raggiungere il livello medio marino, anche l'acqua salata sotterranea raggiunge tale livello. D'altra parte l'acqua marina verrebbe pompata solo allorché il «cono d'intrusione» si solleva fino a raggiungere il fondo del pozzo.

Effettivamente gli aspetti del fenomeno esposti da GHYBEN ed HERZBERG risultano, in linea formale, confermati largamente dall'esperienza. In Olanda, a distanza di molti km dalla costa, è stata rinvenuta acqua marina a profondità di oltre 200 m sotto il livello medio marino e il fenomeno è stato ivi studiato atten-

(\*) Questo cono d'acqua salata sposta e penetra quindi nella falda di acqua dolce soprastante e, pertanto, ad esso si addice la denominazione di «cono d'intrusione».

tamente, onde quasi ovunque è stato possibile accertare che, in corrispondenza della «interfaccia», la zona di diffusione fra l'acqua dolce e l'acqua salata ha uno spessore di 20 m.

Uguale conferma ha trovato il fenomeno attraverso le ricerche condotte da PENNINK in Belgio [11] e da S. BROWN a New Haven Harbour, nel Connecticut [7].

Anche in Puglia, come sarà mostrato in seguito, le ricerche eseguite negli ultimi anni comprovano, in linea generale, il fondamento statico della legge esposta. La validità di questa legge risulta altresì confermata in quei casi — molto frequenti nella regione — in cui la roccia permeabile si rinviene a profondità inferiori al livello medio marino, ricoperta da terreni più recenti, di natura impermeabile, di talché la falda di acqua dolce, racchiusa fra le rocce impermeabili di copertura e l'acqua marina che invade la roccia di base, è costretta a defluire in pressione verso il mare (fig. 2).

La formula di GHYBEN ed HERZBERG, che dà  $h$  in funzione di  $t$ , non tiene però conto delle condizioni dinamiche che si stabiliscono allorché si inizia il pompaggio da un pozzo, il che risulta di importanza pratica fondamentale nello studio del fenomeno.

In verità, fatta eccezione per le irregolarità causate talora da forti variazioni di permeabilità — ad esempio, per la presenza di cavità carsiche — in prossimità della «interfaccia», il lento movimento della falda di acqua dolce verso il mare consente il mantenimento delle condizioni di equilibrio statico determinate dalla differenza di densità esistente fra l'acqua dolce e quella salata. Il pompaggio attraverso uno o più pozzi influisce invece notevolmente su tale equilibrio, ed in maniera molto più complessa di quanto sia espresso dal semplice equilibrio statico. Moltissimi sono infatti i pozzi eseguiti in Puglia, dai quali, contrariamente a quanto espresso dalla legge di HERZBERG, si riesce a prelevare acqua dolce in forti quantità, abbassando notevolmente l'altezza piezometrica della falda sotto il livello medio marino. E' da segnalare però, in proposito, che tali pozzi sono stati fino ad ora sottoposti all'emungimento uno per volta e per un periodo di tempo massimo limitato a qualche giorno.

Ad ogni modo, a base di qualsiasi studio sull'argomento, sta il fatto che gli spostamenti in altezza della «interfaccia», dovuti all'equilibrio statico di essa, avvengono con estrema lentezza, talora con ritardi dell'ordine di molti mesi sulle variazioni avvenute nel livello della superficie libera, ovvero della «superficie piezometrica» della falda. Gli effetti dinamici del pompaggio da uno o più pozzi avvengono invece dopo un tempo relativamente breve; essi, contrariamente agli effetti dipendenti dalle variazioni di equilibrio statico, che investono generalmente intere regioni, assumono, dal punto di vista idraulico, un carattere locale e, pertanto, vanno guardati alla luce delle leggi idrodinamiche riguardanti il pompaggio da pozzi attingenti a «sistemi a due fluidi».

L'applicazione diretta di queste leggi al problema in esame presenta però non poche difficoltà di carattere matematico, che rendono il problema stesso oltremodo laborioso. Tuttavia è possibile discutere utilmente l'argomento da un punto di vista generale, applicando ad esso alcuni concetti fondamentali, dedotti dallo

studio idraulico di taluni schemi piuttosto semplici di « sistemi a due fluidi », i quali servono fondamentalmente a chiarire gli aspetti qualitativi e pratici del fenomeno in studio.

*Aspetti generali del pompaggio da pozzi che interessano i « sistemi a due fluidi ».*

Per qualsiasi trattazione dell'argomento sono di importanza fondamentale gli studi eseguiti da MUSKAT e WYCKOFF, della Gulf Research Development Corporation (Pittsburgh), circa le azioni reciproche esercitate dall'acqua salata e dal petrolio in giacimenti petroliferi, durante le operazioni di estrazione per mezzo di pozzi. Tali studi, raccolti in una pregevole opera del MUSKAT sul movimento dei fluidi omogenei attraverso mezzi porosi [12], costituiscono quanto di più esauriente sia stato scritto fino ad oggi sull'argomento.

E' noto che, per la maggior densità, l'acqua salata, che di solito accompagna un orizzonte petrolifero, soggiace all'olio, onde essa crea, agli effetti idrodinamici, una situazione analoga a quella relativa al sistema acqua dolce-acqua salata. La trattazione del MUSKAT offre, pertanto, ottimi spunti per lo studio delle intrusioni di acqua salata nelle falde di acqua dolce del continente. Essa prende però in esame mezzi porosi omogenei, dotati cioè di permeabilità uniforme, i quali ben si prestano ad una trattazione matematica. I calcari cretaci della Puglia rappresentano invece, come vedremo, un mezzo fessurato permeabile per percolazione e in maniera spesso non uniforme, onde è possibile applicare ad essi unicamente i concetti e criteri di indole generale, tratti dallo studio rigoroso di alcuni casi particolari, sulla base dei quali è utile procedere, per casi più complessi, ad esperienze di carattere pratico.

Nel problema in studio è bene innanzi tutto distinguere l'influenza prevalentemente « laterale » del mare sulla falda di acqua dolce dalla influenza cosiddetta « dal fondo ». Sulla prima influiscono, più che sulla seconda, le condizioni geologiche locali (porosità eccessiva della roccia, presenza di larghe fratture o cavità, ecc.) e la estrema vicinanza alla linea di spiaggia. L'influenza « dal fondo » rappresenta invece l'inconveniente più frequente. Infatti, data la bassa cadente piezometrica con la quale la falda carsica scorre nei calcari della Puglia (mediamente 1‰), la « interfaccia » si rinviene, in condizioni di equilibrio statico, mediamente ad una profondità equivalente a circa 1/30 della distanza dalla linea di spiaggia, il che denota la maggiore importanza che, salvo casi eccezionali, riveste la influenza « dal fondo » nei confronti della influenza « laterale » nella utilizzazione dei pozzi.

Facendo quindi riferimento al problema dell'influenza « dal fondo » ed al caso generale di una falda in pressione, interessata da un pozzo « parzialmente penetrante », in fig. 3 è schematizzata la sezione del « cono di intrusione » di acqua salata avente sede, al di sotto della falda d'acqua dolce, in una formazione sabbiosa omogenea.

Il processo attraverso il quale il « cono d'intrusione » di acqua salata, in determinate condizioni, irrompe nella falda acquifera soprastante e dà luogo all'ascesa di acque salse nel pozzo costituisce un problema il cui esame teorico riesce pressochè impossibile. Tuttavia

appare possibile una trattazione analitica del « cono d'intrusione » che si stabilisce prima che l'acqua salata irrompa attraverso l'acqua dolce, il che interessa moltissimo se si tien conto che, nella pratica, si tratta proprio di evitare tale irruzione, allo scopo di attingere acqua esclusivamente dolce. Tale stato di cose implica, ovviamente, che l'acqua salata di fondo assuma una posizione di equilibrio statico, la quale comporta in un punto  $P$  di coordinate  $r$  e  $z$  della « interfaccia »:

$$p(r, z) + \rho_s g(a - z) = P_b$$

ovvero:

$$p(r, z) + \rho_s gy = P_b, \quad (2)$$

dove  $p(r, z)$  rappresenta la pressione acqua dolce-acqua salata nel punto  $P(r, z)$ ,  $\rho_s$  la densità dell'acqua salata,  $g$  l'accelerazione di gravità,  $a$  la potenza della falda di acqua dolce e  $P_b$  la pressione cui è sottoposta la falda, misurata alla base di essa e in un punto sufficientemente distante dal pozzo.

Fisicamente ciò vuol dire che, se le condizioni di flusso nella zona di acqua dolce creano in un punto

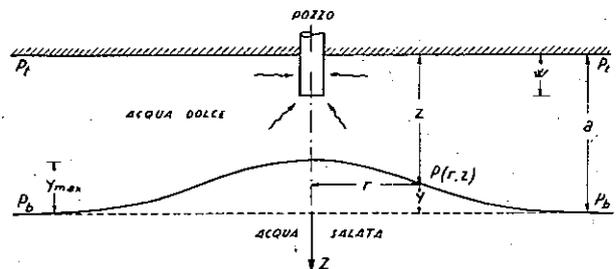


Fig. 3 - « Cono d'intrusione » di acqua salata prodotto dalle condizioni di funzionamento di un pozzo.

$P(r, z)$  una diminuzione di pressione — rispetto allo stato di quiete — esattamente eguale al carico idrostatico differenziale  $gy(\rho_s - \rho_d)$ , ove  $\rho_d$  rappresenta la densità dell'acqua dolce, una colonna di acqua salata sollevatasi fino a quel punto sarà in equilibrio statico. Inoltre, perchè sussistano effettive condizioni di equilibrio dinamico fra l'acqua dolce e l'acqua salata, occorre che la traccia della « interfaccia » coincida con la linea di corrente limite della falda di acqua dolce.

La stabilità del « cono d'intrusione » di acqua salata è determinata naturalmente dalla entità dei gradienti di pressione nelle immediate vicinanze della « interfaccia », la qual cosa dimostra che detto « cono » può risultare stabile solo sotto circostanziate condizioni di flusso nella zona d'acqua dolce. Ogni particella d'acqua salata prossima alla « interfaccia » è, infatti, spinta verso l'alto dal gradiente di pressione

$\frac{\partial p}{\partial y}$  relativo all'acqua dolce immediatamente adiacente. Essendo il flusso d'acqua dolce convergente verso il pozzo, tale gradiente, preso in valore assoluto, aumenta rapidamente in prossimità di questo nella maniera indicata da MUSKAT e WYCKOFF [13] con la curva A del diagramma di figura 4. Nella zona dell'acqua salata

esiste invece un gradiente di pressione verticale costante — negativo, se le  $y$  si misurano a partire dalla base della falda di acqua dolce verso l'alto — dovuto all'accelerazione di gravità, e rappresentato in figura dalla retta B. E' evidente quindi che, oltre l'altezza indicata con  $y_{max}$ , alla quale il gradiente di pressione  $\frac{\partial p}{\partial y}$  nella falda di acqua dolce risulta eguale all'opposta forza di gravità  $\rho_s g$ , agente sull'acqua salata, nessun « cono d'intrusione » risulta stabile, onde un leggero aumento di altezza del « cono » in questo punto si risolve nell'irruzione dell'acqua salata verso il fondo del pozzo.

Tali condizioni, espresse sotto altra forma, vogliono cioè dire che, se per soddisfare la equazione (2) l'acqua salata è portata a sollevarsi al di sopra di  $y_{max}$ , ove i gradienti di pressione superano il peso specifico dell'acqua salata stessa, non possono sussistere condizioni di equilibrio statico per alcun « cono », onde l'acqua salata di fondo irrompe nella falda di

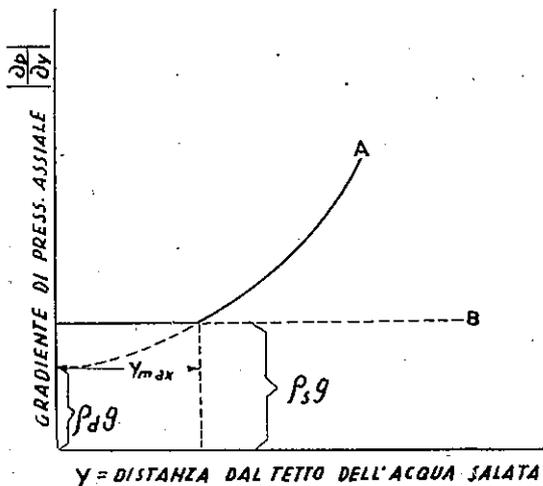


Fig. 4 - Gradienti di pressione assiale, presi in valore assoluto, in funzione della distanza dal tetto dell'acqua salata e in condizioni di stabilità del « cono d'intrusione ». Il diagramma mostra come aumentano i gradienti di pressione in prossimità del fondo del pozzo.

(da MUSKAT e WYCKOFF)

acqua dolce. Ciò avviene naturalmente quando, per l'eccessivo emungimento dal pozzo, vengono a ridursi fortemente le pressioni  $p(r, z)$  nella zona di acqua dolce.

Un'effettiva conferma del fenomeno ha potuto avere lo scrivente attraverso una facilissima esperienza di laboratorio, eseguita su un sistema costituito da soluzione acquosa di fluoresceina-olio di vasellina. Per mezzo di una pipetta e di una pompa a vuoto è stato possibile aspirare l'olio di vasellina, mantenendo il fondo della pipetta sufficientemente distante dalla superficie di separazione fra la soluzione colorata e l'olio soprastante. Così si è avuto modo di notare chiaramente, attraverso il vetro del recipiente contenente il detto sistema a due fluidi, il « cono d'intrusione » e il suo modo di deformarsi, con l'aumentare della portata d'olio aspirata, fino all'improvvisa irruzione della soluzione di fluoresceina nell'olio e quindi nella pipetta. Trattandosi però, nel caso dell'olio, di un liquido molto

viscoso, intervengono molte resistenze a creare notevoli gradienti di pressione.

La stabilità del cono dipende quindi, in ogni caso, dalla portata d'acqua prelevata dal pozzo: ciò che agli effetti pratici interessa pertanto conoscere è il *maximum* di portata di acqua dolce che è possibile prelevare in condizioni di stabilità per il « cono ». A tale *maximum* di portata corrisponde quello che si dice il « cono critico ».

Dalla equazione (2), assegnato  $P_b$  e assegnato  $z$ , si ottiene il valore  $p(r, z)$ . Il fatto che la « interfaccia » debba poi coincidere con la linea di corrente limite inferiore della falda di acqua dolce consente, una volta noto il regime idraulico stabilitosi in questa zona, di conoscere la distanza  $r$  alla quale corrisponde, per il valore di  $z$  assegnato, la pressione  $p(r, z)$  ottenuta dalla equazione [2], il che, ripetuto per vari punti, dà modo di tracciare la « interfaccia ».

Il MUSKAT, nel risolvere questo problema, si serve di una approssimazione da lui ritenuta abbastanza attendibile, e cioè considera la distribuzione delle pressioni nella zona dell'acqua dolce sovrastante al « cono d'intrusione » la stessa che si avrebbe se detto cono mancasse e la superficie di base della falda fosse perfettamente orizzontale. Con tale procedimento egli riesce ad ottenere, dopo laboriosi calcoli e per taluni schemi assegnati di giacimenti petroliferi in « rocce magazzino » porose ed omogenee, racchiuse entro forme a simmetria radiale o sferica, i valori della « depressione critica », equivalente alla caduta di pressione dal margine del serbatoio al pozzo, in corrispondenza del tetto del giacimento. Ciò equivarrebbe, nel caso si trattasse di una falda di acqua dolce sovrastante all'acqua marina, a determinare le « depressioni critiche », valutate in atmosfere anziché in m, corrispondenti al *maximum* di produzione di acqua dolce, ottenuta senza l'ascesa simultanea nel pozzo dell'acqua salata di fondo.

Naturalmente la risoluzione del problema sta principalmente nell'analisi teoretica delle condizioni idrodinamiche relative ad una falda in pressione, interessata da un pozzo parzialmente penetrante. Tale argomento è trattato ampiamente nella già citata opera del MUSKAT [12], relativamente ai mezzi porosi omogenei; l'analisi teoretica dei mezzi permeabili per fessurazione, nell'ipotesi che si tratti di fessure che consentano un moto viscoso, potrebbe svolgersi solo riducendosi a schemi oltremodo semplici, i quali presenterebbero indubbiamente scarso interesse pratico in confronto ai complessi sistemi di fessurazioni delle formazioni calcaree della Puglia.

A questo punto occorre precisare che qualsiasi parallelo fra le modalità relative a sistemi permeabili rispettivamente per filtrazione e per fessurazione vale unicamente quando, nel caso ultimo, si tratti di sistemi interessati da una rete uniformemente diffusa di fratture, le quali danno un effetto risultante equivalente pressappoco ad un mezzo ghiaioso-sabbioso. E' questo, come vedremo, il caso più diffuso in cui vengono effettivamente a trovarsi le formazioni mesozoiche della regione pugliese, anche se esse vanno da taluni definite, troppo comunemente e senza distinzione di sorta, come formazioni carsiche.

Tuttavia, alcuni concetti di fondamentale importanza, valevoli nella generalità dei casi, possono trarsi

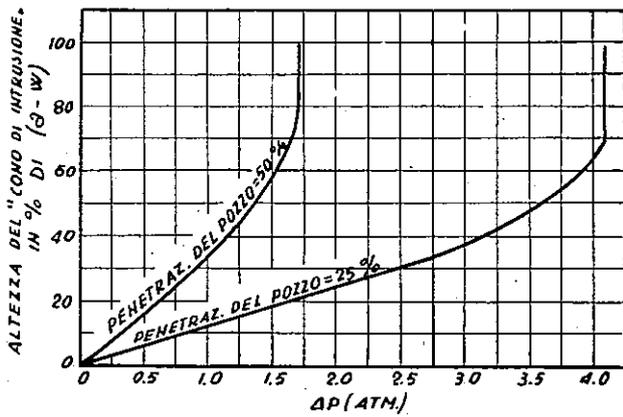


Fig. 5 - Variazioni di altezza del «cono d'intrusione» di acqua salata in funzione delle depressioni  $\Delta P$  misurate dal margine del serbatoio al pozzo, in corrispondenza del tetto della «roccia serbatoio». Le penetrazioni del pozzo sono indicate in % dello spessore dello strato d'olio  $a$ . I tratti verticali rappresentano altezze di «coni instabili».

La figura si riferisce al caso di un giacimento d'olio, con acqua salata sottostante, avente lo spessore  $a = 125$  ft (equivalenti a circa 38 m), raggiunto da un pozzo di raggio  $r = 1/4$  ft (76 mm). La riserva è cilindrica, con raggio periferico  $r = 500$  ft (equivalenti a circa 152 m). La differenza di densità acqua salata-olio è  $\Delta \rho = 0,3$  g/cm<sup>3</sup>.

(da MUSKAT)

dall'osservazione di alcuni diagrammi ottenuti dal MUSKAT per il sistema acqua salata-olio. Tali diagrammi, costruiti con differenza di densità  $\Delta \rho = 0,3$  g/cm<sup>3</sup>, si riferiscono ad uno schema molto semplice di riserva cilindrica, avente un raggio periferico  $r_c = 500$  ft

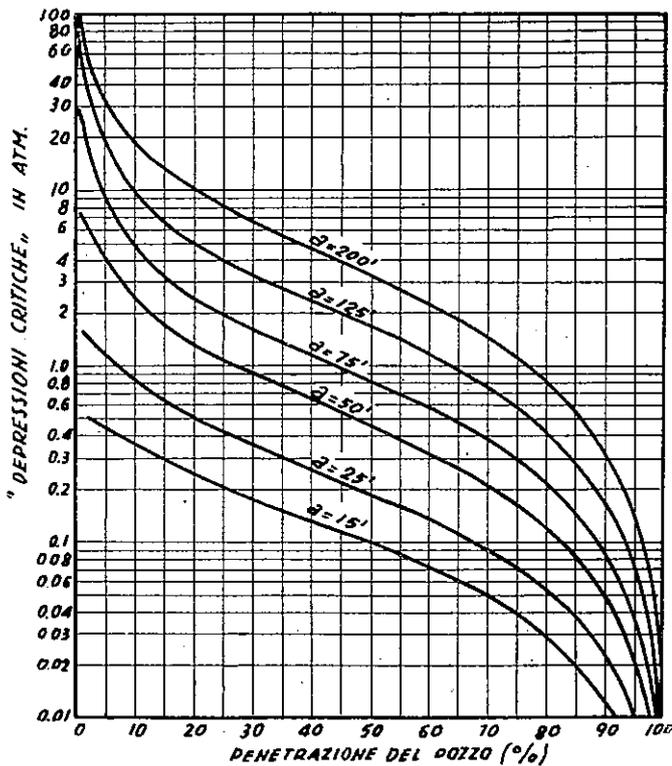


Fig. 6 - Massime cadute di pressione che consentono «coni d'intrusione» stabili («depressioni critiche») in funzione della penetrazione del pozzo e dello spessore  $a$  dello strato d'olio. Le condizioni cui si riferisce la figura sono le stesse della figura precedente. Lo spessore dello strato d'olio è indicato in piedi.

(da MUSKAT)

(equivalenti a circa 152 m) e forata da un pozzo di raggio  $r_w = 1/4$  ft. La zona dell'olio, che nel sistema acqua salata-acqua dolce sostituisce l'acqua dolce, ha uno spessore di 125 ft (equivalenti a 38 m circa).

La figura 5 mostra infatti la variazione dell'altezza  $y$  del «cono d'intrusione», in funzione della caduta di pressione  $\Delta P$  al vertice della formazione porosa. La variazione d'altezza  $y$  è valutata, lungo l'asse del pozzo, in % della distanza  $(a-w)$  che corre dal fondo del pozzo alla superficie di base della zona dell'olio (vedi fig. 3); la penetrazione del pozzo è indicata in % dello spessore della zona d'olio; la caduta di pressione è definita per semplicità «depressione».

Con tali indicazioni, le curve tracciate nella predetta figura indicano che, al di sopra dell'altezza critica, corrispondente mediamente al 65% di  $(a-w)$ , non esistono «coni d'intrusione» fisicamente stabili e che i valori critici  $\Delta P$  raggiungono valori inferiori a 4 atm, per pozzi con penetrazione dal 25% in su. Ulteriori studi del MUSKAT hanno inoltre accertato che, per pozzi non penetranti, la caduta di pressione critica raggiunge invece valori dell'ordine delle centinaia di atm, e ciò in conseguenza della grande concentrazione dei gradienti massimi di pressione nei pressi del fondo del pozzo, quando questo appena tocca il tetto della formazione porosa.

I diagrammi di figura 6 offrono a loro volta una visione ben chiara del modo di variare delle «depressioni critiche»  $\Delta P$  in funzione di  $a$  — che nel sistema acqua salata-acqua dolce rappresenta la potenza della falda d'acqua dolce — e della penetrazione del pozzo. Dall'osservazione di tali diagrammi si nota quindi quanto sia rapido l'aumento di  $\Delta P$ , via via che la penetrazione del pozzo diminuisce, specie per formazioni porose piuttosto spesse. Inversamente  $\Delta P$  scende rapidamente verso valori bassissimi, quando la penetrazione si approssima al 100%, vale a dire cioè quando il fondo del pozzo si avvicina al tetto dell'acqua salata.

Enorme interesse presentano infine i diagrammi di figura 7, i quali danno le «portate critiche» in funzione della penetrazione del pozzo e dello spessore dello strato d'olio sovrastante all'acqua salata. Interpretando l'aspetto qualitativo di essi e riferendosi al caso di una falda di acqua dolce, giacente in pressione sull'acqua salata, tali diagrammi pongono in luce un particolare di estremo interesse, e cioè che i pozzi non penetranti consentono, nei confronti dei pozzi penetranti nella falda, le massime portate di acqua dolce senza che il «cono d'intrusione» dell'acqua marina faccia irruzione nel pozzo. L'osservazione di tutto l'insieme di curve, relative ai vari spessori  $a$  della falda, chiarisce altresì che il fattore determinante tale comportamento sta principalmente nella distanza che separa il fondo del pozzo dal tetto dell'acqua salata. E' importante notare inoltre che i pozzi aventi penetrazioni dell'ordine del 15-20% danno portate critiche pressappoco uguali a quelle corrispondenti a pozzi non penetranti, il che, dal punto di vista pratico, è molto importante, specie se si prendono in considerazione le formazioni rocciose permeabili per fessurazioni, nelle quali i pozzi devono necessariamente approfondirsi alcun poco nella formazione acquifera, allo scopo di rinvenire un numero sufficiente di fratture che consenta una conveniente utilizzazione dei pozzi stessi.

I dati analitici, dianzi riassunti, hanno trovato, ad opera del MUSKAT, ampia conferma attraverso opportuni esperimenti con modelli elettrici. Nella pratica, invece, frequentemente si ottengono risultati più ottimistici di quelli desunti dalla teoria, e ciò per la presenza di zone impermeabili che spesso interrompono la continuità del mezzo permeabile, nel quale ha sede il giacimento petrolifero, ovvero la falda acquifera.

Se un pozzo penetrante in una falda si attesta, infatti, col fondo in una lente di materiale impermeabile, è ovvio che questa impedisce all'acqua salata di fondo di dirigersi verso il pozzo. Ciò può accadere in vari casi: se il mezzo permeabile è costituito da sabbie, sarà facile rinvenire in esse inclusioni di natura argillosa (fig. 8a); se si tratta di un calcare fessurato, spesso accade che esso presenti delle zone più compatte, aventi permeabilità scarsissima o praticamente nulla (fig. 8b). Purtroppo in questi casi il problema non trova soluzioni analitiche possibili. Ad ogni modo esso, dal punto di vista qualitativo, appare ben definito e le sue soluzioni sono evidenti. E' chiaro, infatti che, in presenza di uno schermo impermeabile alla base del pozzo, nella zona sottostante allo schermo vengono a diminuire fortemente i gradienti di pressione; questi aumentano invece nella zona superiore allo schermo ed ai margini di esso, il che provoca un abbassamento di altezza del « cono intrusivo » di acqua salata, rispetto a quella corrispondente alla ipotesi di flusso attraverso un mezzo omogeneo. In conseguenza di ciò, a parità di penetrazione del pozzo, aumentano i valori delle « depressioni critiche » e le relative « portate critiche », con i notevoli vantaggi economici che da tale fatto derivano.

Con ciò si spiega pure facilmente come, in taluni casi, basta aumentare di una frazione piccolissima la penetrazione di un pozzo nella formazione acquifera perchè le condizioni idrodinamiche, prodotte dal funzionamento di esso, subiscano un vero e proprio salto, di cui certo non tengono conto le curve ad andamento continuo delle figure 5, 6, 7. E' pertanto importantissimo l'accertamento delle caratteristiche geologiche e petrografiche delle formazioni rocciose attraversate dal pozzo, lungo tutto lo sviluppo di esso, a mezzo del prelievo sistematico di campioni integri, durante le operazioni di sondaggio da svolgersi con carotaggio continuo. L'attraversamento completo di zone impermeabili, contenute nella formazione acquifera, implica spesso la brusca irruzione dell'acqua salata nel pozzo. In tale caso conviene, pertanto, ridurre la penetrazione del pozzo, cementando opportunamente il tratto di base ed arretrando quindi la perforazione al predetto schermo impermeabile.

Sul tempo necessario perchè, dopo l'irruzione dell'acqua salata nella falda di acqua dolce, si ritorni alle condizioni di equilibrio statico, preesistenti al funzionamento del pozzo, non risulta che siano state mai eseguite esperienze dirette. Ad ogni modo è certamente possibile ristabilire dette condizioni dopo un conveniente e relativamente breve periodo di riposo per il pozzo. Ciò che invece bisogna assolutamente cercare di evitare è il sollevamento della « interfaccia », prodotto su una vasta estensione, da un eccessivo abbassamento della superficie piezometrica della falda.

Il ritorno della « interfaccia » alla sua posizione primitiva avviene, in tal caso, dopo un lungo periodo di tempo, talora rappresentato da alcuni anni, nei quali occorre sospendere del tutto la utilizzazione dei pozzi della zona.

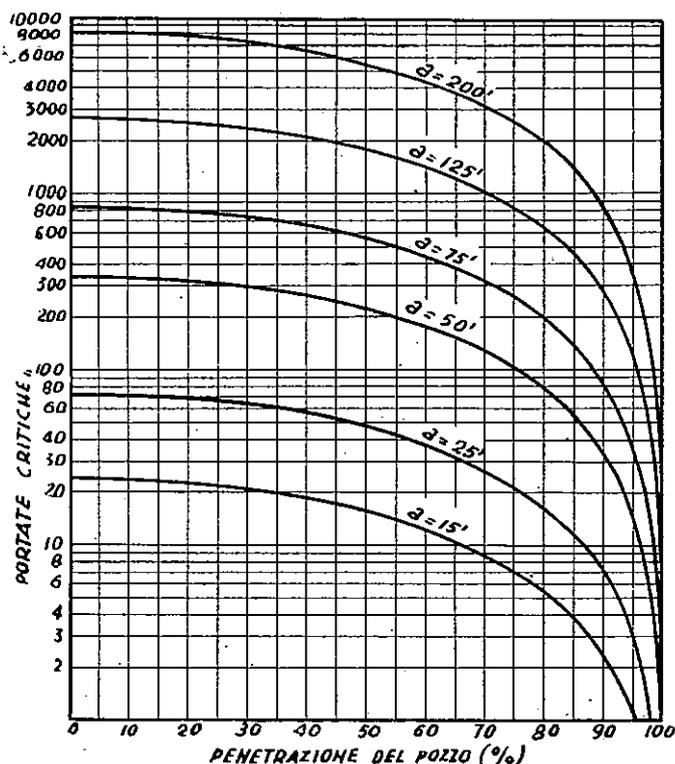


Fig. 7 - Portate massime compatibili con le condizioni di stabilità del « cono d'intrusione » (« portate critiche ») in funzione della penetrazione del pozzo e dello spessore dello strato d'olio. Le condizioni cui si riferisce la figura sono le stesse della fig. 5. (da MUSKAT)

Quanto si è detto nelle pagine precedenti, con riferimento ad una falda in pressione, è facilmente applicabile al caso di una falda freatica flottante su acqua di mare. In questo caso la superficie piezometrica della falda coincide ovviamente col pelo libero di essa e, pertanto, non va considerato il caso della utilizzazione della falda a mezzo di pozzi non penetranti.

#### Spostamenti della « interfaccia »

Nel quadro degli studi da svolgere al fine di stabilire convenientemente il piano di utilizzazione di una falda di acqua dolce flottante su acqua marina, è necessario ricercare le modalità secondo le quali si sposta nel tempo, sia in orizzontale che in verticale, la zona di contatto acqua dolce-acqua salata. Interessano a tal fine gli spostamenti di carattere stagionale, precedenti alla utilizzazione della falda; in un secondo tempo occorre invece predisporre una serie di attente misure, periodiche, atte ad accertare i mutamenti che avvengono in seguito all'uso dei pozzi.

Tali misure, eseguite con lo scopo precipuo di evitare, in qualsiasi tempo, una eccessiva invasione del continente da parte delle acque del mare ed assicurare nel

contempo un costante tributo stagionale di acqua dolce estratta dai pozzi, vanno perciò predisposte entro appositi «pozzi spia», distribuiti variamente nella regione in studio e penetranti totalmente la falda di acqua dolce, fino a raggiungerne il contatto con l'acqua marina di fondo. I risultati che emergono da dette misure vanno posti altresì in relazione con le caratteristiche litologiche, geoidrologiche e morfologiche della regione, con il regime delle piogge e con le oscil-

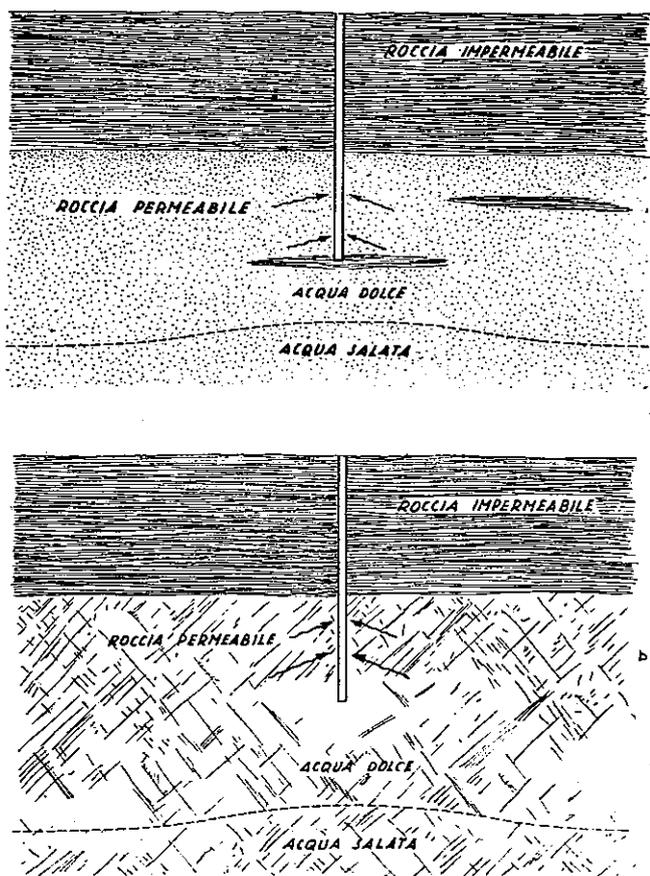


Fig. 8 - Schemi di pozzi che si arrestano in corrispondenza di schermi impermeabili. Caso a): falda in roccia permeabile per porosità. Caso b): falda in roccia permeabile per fessurazione.

lazioni del livello medio marino dovute alle alternanze delle maree. Esse implicano pertanto un lungo periodo di metodiche osservazioni, durante le quali è necessario vigilare affinché gli attingimenti alla falda acquifera vengano effettuati, nella zona in studio, ovunque compatibilmente con gli scopi della ricerca.

In Puglia, allo stato attuale delle ricerche in corso, non sono state ancora condotte misure inerenti alla effettiva profondità della «interfaccia» sotto il piano di campagna. Tuttavia, come sarà mostrato nelle pagine seguenti, molti sono i pozzi perforati fino ad oltrepassare la zona di contatto acqua dolce-acqua salata e successivamente abbandonati. Questi pozzi, con l'aggiunta di altri da eseguire ulteriormente, potrebbero utilmente funzionare da «pozzi spia».

In mancanza di dati riguardanti direttamente la Puglia ed allo scopo di fare luce sull'argomento è oppor-

tuno illustrare, in questa sede, i risultati di alcune ricerche effettuate altrove, in formazioni costiere egualmente invase dall'acqua del mare. A tal fine appaiono di grande interesse i dati emersi dagli studi svolti, fra il 1939 e il 1942, dal Geological Survey degli Stati Uniti, in collaborazione con le città di Miami, Miami Beach e Coral Gables, in occasione della invasione di acqua salata verificatasi in tale epoca nei pozzi della zona di Miami fin ad oltre 6 miglia dalla Baia di Biscayne (Florida).

Tale invasione, come ampiamente riferiscono Russel H. BROWN e Gerald G. PARKER [7], fu procurata, nello spazio di circa 30 anni, dall'abbassamento progressivo della superficie libera della falda acquifera in seguito allo scavo di numerosi canali drenanti nella zona. Questa è geologicamente costituita da una formazione sottile di calcari oolitici del Pleistocene e da calcari corallini e calcari tufacei del Pliocene, fortemente permeabili, poggianti su marne sabbiose (poco permeabili) ed argille sabbiose (impermeabili) del Miocene. I pozzi della zona interessano prevalentemente le formazioni postmioceniche.

Fra detti pozzi furono prescelti per lo studio tutti quelli appartenenti ad una stessa località, denominata Silver Bluff. Ad uno per volta vennero effettuati, in uno stesso giorno, i pompaggi con depressioni del pelo d'acqua fino a raggiungere il fondo di ciascun pozzo ed, in tali condizioni idrodinamiche, vennero prelevati i campioni d'acqua da analizzare. L'operazione fu ripetuta più volte fra il 1941 e il 1942. Essa, tenuto conto della diversa profondità dei pozzi presi in esame, consentì il tracciamento delle cosiddette «superfici isocloriche», vale a dire cioè delle superfici sulle quali giacciono punti in cui l'acqua ha uguale contenuto in cloruri.

Le figure 9a e 9b mostrano, infatti, in sezione, il profilo di tali «superfici» relativamente alle misure effettuate nei giorni 26 luglio 1941 e 4 febbraio 1942. Esse pongono bene in evidenza quanto fu rilevato da PENNINK in Olanda, e cioè che il passaggio dall'acqua dolce all'acqua salata avviene praticamente attraverso una zona di diffusione avente uno spessore dell'ordine di una ventina di metri. Tale spessore, oltre che dipendere dalla differente viscosità dei due fluidi a contatto, è influenzato altresì, a parere di chi scrive, dalla velocità con la quale si muove la falda acquifera sull'acqua d'invasione marina. Esso, pertanto, non ha un valore costante in ogni caso.

Le esperienze condotte a Miami non possono, d'altra parte, non essere influenzate alcun poco dal movimento ascensionale dell'acqua salata di fondo, prodotto dal pompaggio in ciascun pozzo. Perciò, dovendosi eseguire misure del genere nei pozzi della Puglia, sarebbe preferibile servirsi di metodi più esatti. Allo scopo risulterebbe semplice e preciso l'uso di un'apparecchiatura elettrica, studiata e realizzata nel Laboratorio di Idrologia della Università di Stanford, in California. L'uso di quest'apparecchiatura, minutamente descritta da J. F. POLAND e R. B. MORRISON [14], è stato attuato, con brillanti risultati, nelle ricerche svolte sulle acque salmastre rinvenute nei pozzi adiacenti alla Baia di San Francisco. Il metodo consiste nel misurare, attraverso due elettrodi calati nel pozzo, la resistività del-

l'acqua a varie profondità, in entrambe le condizioni statiche o dinamiche, e dai valori di tali resistività risalire, per mezzo di opportuni abachi, ai contenuti salini dei livelli d'acqua presi in esame.

Per altra via, in maniera più semplice ma con applicazioni più limitate del metodo precedente, si potrebbe ricorrere, a parere di chi scrive, alla misura delle densità dei vari livelli acquiferi a mezzo di opportuni densimetri, da calarsi nel pozzo dopo avere in questo interrotta ogni operazione di emungimento. Potrebbe allo scopo bastare un densimetro, del quale, mantenendo il volume costante, si possa, di volta in volta, opportunamente aumentare il peso. Dalla misura di tali densità, con opportuni calcoli, si potrebbe quindi risalire ai contenuti salini dell'acqua rinvenuta a varie profondità.

Ad ogni modo, stando ai metodi seguiti da BROWN e PARKER, i profili delle «superfici isocloriche» determinate per la zona di Miami, confrontati con il profilo teorico della «interfaccia», ottenuto dall'applicazione della formula [1] nelle condizioni relative alla Baia di Biscayne:

$$\rho_s = 1,025 \text{ kg/l} \quad h/l = 1:40,$$

mostrano che nel mese di luglio, quando il pelo libero della falda raggiunge le maggiori altezze sul livello medio marino, detto profilo teorico coincide pressappoco con la linea mediana di diffusione acqua dolce-acqua salata, corrispondente a 1000 p.p.m. di cloruri. Il sollevamento del profilo teorico della «interfaccia», corrispondente all'abbassamento del pelo libero della falda nel mese di febbraio, non trova invece altrettanto riscontro nella pratica: le «superfici isocloriche» mostrano infatti di essersi sollevate, da luglio a febbraio, molto meno di quanto si dedurrebbe dall'applicazione della legge di HERZBERG.

Ciò conferma quanto nelle prime pagine è stato detto circa la lentezza con la quale si sposta in altezza la «interfaccia». Questa risponde agli abbassamenti del pelo libero della falda con un notevole ritardo, dell'ordine di mesi o addirittura di anni, e pertanto i nuovi afflussi, che nel frattempo giungono alla falda da parte delle acque vadose, vietano che la «interfaccia» si sollevi effettivamente in proporzione dell'abbassamento massimo raggiunto dalla superficie libera della falda. Tali considerazioni valgono egualmente nel caso di una falda artesianiana, sottoposta a variazioni stagionali di pressione.

Naturalmente, se anziché trattarsi di oscillazioni periodiche stagionali nel livello della falda, si tratta di un vero e proprio impoverimento progressivo di essa, la legge di HERZBERG può ritenersi, agli effetti statici, effettivamente valida, a condizione che si applichi agli spostamenti della «interfaccia» un certo ritardo, da valutarsi caso per caso, sulla base di appositi accertamenti condotti nella zona oggetto della ricerca.

Fra questi accertamenti assume quindi un'importanza notevole la determinazione periodica delle «superfici isocloriche», nonché il tracciamento delle «isofreatiche» ovvero delle «isopieziche». Tali determinazioni vanno ovviamente riferite alle condizioni di marea, di cui va presa opportunamente nota attraverso l'impianto di apposite stazioni mareografiche. Esse vanno

altresi eseguite possibilmente in condizioni normali di pressione atmosferica ed evitando che si abbiano, durante lo svolgimento di esse, afflussi di acqua piovana alla falda.

Per le zone prossime alla linea di spiaggia risultano, infine, di una certa utilità le cosiddette «curve isocloriche», date dalla intersezione delle «superfici isocloriche» col tetto della falda acquifera. Queste, insieme alle «isopieziche», danno modo di individuare le zone

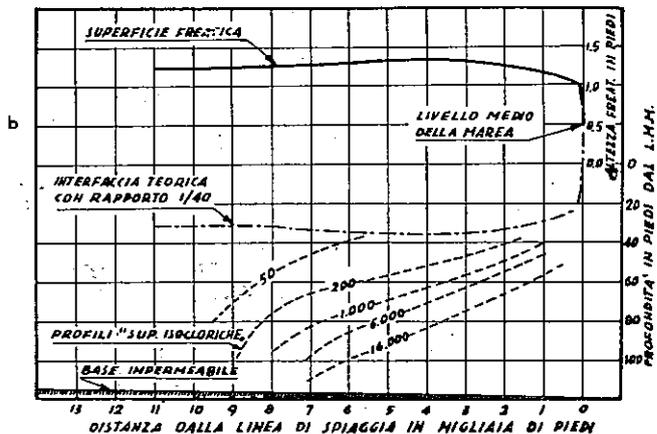
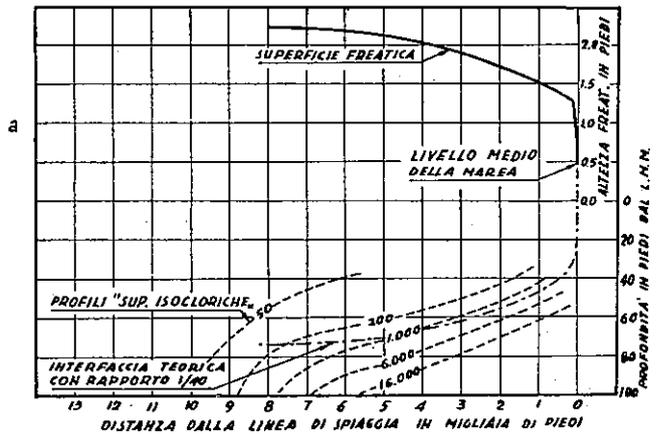


Fig. 9 - Profili delle «superfici isocloriche» rilevati a Silver Bluff (Miami) nei giorni 26 luglio 1941 (caso a) e 4 febbraio 1942 (caso b). Le superfici isocloriche sono rappresentate in p.p.m. di cloruri (da BROWN R. H. e PARKER S. G.).

ove l'invasione d'acqua marina è maggiore e consentono, peraltro, di studiare in qualche modo il fenomeno della influenza «laterale», esercitata dal contatto dell'acqua dolce con l'acqua del mare. Un breve e interessante studio del genere è stato infatti eseguito da R. LOCKHART JACK, per il Grande Bacino Artesiano Sud Australiano, onde si rimanda al predetto lavoro [15] per maggiori precisazioni sull'argomento.

## La ricerca di acque carsiche in Puglia

### Aspetti geologici ed idrogeologici della regione

Il presente studio riguarda particolarmente il tratto di versante adriatico che, dalla foce del fiume Ofanto, si protende fino al Capo di Santa Maria di Leuca, nonché l'intero versante jonico pugliese, che da Leuca

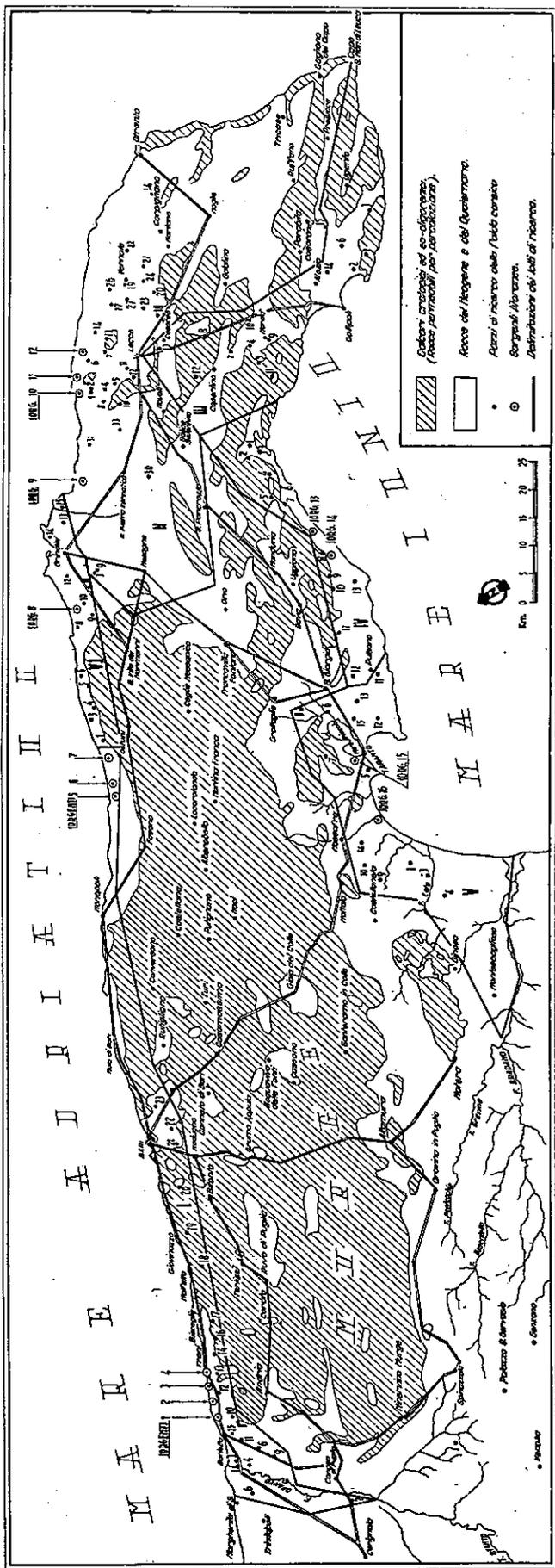


TAVOLA I

risale fino alla foce del fiume Bradano. Così delimitata, la zona in studio comprende la cosiddetta *Terra di Bari*, la *penisola Salentina* e il *Litorale tarantino*.

Queste regioni costituiscono insieme una unità geologica ben definita, rappresentata da una impalcatura fondamentale di calcari del Cretacico, sui quali si adagiano lembi, più o meno isolati, di formazioni calcareo-arenacee, calcareo-tufacee ed argillo-sabbiose del Neogene e del Pleistocene (tav. I). Detta unità, emersa dal bacino adriatico essenzialmente alla fine del Terziario, è corrugata in larghe e dolci ondulazioni, cosicchè il paesaggio risulta piuttosto uniforme e privo di elevazioni notevoli.

Le colline, rappresentate in genere dalle larghe pieghe dei calcari stratificati del Cretacico, disposte in direzione NO-SE, sono alte poche centinaia di m nella *Terra di Bari*, ove vanno sotto il nome di *Murge*; molto più basse sono invece nel Salento, ove vanno sotto il nome di *Serre*. Spesso il litorale presenta una spiaggia bassa, qualche volta paludosa e malsana. In altri casi, invece, presenta coste dirupate in corrispondenza di alcune linee di faglie, grosso modo parallele alla direzione appenninica.

La formazione cretacica affiorante in Puglia è riferibile prevalentemente al Turoniano ed al Cenomaniano, livelli rappresentati litologicamente da calcari più o meno compatti, talora lievemente dolomitici, bianco grigiastri o bianco giallastri, con struttura microcristallina o criptocristallina. Il Cretacico inferiore, riferibile in buona parte all'Urgoniano e passante in alcune regioni del Barese al Neocomiano, è meno sviluppato e rappresentato in genere da calcari dolomitici o da vere e proprie dolomie [16]. Dette formazioni, essendo interessate da larghe pieghe e da numerosissime fratture, quasi sempre con rigetti di modesta entità, sono costituite da strati spesso suborizzontali o inclinati al massimo di  $20 \div 25^\circ$ .

Uno sviluppo assai limitato nella regione pugliese presenta invece l'Eocene, quantunque sembri che alcuni calcari del Salento, ritenuti cretacici dalla Cartografia geologica ufficiale, siano stati riconosciuti come eocenici e talora oligocenici, sulla base di studi micropaleontologici effettuati di recente [17]. Ad ogni modo questi calcari si presentano, dal punto di vista litologico, quasi sempre simili ai calcari di scogliera del Cretacico.

Direttamente adagiato sui calcari cretacici ed eo-oligocenici si rinviene poi, limitatamente alla provincia di Lecce, il Miocene. Si tratta generalmente di un calcare arenaceo tenero, a grana fine, lievemente marnoso e scarsamente fessurato [18], il quale affiora in zone quasi sempre pianeggianti o dolcemente inclinate. Detta varietà di calcare arenaceo va comunemente sotto il nome di « pietra leccese ».

Sparsi qua e là fra le *Murge* baresi, molto più diffusi invece fra le *Serre* salentine, si estendono infine numerosi lembi di formazioni plioceniche e pleistoceniche, i quali costituiscono i residui di un esteso mantello smembrato di rocce calcareo-tufacee ed argillo-sabbiose, depostesi in seguito alla nota trasgressione marina, iniziata in Puglia al principio del Pliocene [19]. Tali livelli sono rappresentati, più precisamente, alla base da una formazione di tufi calcarei organogeni

francamente pliocenici, poggiati in discordanza sui calcari cretaci, ovvero sulla « pietra leccese ». Ai tufi di base si sovrappone spesso una formazione argillo-sabbiosa, di colore turchino, talora riconosciuta come appartenente al Pleistocene [20] [21], ma litologicamente molto simile alle note « argille azzurre » del Piacenziano. Seguono, nella successione stratigrafica normale, altre varietà di tufi calcarei quaternari, ammantati talora in superficie da sottili depositi ghiaioso-sabbiosi, in facies fluvio-marina, affioranti

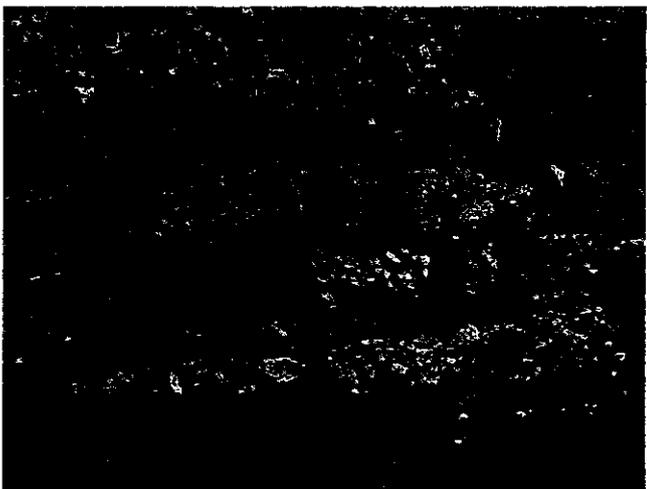


Fig. 10 - Tipi di fessurazioni nei calcari cretaci delle Murge. Le formazioni calcaree sono ridotte in un ammasso di blocchi poliedrici, a spigoli vivi, ravvicinati fra loro. Le fessure, estremamente frequenti, risultano sottili perché non allargate da fenomeni carsici di entità apprezzabile.

principalmente nel Brindisino e ad Ovest di Taranto, lungo il litorale.

Dal punto di vista idrogeologico, le formazioni che in prevalenza riguardano il presente studio sono rappresentate dai calcari e calcari dolomitici del Cretacico e, subordinatamente, dagli scarsi lembi di calcari eo-oligocenici, i quali, essendo litologicamente analoghi ai primi, vanno praticamente confusi con essi (tav. I). Tali calcari sono interessati, in genere da frequentis-

sime fratture profonde di origine tettonica le quali costituiscono, coi giunti di stratificazione, una vera e propria rete, più o meno uniformemente diffusa, di *fessure di circolazione acquifera* (fig. 10). Le dimensioni, la frequenza e la orientazione di dette fratture sono variamente influenzate da fattori diversi. Generalmente si tratta di *fessure associate* [5], le quali isolano nell'ammasso roccioso blocchi poliedrici di dimensioni variabili da strato a strato, a forma di parallelepipedi, ovvero di romboedri.

Le fessure risultano solo in casi particolari fortemente allargate dai fenomeni carsici, dovuti allo scioglimento della calcite da parte delle acque vadose, e ciò fondamentalmente perché il carsismo ha avuto modo di esplicare violentemente e a lungo la sua azione in Puglia solo in determinati punti della regione, favorito evidentemente da particolari condizioni tettoniche e paleogeografiche di essa (Grotte di Castellana, Putignano, Polignano e varie altre località). Spesso poi, dove le fessure sono più larghe, si rivengono abbondanti riempimenti di « terra rossa », deposito quest'ultimo in genere prevalentemente impermeabile. Altrove, invece, la circolazione acquifera entro detti calcari, comunemente indicata col nome di « percolazione », può ritenersi in forma uniformemente diffusa, anche se risultante dal flusso attraverso un sistema di fessure; ed il moto dell'acqua, data la sottigliezza delle fratture, segue evidentemente in molti casi le leggi del moto viscoso in canali lineari.

Tali circostanze sono comprovate non solo dall'osservazione di taluni spaccati delle formazioni calcaree descritte, ma altresì dai risultati ottenuti dalle prove di portata svolte su gran parte dei pozzi fino ad oggi eseguiti in Puglia. L'andamento delle curve caratteristiche relative a tali prove — sulle quali non si ritiene opportuno riferire in questa sede — mostra di seguire infatti le stesse leggi che si riscontrano per pozzi attingenti a falde acquifere contenute in sistemi porosi, sia che si tratti di pozzi freatici che artesiani.

E' da tener presente però che ad una frattura di ampiezza  $w$ , disposta per ipotesi con giacitura verticale, corrisponde pertanto, secondo il MUSKAT [12], una permeabilità equivalente data da:

$$k = \frac{10^8 w^2}{12} \text{ darcys (*)}$$

ove  $w$  è espresso in cm. Da ciò si deduce che ad una sola frattura, avente l'ampiezza di 0,1 mm, corrisponde una permeabilità di 833 darcys. Tale valore, confrontato con quelli delle permeabilità relative alle sabbie consolidate più comuni, le quali si aggirano su qualche darcy al massimo, spiega la stragrande permeabilità della formazione calcarea cretatica della Puglia rispetto a quella delle formazioni calcareo-arenacee e sabbioso-argillose ad essa soprastanti.

Le ricerche acquifere, recentemente eseguite nella regione pugliese, hanno avvalorato quindi la convinzione, da tempo invalsa presso taluni studiosi, che le fessure nei calcari cretaci del Salento e della Terra

(\*) 1 darcy =  $\frac{1 \text{ cm}^3}{\text{sec. cm}^2 \cdot (\text{atm/cm})}$

di Bari siano nel complesso tutte effettivamente inter-comunicanti fra loro, cosicchè l'acqua di fondo le riempie totalmente, costituendo una potente falda acquifera, da tempo nota sotto il nome di «*falda profonda*», qualora si tratta di distinguerla dalle falde, relativamente più modeste, aventi sede nei terreni terziari e quaternari soprastanti. Questa *falda* ha in genere i suoi punti di emergenza ove gli affioramenti calcarei raggiungono il mare, di talchè, procedendo dalla costa verso l'interno, il livello di essa sale assai lentamente — con una cadente piezometrica dell'ordine dell'1‰ — in virtù della grande permeabilità della formazione rocciosa interessata dalle vene acquifere. Il livello marino rappresenta il livello di base della idrografia pugliese, livello a cui tende la superficie freatica ovvero la superficie piezometrica della «*falda profonda*».

Il contatto di questa falda con l'acqua del mare che invade il continente (fig. 11) avviene, per quanto è risultato dalle ricerche eseguite, nella maniera grosso modo indicata nelle figure 1 e 2. La scomparsa dei calcari cretaci, in prossimità della costa, sotto terreni più recenti di natura impermeabile (fig. 2) impedisce generalmente il normale deflusso della falda in direzione del mare, cosicchè, in questo caso, l'acqua dolce è costretta quasi sempre ad aggirare lo sbarramento, rappresentato dai terreni impermeabili, per riversarsi, ai margini di essi, direttamente nel mare all'incirca a quota zero. Qualora invece i terreni impermeabili di copertura costiera si sollevano di solo qualche m sul livello medio marino, le acque della falda traboccano, dando luogo a vere e proprie sorgenti di *trabocco per sbarramento*.

A questa regola non mancano alcune eccezioni: esse son rappresentate da talune cospicue sorgenti litoranee sottomarine, originate dal deflusso dell'acqua dolce, in forte pressione, attraverso alcuni veri e propri condotti subacquei, prodotti dal carsismo della roccia calcarea a profondità inferiori alla «*interfaccia teorica*». Un esempio del genere si riscontra, infatti, nella famosa «*Polla di San Cataldo*», a qualche centinaio di m dal litorale della città di Taranto [22].

Tralasciando per ora di esaminare i casi più complessi e meno frequenti, e considerando l'ipotesi, più semplice, che la falda possa normalmente scorrere fino al mare attraverso un mezzo con permeabilità pressappoco uniforme, è da segnalare che l'emergenza di essa lungo la linea di spiaggia non avviene esattamente al livello del mare, come è schematizzato in figura 1. In verità, rappresentando in figura 12 con *AB* l'andamento del pendio lungo il litorale, con *EF* e *GF* rispettivamente la *superficie freatica* e la «*interfaccia*», ottenuta dall'applicazione della legge di GHYBEN ed HERZBERG, l'acqua dolce compresa fra le due linee di flusso limiti *EF* e *GF* dovrebbe defluire tutta in *F*, con velocità infinita. Ciò ovviamente non è possibile, onde, secondo quanto hanno potuto constatare alcuni studiosi [7] [12], il fenomeno si esplica per mezzo del sollevamento della *superficie freatica* in *CD*, perchè l'acqua dolce possa emergere nel tratto *DF* con una velocità di affioramento conveniente e dipendente soprattutto dal grado di permeabilità del mezzo attraversato. Spesso accade pure che la «*inter-*

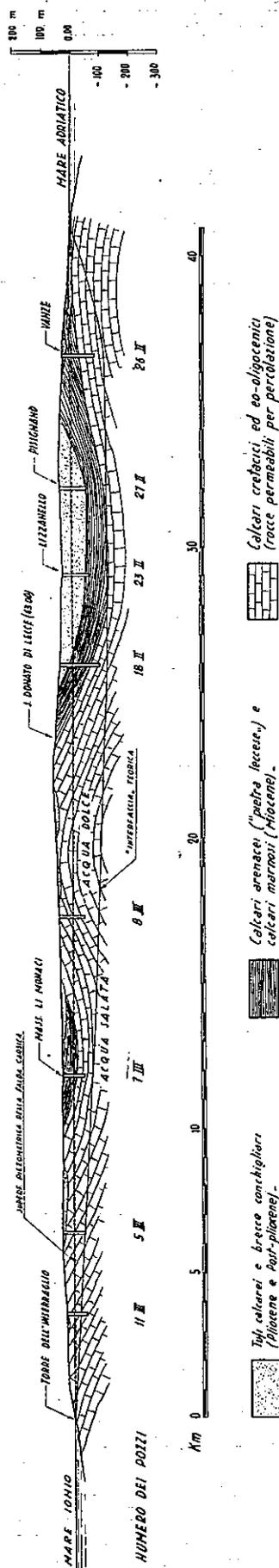


Fig. 11. - Sezione geologica schematica della penisola Salentina.  
(Nella leggenda di questo clichè è necessario correggere la denominazione di «*falda profonda*»).

faccia» si abbassa in LM, per cui l'emergenza di acqua dolce avviene in parte sotto il livello medio marino (\*).

Tali deduzioni, aventi a prima vista un valore puramente teorico, sono ampiamente confermate dalle quote di rinvenimento delle maggiori sorgenti litoranee della zona delle Murge e della penisola Salentina

TABELLA I — Principali sorgenti litoranee della Terra di Bari e della penisola Salentina.

Numero d'ord.	Denominazione della sorgente	Comune	Quota sul mare m	Media portata misurata		
				l/sec	Date	
					dal	al
1	Collett. sinistro.	Trani	0,50	147	1926	1951
2	Collett. destro.	Trani	0,50	486	1926	1951
3	Vasca di Trani	Trani	2	176	1926	1951
4	Carratoio	Trani	2	117	1927	1951
5	Fiume Grande	Fasano	2	662	1926	1951
6	Fiume Piccolo	Fasano	1	340	1926	1951
7	Fiume Morello	Ostuni	2	376	1926	1951
8	Lapani	Brindisi	2	171	1927	1951
9	Siedi	S. Pietro Vern.	2	120	1927	1952
10	Idume	Lecce	0,50	1404	1926	1951
11	Giammatteo	Lecce	8	328	1946	1951
12	Acquatina	Lecce	0,50	223	1926	1934
13	Chidro	Manduria	1	2577	1926	1951
14	Burago	Manduria	2	214	1926	1951
15	Galese	Taranto	3	490	1926	1951
16	Patenisco	Massafra	2	74,28	1927	1951

(tav. I). Nella tabella I sono infatti riportati alcuni dati, riguardanti le misure effettuate a riguardo dal Servizio Idrografico fra il 1926 e il 1951 [24]. Nonostante che tali misure siano state riferite alla quota altimetrica zero dell'I.G.M., indubbiamente discordante col vero livello medio marino, al tempo delle misure stesse, queste mostrano che le quote di dette sorgenti oscillano fra m 0,50 ÷ 2,00, vale a dire cioè che esse si mantengono in ogni caso superiori alle normali fluttuazioni di marea, il che conferma quanto dianzi si è detto circa le modalità di emergenza della falda profonda sul litorale pugliese.

#### Composizione dell'acqua del mare

Prima di illustrare i risultati delle ricerche svolte sulla falda profonda della Puglia, è opportuno accennare alla reale composizione dell'acqua del mare ed alle principali modificazioni che questa subisce a contatto delle rocce del continente.

E' noto infatti che le acque sotterranee hanno comunemente una composizione notevolmente diversa da quella dell'acqua marina. Ciò induce a pensare che,

(\*) Le modalità di carattere idrodinamico, secondo le quali si esplica il fenomeno in quest'ultimo caso, sono illustrate da HUBBERT nell'opera [23], onde si rimanda ad essa per maggiori particolari sull'argomento.

se la composizione dell'acqua estratta da un pozzo presenta caratteristiche di composizione che rispecchiano i componenti chimici dell'acqua di mare, vuol dire che questa invade il continente ed in qualche modo si miscela con la falda di acqua dolce. Tuttavia tale deduzione, piuttosto semplicistica, non va presa in senso assoluto, soprattutto per le modificazioni che l'acqua di mare, penetrata nelle rocce del continente, subisce per il contatto con queste ultime.

Le ormai note reazioni, dovute allo scambio delle basi in un sistema composto da un lato da una roccia, contenente argilla o sostanza organica ovvero un qualsiasi altro minerale avente un certo « potere di scam-

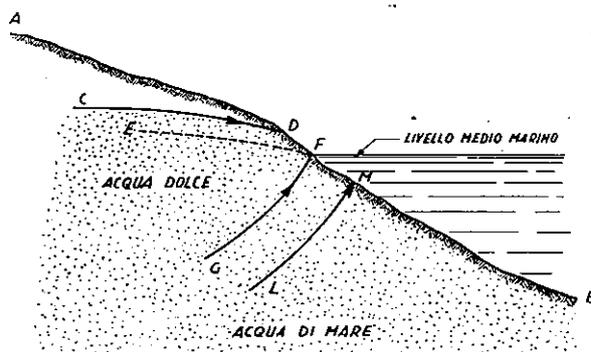


Fig. 12 - Emergenza di una falda freatica in corrispondenza del litorale.

bio», e dall'altro da una soluzione salina, rendono talora possibile prevedere lo stato di equilibrio finale relativo al sistema costituito dall'acqua di mare a contatto con una data roccia [25].

In genere i cationi contenuti in una soluzione salina hanno fra loro un assai diverso « potere di scambio », vale a dire cioè una diversa tendenza a sostituire i vari elementi scambiabili di un'argilla o di un altro minerale. Il fenomeno, com'è noto, è retto non solo dalle cariche elettriche possedute dagli ioni scambiabili, ma soprattutto dal grado di idratazione di essi [6] [26] e dal tipo di minerale interessato dallo scambio. Così, per esempio, lo Jone Na, poiché ha un piccolo raggio ionico, ha un grado di idratazione notevole, e pertanto possiede in soluzione un « potere di scambio » di gran lunga minore di quello corrispondente agli ioni Mg, Ca e K, aventi raggi ionici maggiori.

In linea del tutto generale il REVELLE [27] calcola che, a seconda del tipo di minerale a contatto con la soluzione, il sodio possiede, rispetto al magnesio, al calcio e al potassio, una tendenza da cinque a dieci volte maggiore a restare o ad entrare in soluzione a spese delle basi contenute nel minerale reagente. Più precisamente, allorché la percentuale iniziale degli ioni Na scambiabili supera nella roccia un determinato valore di equilibrio (37% circa per argilla a contatto con acqua di mare), la soluzione guadagnerà in sodio a spesa delle basi in essa contenute.

Nella tabella II sono state riportate le analisi chimiche di tre campioni di acqua di mare (\*), il primo

(\*) Tali analisi sono state eseguite dall'Istituto di Chimica Agraria dell'Università di Bari.

TABELLA II — Principali costituenti di taluni campioni di acque di mare del litorale pugliese.

Costituenti	Ioni/Cl in acqua di mare normale (Ioni valutati in g/kg)	Acqua marina litorale Ginosa g/l (**)	Concentrazioni normali dell'acqua di mare avente uguale «clorinità» Cl g/l	Acqua marina litorale Gallipoli g/l	Concentrazioni normali acqua di mare avente uguale Cl g/l	Acqua marina del litorale di Mola di Bari g/l	Concentrazioni normali dell'acqua di mare avente uguale Cl g/l
Residuo a 110°C . . . . .	—	42,870	—	40,355	—	40,300	—
Residuo a 180°C . . . . .	—	40,742	—	39,400	—	38,710	—
pH . . . . .	—	7,10	—	7,45	—	7,70	—
Cloro Cl <sup>-</sup> . . . . .	0,99894	21,737	21,737	21,772	21,772	21,220	21,220
Solfato SO <sub>4</sub> <sup>=</sup> . . . . .	0,1394	3,029	3,032	2,995	3,037	2,973	2,960
Carbonato CO <sub>3</sub> <sup>=</sup> . . . . .	0,00723	0,069	0,159	0,089	1,159	0,079	0,155
Calcio Ca <sup>(++)</sup> . . . . .	0,02106	0,960	0,458	0,507	0,459	0,946	0,447
Magnesio Mg <sup>(++)</sup> . . . . .	0,06695	0,929	1,456	1,447	1,459	1,046	1,422
Sodio Na <sup>(+)</sup> . . . . .	0,55560	13,432	12,087	12,034	12,108	11,848	11,802
Potassio K <sup>(+)</sup> . . . . .	0,02000	0,516	0,435	0,461	0,436	0,568	0,425
Clorinità Cl in g/kg . . . . .	—	21,093	—	21,276	—	20,592	—
Salinità S (*) in g/kg . . . . .	—	38,104	—	38,433	—	37,199	—

(\*) Si definisce salinità il peso S, in grammi, di tutti i sali contenuti in un kg di acqua marina, quando i carbonati siano convertiti in ossidi, i bromuri e gli ioduri siano sostituiti da cloruri, la massa organica sia tutta ossidata, e il prodotto, disseccato a 480°, mantenga peso costante. Il residuo a 180°, talora in senso convenzionale detto anch'esso «salinità», non va identificato con S. La relazione che lega S a Cl è la seguente:  $S = 0,03 + 1,805 Cl$  [10].

(\*\*) Le valutazioni sono fatte in g/l, allo scopo di poterle confrontare con le analisi delle acque di pozzi, comunemente anche esse espresse in g/l.

dei quali è stato prelevato ad una distanza di 250 m dal litorale jonico, in corrispondenza di Ginosa, ed a 5 m di profondità sotto il livello del mare, il secondo ad oltre 1 km dal litorale di Gallipoli e ad una ventina di m sotto il livello marino, il terzo ad 1 km dalla spiaggia di Mola di Bari e a 20 m sotto il livello del mare, di talchè le costituzioni chimiche di essi possono ritenersi in un certo senso rappresentative per le acque di mare che lambiscono l'intero litorale pugliese. Essendo inoltre noto che, se si considera l'acqua oceanica o del Mediterraneo in genere, pur variando la diluizione della massa globale salina entro larghi limiti, i componenti principali mantengono tra loro rapporti praticamente costanti [10], è stato possibile, una volta determinata la «clorinità» Cl dei singoli campioni di acqua marina esaminati, calcolare per ciascuno di essi le composizioni pressappoco corrispondenti all'acqua di mare non modificata da alcuna azione disturbatrice di carattere litoraneo. Tali composizioni, confrontate con quelle ottenute dalle analisi chimiche dei campioni di acqua prelevata direttamente dal mare, mostrano che, anche a distanze sensibili dalla costa, il mare è sottoposto ad azioni modificatrici talora notevoli.

E' veramente degno di rilievo il fatto che nell'acqua marina del litorale di Ginosa sia contenuto un quantitativo di sodio (13,432 g/l) sensibilmente maggiore di quello corrispondente alla concentrazione normale (12,087 g/l), mentre per il magnesio avviene perfettamente il contrario (0,929 g/l contro 1,456 g/l). Ciò trova

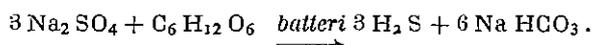
facile spiegazione in base a quanto è stato dianzi detto in merito alle modificazioni subite dall'acqua del mare a seguito dello scambio di basi. E' noto infatti che il versante jonico, adiacente alle sponde del fiume Bradano, è costituito in buona parte da sedimenti argillosi ed argillo-sabbiosi pliocenici e pleistocenici, onde le sostanze solide che i corsi d'acqua della zona trasportano al mare sono prevalentemente costituite da minerali argillosi. Questi, anche se rappresentati, come sembra, fondamentalmente da minerali di tipo micaceo, posseggono egualmente un forte «potere di scambio» [28], e pertanto danno luogo ad una prevalente sostituzione  $Na \approx Mg$  con l'acqua marina.

I campioni di acqua esaminati presentano altresì costantemente un contenuto di calcio maggiore del normale, il che sembra del tutto naturale se si tien conto del fatto che entrambe le acque sotterranee e quelle fluviali, confluenti nel mare che bagna la Puglia, sono assai ricche di bicarbonato di calcio. D'altra parte la concentrazione dell'ione CO<sub>3</sub>, ottenuta dalle analisi chimiche elencate in tabella, non può ritenersi sufficientemente attendibile poichè i campioni d'acqua analizzati non sono stati prelevati con le necessarie cure atte ad evitare la perdita di CO<sub>2</sub>. E' noto infatti che l'anione CO<sub>3</sub>, proveniente dalla dissociazione dei carbonati, è molto instabile: esso, reagendo con l'acqua, dà luogo alla formazione di anidride carbonica, che tende naturalmente ad abbandonare la soluzione salina.

Reazioni enormemente più complesse avvengono altresì quando l'acqua del mare invade le rocce del

continente e si mescola alle acque di falda. In tal caso, l'unico elemento non affetto da alcuna modificazione è il cloro, onde la sua presenza, in quantità mediamente superiore a 0,5 g/l, fatta eccezione per le acque fossili, è un indizio sicuro della intrusione dell'acqua del mare nella falda acquifera.

Per quanto riguarda infine il solfato, la concentrazione dell'ione  $\text{SO}_4^{=}$  è equivalente, nell'acqua di mare, a circa 1/7 di quella dell'ione Cl. Essa però si abbassa più o meno fortemente quando la soluzione salina viene a contatto con sostanze di natura organica: allora il solfato subisce un effetto di riduzione batterica, generalmente con produzione di idrogeno solforato. La reazione, facendo l'ipotesi che la sostanza organica sia costituita per semplicità da glucosio [27], avviene in condizioni anerobiche secondo lo schema seguente:



In proposito è opportuno segnalare che spesso è stata notata in Puglia, durante la esecuzione di pozzi per ricerca d'acqua, la presenza nel sottosuolo di  $\text{H}_2\text{S}$ . Le emanazioni del gas si sono avute generalmente non appena raggiunta la falda profonda in pressione. Più interessante di tutti è stato il caso di un pozzo trivellato lungo la strada Foggia-Manfredonia, nelle adiacenze del bivio per San Marco in Lamis. Questo pozzo, dopo aver attraversato la potente coltre di depositi impermeabili del Terziario del Tavoliere [29], si è attestato nella formazione calcarea del Cretacico alla profondità di circa m 300, rinvenendo nelle fratture della roccia acqua di mare ed alla sommità di questa una sacca di gas, costituita prevalentemente da idrogeno solforato, la cui emanazione si è protratta per parecchi giorni.

#### *Prime applicazioni delle teorie precedenti ai pozzi della Terra di Bari e del Salento.*

Sono stati presi in esame in questo studio i pozzi eseguiti dall'Ente Irrigazione, a scopo di ricerca, dagli inizi del 1951 all'aprile 1954. Esistono pure allo stato attuale, nelle regioni sopra indicate, numerosissimi pozzi appartenenti a privati e, infine, circa un altro centinaio di pozzi, di recente eseguiti per conto della Sezione Speciale Riforma Fondiaria.

I pozzi di ricerca, quasi sempre scavati col sistema a rotazione a carotaggio continuo e con diametro che si aggira sui 300 mm, attingono generalmente alla « falda profonda ». Essi sono ubicati a quota inferiore ai 60 m sul livello medio marino, allo scopo di mantenere entro limiti economicamente convenienti, ai fini irrigui, il sollevamento dell'acqua da utilizzare. Di essi la maggior parte risultano artesiani, anche perchè spesso sono taluni banchi stessi di calcare cretacico, poco fessurati, a costringere la falda profonda a scorrere in pressione.

E' da segnalare a riguardo che non pochi pozzi hanno rinvenuto, prima di raggiungere la falda profonda, una o più falde di carattere superficiale nei terreni postcretacici, specie in alcuni tufi calcarei del Pliocene della zona di Lecce. Di queste falde non si tiene conto nel presente studio, essendo questo limitato esclusi-

vamente all'esame della « falda profonda » a contatto diretto con l'acqua del mare.

Gli accertamenti idrologici svolti fino ad oggi sui pozzi eseguiti si limitano, praticamente, alla misura del livello statico della falda rinvenuta, con riferimento alla quota zero dell'I.G.M., ed alla determinazione della cosiddetta « curva caratteristica » (portate-depressioni) alla data del perforo. In genere, dopo un pompaggio prolungato di 15 ÷ 20 ore, il contenuto salino nelle acque emunte sembra raggiungere un valore limite e costante per determinate condizioni di portata e depressione, il che induce a ritenere, dopo tale tempo, raggiunte le condizioni di equilibrio dinamico nel pozzo. Tale criterio non può naturalmente estendersi ad un sistema di più pozzi di una stessa zona, con pompaggio simultaneo e prolungato per un periodo di mesi, poichè, in tal caso, come si è dimostrato nelle pagine precedenti, influisce notevolmente, sulle condizioni di equilibrio dinamico di ogni singolo pozzo, il sollevamento regionale della « interfaccia » ad opera dell'abbassamento progressivo della superficie piezometrica della falda stessa, nell'ipotesi che in tale periodo gli afflussi alla falda risultino inferiori al quantitativo d'acqua prelevata da essa.

Per quanto riguarda lo studio delle oscillazioni periodiche dei livelli freatici inerenti alla « falda profonda », sono noti a tutt'oggi solo i risultati di alcune misure effettuate in talune stazioni della rete freaticometrica del Servizio Idrografico, fra il 1929 ed il 1933 [8]. Da esse è possibile rilevare che, in tale periodo, quando cioè aveva un carattere molto limitato, le massime oscillazioni dei livelli statici raggiungevano appena i 50 cm. Non fu però, in quell'occasione, stabilita alcuna correlazione con l'alternarsi delle maree.

In base a quanto è stato precedentemente esposto circa le modalità con cui si esplica l'intrusione dell'acqua di mare nei pozzi di zone costiere, appare evidente quindi che i dati a disposizione, allo stato attuale delle ricerche eseguite, sono insufficienti perchè si possano da essi trarre delle norme ben precise, atte a consentire, durante la stagione irrigua, la massima produzione di acqua dolce, evitando il miscelamento di essa con l'acqua marina sottostante. Sarebbe utile a riguardo poter giungere, almeno in alcuni casi specifici, alla determinazione sperimentale di diagrammi del tipo di quelli rappresentati nelle figure 6 e 7, che diano le « depressioni critiche », in funzione della penetrazione del pozzo nella « falda profonda », ovvero le « portate critiche » in funzione della penetrazione del pozzo. Ricorrendo ad esperienze dirette, si potrebbe così far fronte alla pratica impossibilità di risoluzione analitica di taluni aspetti del problema in esame.

Ad ogni modo, gli accertamenti idrologici svolti sui pozzi di ricerca delle zone costiere della Puglia, anche se scarsi, confermano la validità della teorie di GRAYBEN-HERZBERG e di MORRIS MUSKAT, nei limiti e nelle circostanze ampiamente esposti nelle pagine precedenti. Una dimostrazione di ciò sembra aversi dai dati illustrati nella tabella III, nella quale sono elencati gli elementi che seguono:

*N. del pozzo* - Numero d'ordine del pozzo, a fianco del quale è indicato il lotto cui esso appartiene. Come mostra la corografia della tav. I, i pozzi di ricerca sono stati

Tabella III - Caratteristiche idrologiche dei pozzi di ricerca eseguiti in terra di Bari e nel Salento.

Numero dei pozzi	$q$	$s$	$L$	$L'$	$t$	$i$	$h$	$w$	$w'$	$\pi$	$\pi'$	$Q$	$d$	$R$	$Cl'$	$C$	Data delle misure	
1 I	6.336	2,2	150,10	143,76	7,03	3,2	234	50,10	93,66	35,57	62,43	40	29,70	1,95	0,71	1,28	2- 4-1952	
2 I	55,092	20,1	285,70	230,61	28,74	1,46	958	20,45	210,16	2,73	26,28	25	0,65	scarso (*)	—	—	30- 5-1952	
3 I	16,52	1,5	109,25	92,73	7,97	5,3	265	13,45	79,28	7,21	36,60	57	0,65	2,00	0,71	1,28	3- 5-1952	
4 I	25,66	4,1	106,50	80,84	7,16	1,75	239	18,00	62,84	10,21	35,74	56	0,46	2,00	0,87	1,22	1- 6-1952	
5 I	6,497	3,5	178,00	171,50	7,49	2,14	249	8,50	163	9,81	69,62	60	1,70	5,02	2,14	3,89	14- 8-1952	
6 I	34,635	5	120,00	85,36	7,06	1,41	235	46,00	39,36	23,51	38,18	50	4,52	1,76	0,71	1,29	11-10-1952	
7 I	28,86	10	84,50	55,64	7,66	0,77	255	37,50	18,14	15,83	24,09	55	0,60	1,64	0,64	1,16	1-11-1952	
8 I	44,627	4	71,90	27,27	7,73	1,93	257	34,99	7,73	13,19	13,19	38	3,90	2,14	0,90	1,63	21-12-1952	
9 I	41,225	7	81,60	40,37	7,87	1,12	262	16,20	24,17	6,81	17,87	46	0,25	1,59	0,64	1,16	19-12-1952	
10 I	30,407	3	52,85	22,44	7,09	2,36	236	22,85	0,41	9,66	12,14	54	1,80	2,19	0,95	1,72	24- 1-1953	
11 I	26,645	2,2	83,00	56,35	6,84	3,04	228	19,50	36,85	10,20	26,90	54	1,26	2,09	0,81	1,47	10- 2-1953	
12 I	26,215	2	47,10	20,88	4,13	2,06	137	25,02	4,13	17,65	17,65	54	1,40	3,83	1,68	3,05	14- 2-1953	
13 I	27,314	2	50,95	23,64	1,31	0,65	44	24,95	1,31	55,06	55,06	51	2,96	7,07	3,46	6,28	3- 3-1953	
14 I	29,997	1,5	51,20	21,20	0,86	0,57	29	19,20	2,00	71,11	73,80	48	3,80	8,13	3,90	7,08	20- 3-1953	
15 I	19,784	0,8	68,50	48,72	6,02	7,5	200	16	32,72	9,56	26,57	57	0,86	2,04	0,82	1,49	19- 3-1953	
16 I	43,021	2,2	50,70	7,68	1,92	0,87	64	3,70	3,98	6,16	14,56	38	6,30	11,39	5,64	10,24	2- 4-1953	
17 I	39,133	2,5	87,00	47,87	0,72	0,29	26	5,00	42,87	—	182	1	15,69	15,69	7,57	13,75	9- 5-1953	
18 I	49,803	2	50,00	8,20	0,45	0,22	15	3,00	5,20	29,40	55,98	11	0,30	17,40	8,87	16,11	28- 4-1953	
19 I (**)	46,756	2	150,00	103,24	3,66	1,83	122	89,10	14,14	82,60	85,07	1	15,57	0,65	0,07	0,13	5- 8-1953	
			—	32,39	—	—	—	18,25	32,39	16,3	28,7	—	—	—	—	—	—	—
20 I	47,97	3,1	94,50	46,53	6,57	2,12	219	41,50	5,03	19,39	23,5	19	18,20	2,39	0,95	1,72	4- 7-1953	
21 I	52,647	5	129,80	77,15	3,54	0,71	118	49,30	27,85	54,60	66,38	19	11,40	0,49	0,047	0,08	26- 7-1953	
22 I	40,366	4,4	69,00	28,63	0,36	0,08	12	4,00	24,63	—	108	36	5,68	5,94	2,69	4,88	25- 9-1953	
23 I	43,263	3,4	53,75	10,49	1,03	0,3	34	11,52	1,03	32,88	32,88	35	0,35	3,11	1,30	2,36	22- 9-1953	
1 II	19,50	3,5	44,92	25,40	1,57	0,45	52	6,15	19,25	18,60	50,06	54	0,28	1,50	0,63	1,14	6- 3-1952	
2 II	19,49	3,5	43,94	24,45	1,56	0,45	52	12,74	11,71	31,62	48,56	56	0,30	1,60	0,55	1,00	29- 3-1952	
3 II	31,148	6	177,00	145,85	3,57	0,60	119	138,30	7,55	—	121,90	4	16,45	8,50	—	—	23- 7-1952	
4 II	22,98	5,7	98,10	75,12	1,38	0,24	46	9,70	65,42	—	161	52	1,25	13,20	6,50	11,80	17- 6-1952	
5 II	38,012	8	103,40	65,39	2,36	0,30	79	67,75	2,36	83,27	83,27	46	2,45	2,43	1,10	2,00	19- 7-1952	
6 II	24,71	3	61,90	37,19	2,36	0,79	79	21,90	15,29	34,37	48,61	56	1,28	1,84	0,77	1,40	5- 8-1952	
7 II	28,41	6,5	69,82	41,41	2,79	0,43	93	24,82	16,59	32,48	46,14	53	0,40	1,70	0,69	1,25	22- 8-1952	
8 II	19,416	4,5	56,75	37,33	1,59	0,35	53	31,75	5,58	66,95	71,29	54	0,28	1,09	0,44	0,80	7- 9-1952	

9 II	31,148	6	51,50	20,35	2,25	0,37	75	12,80	7,55	18,97	29,25	0,3	16	0,40	0,02	0,036	15- 9-1952
10 II	35,554	8	63,70	28,15	2,95	0,37	98	25,70	2,45	26,89	30,80	50	0,30	0,73	0,23	0,42	17-10-1952
11 II	40,913	9	186,00	145,09	4,01	0,44	133	26,00	119,09	—	108	42	4,60	39,44	20,12	36,54	29-10-1952
12 II	43,613	11	61,15	17,54	3,02	0,30	100	20,56	3,02	19,95	19,95	44	0,68	0,68	0,14	0,25	21-11-1952
13 II	33,437	7	63,10	29,66	2,71	0,40	90	32,37	2,71	37,08	34,91	49	0,44	0,61	0,14	0,25	4-12-1952
14 II	18,909	3	137,00	118,09	2,06	0,69	69	28,00	90,09	—	169	44	25,15	18	9,08	16,49	21-12-1952
17 II	34,99	5,5	195,20	160,21	2,29	0,41	76	99,85	60,36	—	206,76	44	12,65	20,00	9,94	18,05	18- 2-1953
18 II	46,285	14	134,40	88,11	3,55	0,25	118	47,40	40,71	18,99	75,22	43	0,22	0,55	0,17	0,31	21- 3-1953
19 II	35,00	7,5	227,00	192,00	3,00	0,40	100	12,00	160	—	189	34	16,50	10,80	5,21	9,46	1- 5-1953
20 II	50,893	13	197,00	146,11	3,86	0,30	129	12,00	134,11	—	113	30	4,75	31,60	15,81	28,71	26- 7-1953
21 II	45,517	8,5	110,50	64,98	3,87	0,45	129	68,85	3,87	51,81	51,81	42	0,49	0,26	0,04	0,07	21- 5-1953
22 II	34,748	6,5	210,00	175,25	6,80	1,04	227	5,00	170,25	8,81	77,86	42	8,72	0,37	0,04	0,07	25- 7-1953
26 II	28,586	4	109,00	80,41	3,39	0,85	113	62,50	17,91	65,7	72,00	51	0,47	3,61	1,73	3,14	7- 3-1954
30 II	64,292	12	84,80	20,51	2,87	0,24	96	23,38	2,87	23,68	23,68	23	0,33	1,64	0,69	1,25	16- 3-1954
1 III	45,858	1,5	54,50	8,64	0,26	0,17	8	8,90	0,26	100,45	100,45	27	7,40	4,65	2,15	3,90	19- 8-1952
2 III	23,023	0,8	85,50	62,48	1,27	1,6	42	63,75	1,27	146,31	146,31	3	16,70	36,39	18,58	33,74	29-11-1952
3 III	41,011	2,5	107,00	65,99	0,04	0,01	1	5,00	60,99	—	507	19	1,00	42,94	21,63	39,28	5- 7-1953
4 III	33,361	8,5	98,00	64,64	2,01	0,23	67	66,65	2,01	96,58	96,58	7	21,83	2,50	0,93	1,69	4- 1-1953
5 III	40,175	6	73,00	32,82	1,95	0,32	65	34,77	1,95	51,93	51,93	45	0,31	1,63	0,70	1,27	15- 3-1953
6 III	49,69	5,2	140,00	90,31	0,69	0,13	23	11,30	79,01	—	380,00	10	0,40	40,74	20,69	37,57	20- 4-1953
7 III	37,652	10,5	69,00	31,35	2,03	0,2	67	26,00	5,35	41,76	47,93	46	0,09	0,64	0,18	0,33	23-3-1953
8 III	51,245	16	84,50	33,25	2,60	0,16	86	29,50	3,75	35,60	40,19	29	0,15	0,37	0,06	0,11	4- 1-1954
9 III	39,897	5,6	69,00	29,10	1,32	0,23	44	30,42	1,32	67,12	67,12	43	1,84	7,63	3,69	6,70	17- 4-1953
10 III	39,093	8,5	192,00	152,91	2,08	0,24	69	2,00	150,91	—	217,00	18	2,36	27,28	13,900	25,24	24- 7-1953
11 III	26,02	2,6	66,50	40,48	0,65	0,25	21	14,50	25,98	—	185,00	49	1,81	22,03	10,87	19,78	14- 6-1953
12 III	42,247	13,5	62,50	20,25	1,90	0,14	63	22,15	1,90	34,12	34,12	41	1,88	0,51	0,08	0,15	7- 8-1953
13 III	25,547	15	56,80	31,25	2,87	0,19	96	13,40	17,85	17,14	34,50	47	3,95	0,74	0,18	0,33	4- 9-1953
14 III	44,109	4	80,90	36,79	1,64	0,41	55	38,43	1,64	67,84	67,84	36	0,88	0,90	0,35	0,65	16-12-1953
15 III	54,602	9	73	18,40	1,79	0,20	59	17	1,40	29,20	32,89	28	0,11	1,00	0,33	0,60	19- 1-1954
1 IV	26,658	2,8	200	173,34	1,20	0,43	40	30,00	143,34	—	422	16	13,05	42,32	21,57	39,17	10- 9-1952
2 IV	41,374	3,5	69,15	27,78	1,22	0,35	41	29	1,22	69,00	69,00	38	8,10	2,65	1,18	2,14	15-10-1952
3 IV	21,795	1	74	52,20	1,09	1,09	36	53,30	1,09	—	141	6	10,95	34,70	17,75	32,23	20-12-1952
4 IV	26,553	2,4	56,50	29,95	1,15	0,48	38	31,10	1,15	78,42	78,42	46	5	2,68	1,19	2,16	27-11-1952
5 IV	46,104	4,2	110	63,90	3,03	0,72	101	63,90	0,00	63,30	64,28	38	4,14	1,53	0,64	1,16	19- 4-1953

(\*) Gli accertamenti idrologici non sono stati espletati al completo perché, durante il recupero delle colonne di rivestimento il pozzo è rimasto ostruito.

(\*\*) Il pozzo, a partire da m 32,39 sotto la quota zero, ha attraversato costantemente roccia impermeabile, onde valgono i secondi valori di  $L'$ ,  $w$ ,  $\pi$  e  $\pi'$ .

Segue: Tabella III - Caratteristiche idrologiche dei pozzi di ricerca eseguiti in terra di Bari e nel Salento.

Numero dei pozzi	$q$	$s$	$L$	$L'$	$t$	$i$	$h$	$w$	$w'$	$\pi$	$\pi'$	$Q$	$d$	$R$	$Cl'$	$C$	Data delle misure
6 IV . . . . .	6.530	1.5	38	31.47	2.34	1.56	78	15.90	15.57	25.46	42.08	41	19.26	2.82	1.33	2.41	28- 1-1953
7 IV . . . . .	20.104	2	43.30	23.20	2.86	1.43	95.46	26.06	2.86	26.50	26.50	54	5.08	2.68	1.22	2.21	6- 3-1953
8 IV . . . . .	24.508	2.4	59.85	35.34	4.40	1.83	147	31.65	3.69	22.10	26.27	56	0.08	1.51	0.63	1.14	12- 4-1953
9 IV . . . . .	38.213	3.8	58.15	19.94	4.74	1.25	158	19.55	0.38	12.40	15.15	46	0.27	1.38	0.54	0.94	22- 5-1953
10 IV . . . . .	38.402	5	70	31.60	5.01	1.00	167	36.61	5.01	21.28	21.28	40	8.18	1.44	0.60	1.09	23- 6-1953
11 IV . . . . .	41.912	6.9	88.10	46.19	5.17	0.74	172	23.70	22.48	15.82	28.92	44	0.24	0.66	0.17	0.31	29- 7-1953
12 IV . . . . .	30.488	6	144	113.51	5.18	0.86	173	14.50	99.01	19.62	66.65	48	0.85	3.55	1.56	2.83	14-10-1953
13 IV . . . . .	16.926	2	148.30	131.37	4.86	2.43	162	7.30	124.07	19.14	81.54	10	26.20	4.41	2.03	3.69	27- 9-1953
1 V . . . . .	25.882	2.8	269.80	243.91	5.48	1.95	183	66.30	177.62	13.26	132	8	29.40	4.64	1.94	3.52	2-10-1952
3 V . . . . .	23.487	3.4	344.20	320.71	7.78	2.29	260	9.60	311.11	—	123	54	1.00	7.01	3.12	5.66	22- 7-1952
4 V . . . . .	47.789	6	550.20	502.41	3.03	0.51	101	65.20	347.21	—	485	6	18.20	22.50	11.18	20.302	20- 1-1953
5 V . . . . .	20.584	0.3	98.10	77.51	3.43	9.81	114	6.30	71.21	14.6	68.66	54	0.50	2.82	1.07	1.94	24- 9-1952
6 V . . . . .	20.056	1.8	34.35	14.29	4.45	2.47	148	14.15	0.14	9.54	12.26	58	0.68	2.52	1.09	1.98	21-10-1952
7 V . . . . .	32.121	2.5	215.25	183.12	1.32	0.58	44	184.45	1.32	—	432	20	4.20	2.85	1.17	2.12	24- 1-1953
8 V . . . . .	48.640	4.5	158.70	110.06	6.19	1.37	206	80	30.06	45.53	54.7	trasc. forte	0.19	0.014	0.025		17- 4-1953
9 V . . . . .	62.008	8.7	110.15	48.14	6.10	0.70	204	48.15	0.00	23.66	25.87	32	1.60	1.25	0.45	0.81	24- 3-1953
10 V . . . . .	45.895	8.2	99.95	54.05	6.18	0.75	206	48.85	5.20	24.30	28.35	38	3.25	0.97	0.29	0.53	24- 5-1953
1 VI . . . . .	35.417	4.4	58.60	23.18	2.20	0.50	73	11.60	11.58	18.16	33.75	48	0.35	10.30	4.85	8.81	18- 8-1951
3 VI . . . . .	19.04	0.9	49.80	30.76	1.04	1.1	35	30.30	0.46	87.72	88.23	58	1.35	10.20	4.96	9.01	16- 7-1951
5 VI . . . . .	25.160	2	53.70	28.54	1.16	0.58	29	24.70	3.84	70.25	73.95	57	2.85	7.95	3.75	6.81	21- 7-1951
6 VI . . . . .	9.739	1	83.40	73.66	0.69	0.69	23	71.40	2.26	34.42	31.38	33	9.80	3.76	1.68	3.05	27- 6-1951
8 VI . . . . .	11.09	0.6	41.55	30.46	1.29	2.15	43	9.55	20.91	43.23	71.68	59	3.70	4.46	2.05	3.72	29- 5-1951
9 VI . . . . .	36.27	4	53.10	16.83	2.52	0.63	84	19.35	2.52	22.36	22.36	45	0.40	1.90	0.88	1.60	24- 4-1951
10 VI . . . . .	17.91	2.3	45.30	27.39	0.21	0.09	7	4.70	22.69	—	383	48	4.80	2.1	0.90	1.63	15- 1-1951
11 VI . . . . .	31.23	5	65.00	33.77	2.58	0.52	86	11.50	22.27	18.04	41.03	48	1.60	1.50	0.48	0.87	7- 4-1951
12 VI . . . . .	20.16	2.5	68	47.84	2.39	0.95	79	5.50	42.34	14.76	61.26	54	6.80	4.03	1.66	3.01	4- 4-1951
13 VI . . . . .	11.06	2	64.20	53.14	2.43	1.21	81	8.20	45.94	23.38	66.60	3	18.10	4.42	1.81	3.29	13- 4-1951
14 VI . . . . .	6.03	0.7	99.20	93.17	1.39	1.85	46	5.40	87.77	—	198	53	4.70	44.64	21.65	39.32	18- 5-1951
15 VI . . . . .	9.609	0.9	66.00	56.39	2.11	2.34	70	6.60	49.79	32.65	81.12	52	20.60	4.60	2.28	4.14	26- 4-1951

- raggruppati in sei lotti, di cui uno (il VI) è rappresentato dall'Agro Brindisino.
- q Quota del boccapozzo. Questa risulta determinata, per mezzo di livellazioni di precisione, relativamente alla quota zero dell'Istituto Geografico Militare.
- s Distanza minima dalla linea di spiaggia, in km.
- L Profondità del pozzo a partire dal piano campagna, in m.
- L' Profondità del pozzo, a partire dalla quota zero dell'I.G.M. in m.
- t Livello statico dell'acqua di falda, riferita alla quota zero, in m.
- i Valore medio approssimato della cadente piezometrica, dato da  $t/s$ , in m/km. Questa quantità dipende, per la legge di Darcy, esclusivamente dalla permeabilità del mezzo e dalla portata della falda affluente verso il mare.
- h Profondità della «interfaccia», riferita al l.m.m., in condizioni di equilibrio statico. Non disponendo di misure riferite al vero l.m.m., è stato necessario dedurre  $h$  dal valore di  $t$ , riferito alla quota zero dell'I.G.M. Tale artificio conduce, in qualche caso, ad errori notevoli. In base alla legge di GHYBEN ed HERZBERG e tenuto conto delle densità medie del mare Adriatico e del mar Jonio (vedi tabella II), si è ritenuto  $h = t/0,03$ .
- w Penetrazione del pozzo nella «falda profonda», in m. Se il pozzo è freatico, risulta  $w = L' + t$ .
- w' Lunghezza del tratto di pozzo compreso fra il l.m.m. (considerato per semplicità coincidente con la quota zero) e il tetto della falda. Tale distanza, valutata in m, risulta positiva se la falda si rinviene sotto il l.m.m. Una condizione necessaria, ma non sufficiente, perchè la «falda profonda» sia freatica è che  $w$  assuma valori negativi.
- $\pi$  Penetrazione effettiva del pozzo nella «falda profonda», in % della potenza della falda lungo l'asse del pozzo. Risulta pertanto  $\pi = 100 w/(h-w)$ . Se  $w' > h$ , la quantità  $\pi$  perde ogni significato.
- $\pi'$  Penetrazione del pozzo nella falda, considerata non in pressione. Risulta:  $\pi' = 100 (L' + t)/(h + t)$ . Ovviamente, per pozzi freatici vale  $\pi = \pi'$ . Per pozzi che attraversano la «interfaccia» risulta  $\pi' > 100\%$ .
- Q Portata del pozzo, in l/sec. Trattasi della massima misura di portata cui è stata spinta la curva caratteristica del pozzo.
- d Depressione in m, relativa alla portata misurata Q.
- R Residuo salino a 110° dell'acqua emunta con la portata Q, in g/l.
- Cl<sup>-</sup> Contenuto del cloroione, in g/l.
- C Contenuto salino di una miscela acqua pura - acqua di mare, avente uguale Cl<sup>-</sup>. Risulta, da una tabella dello SVERDRUP [10],  $C = 1,816 Cl^-$ . Nell'ipotesi semplicistica che il contenuto salino C abbia avuto origine, nell'acqua del pozzo, totalmente dal miscelamento o dalla diffusione dei sali contenuti nell'acqua di mare, la restante parte di sali  $R - C$  deve necessariamente provenire dalle acque vadose.

Data delle misure - E' utile, per gli elementi elencati, fare riferimento alla data in cui sono state effettuate le

misure, poichè, come dianzi si è detto, tali elementi sono variabili nel tempo.

Dalla tabella III si rileva che la cadente piezometrica della falda assume valori molto bassi, oscillando prevalentemente fra  $0,5 + 2\%$ . Le portate emunte dai singoli pozzi sono quasi sempre notevoli, il che sta a dimostrare la grande permeabilità delle formazioni calcaree interessate dalla circolazione acquifera. Il contenuto salino C non è mai nullo: esso frequentemente assume, per i pozzi ben riusciti, valori compresi fra  $0,5 + 2,00$  g/l, il che è da attribuire fondamentalmente ai fenomeni di «trasmissione alina» dell'acqua del mare nelle acque di falda sovrastanti, indipendentemente da qualsiasi ordine di fenomeni di miscelamento di natura idraulica. Anzi, in proposito, è opportuno osservare che il tenore di salinità, trasmesso dall'acqua del mare alle acque dolci stagnanti su essa, sembra aumentare, bensì lentamente nel tempo, di talchè, nel fenomeno del galleggiamento di una falda acquifera sull'acqua di mare, ha un effetto preponderante il continuo rinnovarsi dell'acqua dolce ad opera degli afflussi di acque vadose provenienti dall'esterno.

In genere, essendo la ricerca acquifera in Puglia essenzialmente rivolta ai fini irrigui, si è portati a ritenere negativi quei pozzi che attingono ad acque aventi un contenuto di sali superiore a 3 g/l e che, pertanto, non si prestano alla utilizzazione irrigua, ovvero risultano idonei a tale scopo solo in alcune circostanze ben determinate [30]. In tal senso la tabella III mostra chiaramente che le indagini eseguite non hanno dato sempre risultati soddisfacenti.

Comunque, lasciando per ora da parte ogni considerazione di indole geochimica sulle acque profonde rinvenute nei pozzi elencati e limitandosi all'esame puro e semplice dei dati idrologici contenuti in detta tabella, si riscontra che, in genere, hanno un alto contenuto salino non soltanto le acque prelevate da pozzi penetranti nell'acqua salata di fondo ( $\pi > 100\%$ ), bensì anche quelle emunte da taluni pozzi parzialmente penetranti, ai quali corrispondono valori di  $\pi$  e  $\pi'$  sensibilmente inferiori a 100. Tale circostanza rappresenta una evidente dimostrazione del fatto che la irruzione nella falda profonda del «cono d'intrusione» di acqua marina si manifesta, in determinate condizioni di funzionamento di un pozzo, anche quando questo si mantiene a notevole distanza dalla «interfaccia».

E' opportuno a questo punto osservare che, nel caso generale di una falda in pressione, mentre la quantità  $\pi$  sta a indicare la effettiva penetrazione del pozzo nella falda, la quantità  $\pi'$ , se si riflette bene, è legata concettualmente sia alla pressione cui è sottoposta la falda al fondo del pozzo, sia alla distanza che intercorre fra questo e l'acqua salata. Si può anzi precisare che  $\pi'$  risulta proporzionale direttamente alla pressione al fondo del pozzo ed, in un certo modo, inversamente alla distanza fra questo e la «interfaccia». Pertanto, ritenendo genericamente e in senso lato applicabile la teoria dei sistemi a due fluidi, si può dire che, nell'ipotesi che si possa mantenere in un pozzo  $\pi'$  costante, con l'aumentare della penetrazione  $\pi$  diminuisce la «portata critica». Inversamente, con riferimento ad un valore costante di  $\pi$ , la «portata critica» diminuisce con l'aumentare di  $\pi'$ .

Ciò in effetti vuol dire che, a parità di  $\pi'$  e di un dato valore della portata  $Q$ , aumentando  $\pi$ , maggiore diventa la probabilità di irruzione del « cono d'intrusione » nella falda acquifera. La stessa cosa accade, tenendo fissi  $\pi$  e  $Q$  e supponendo di poter aumentare  $\pi'$ .

Tali considerazioni valgono naturalmente nell'ipotesi che la formazione calcarea fessurata presenti realmente una permeabilità uniforme lungo l'asse del pozzo, condizione questa piuttosto difficile a riscontrarsi in pratica. Ad ogni modo, in linea del tutto generale, è lecito affermare che, al fine di evitare l'irruzione del « cono d'intrusione » di acqua salata nella « falda profonda », ad alti valori di  $\pi'$  bisogna far corrispondere bassi valori di  $\pi$  e viceversa. Per pozzi freatici, per i quali vale  $\pi = \pi'$ , basta che  $\pi$  assuma valori convenientemente più bassi di 100.

In particolare dalla tabella III si nota che, fra i pozzi aventi valori di  $\pi$  e  $\pi'$  più o meno dello stesso ordine, risultano positivi ( $R$  minore di 3 g/l), con conveniente margine di sicurezza, quei pozzi ai quali corrispondono in genere valori di  $\pi$  e  $\pi'$  non superiori a 30 ÷ 35%. Esistono naturalmente non poche eccezioni a questa regola, rappresentate da pozzi che si arrestano col fondo in zone di roccia calcarea scarsamente fessurata. Questi, per quanto si è detto nelle pagine precedenti e come mostra la figura 8b, possono assumere penetrazioni talora relativamente notevoli, senza che il « cono d'intrusione » di acqua marina si sollevi fino a raggiungere il pozzo. E' questo probabilmente il caso dei pozzi N. 21 I, 5 II, 8 II, 5 III, 14 III e 2 IV, per i quali si è riscontrato un valore di  $R$  ovunque inferiore a 3 g/l. Non è da escludere altresì che, in qualche pozzo freatico, influisca sul contenuto salino dell'acqua emunta anche la particolare ubicazione della pompa sommersa lungo l'asse del pozzo, in quanto di solito questa va sistemata alla sommità della falda, di talchè vengono aspirati con maggior velocità i filetti fluidi provenienti dalla sommità delle pareti del pozzo, ove l'acqua è prevalentemente dolce.

Un caso eccezionalissimo è rappresentato dal pozzo N. 7 V, ove, nonostante il valore elevato di  $\pi' = 432$ , l'acqua prelevata ha un residuo  $R = 2,85$  g/l. Tale anomalia potrebbe attribuirsi al fatto che non tutte le fratture della roccia rinvenuta in profondità comunicano fra loro e che, pertanto, l'acqua marina di fondo resta quasi del tutto isolata dalle pareti del pozzo.

Al contrario si ritiene utile segnalare i pozzi N. 12 I e 1 VI per aver prelevata attraverso essi acqua eccessivamente salmastra, nonostante i bassi valori assunti dalle penetrazioni  $\pi$  e  $\pi'$ . In questi casi l'anomalia è da attribuire alla presenza di grosse fessure, di natura carsica, onde, al fine di abbassare il contenuto salino  $R$ , occorre ridurre  $\pi$  — eventualmente cementando il fondo del pozzo — e di conseguenza ridurre anche il valore della portata  $Q$ .

Sempre dall'esame della tabella III e, pertanto, con riferimento alla entità delle portate emunte dai pozzi in fase di ricerca (mediamente 20 ÷ 50 l/sec) si rileva che, ad evitare l'emungimento di acque eccessivamente salmastre, occorre che, quando  $\pi$  raggiunge valori dell'ordine del 45 ÷ 50%, la penetrazione nella falda si aggiri su valori non superiori al 20%, e quando  $\pi'$  raggiunge il 60%,  $\pi$  si mantenga inferiore al 10%. Qualche eccezione al riguardo può farsi, al solito, nel

caso che fra il fondo del pozzo e la zona dell'acqua salata esista uno schermo, costituito da roccia scarsamente fessurata, ovvero prevalentemente impermeabile. Così pare infatti che avvenga per il pozzo 18 II; in proposito è anzi opportuno segnalare che, dalla stratigrafia ottenuta nel perforare questo pozzo, è stato possibile scorgere che la « falda profonda », normalmente avente sede nei calcari del Cretacico, interessa, in corrispondenza di esso, anche taluni banchi fessurati di « pietra leccese », poggianti direttamente sui calcari cretatici, fenomeno questo già segnalato in precedenza da altri studiosi [31].

Fra i pozzi che, contrariamente alla regola dianzi esposta, hanno dato risultato soddisfacente si segnala ancora il pozzo 10 VI, il quale, con  $\pi' = 383$ , ha dato  $Q = 48$  l/sec,  $d = 4,8$  m,  $R = 2,1$  g/l. E' questo, in verità, un caso che converrebbe approfondire maggiormente attraverso ulteriori indagini, a dimostrazione del fatto che, quando il mantello di terreno impermeabile, ricopre la formazione rocciosa fessurata, si spinge fino a profondità inferiori alla posizione della « interfaccia » teorica, l'acqua di falda proveniente da monte, anzicchè aggirare lo sbarramento impermeabile per riversarsi ai bordi di esso a quota mare, scorre talvolta in pressione, sotto forma di un velo sottile a tetto dei calcari di base, dando luogo, in corrispondenza della costa, a vere e proprie sorgenti sottomarine. In tali condizioni accade quindi di prelevare frequentemente acqua dolce anche da pozzi aventi un valore di  $\pi'$  maggiore di 100: trattasi però quasi sempre di una situazione idrogeologica piuttosto instabile, che conviene scartare, ai fini della utilizzazione di acque profonde, dolci o appena salmastre. Esaminando infine i pozzi eseguiti con penetrazioni maggiori dei limiti dianzi stabiliti e che, pertanto, hanno dato alle prove di emungimento acque con residui salini superiori a 3 g/l, assegnamo alla categoria dei pozzi aventi valori di  $\pi$  non eccessivi e valori di  $\pi'$  troppo elevati i pozzi N. 5 I, 18 I, 26 II, 12 IV, 13 IV, 12 VI e 13 VI, per i quali è molto probabile si ottengano risultati migliori diminuendo ulteriormente  $\pi$  — con arretramento del pozzo per mezzo di cementazioni sul fondo — e nel contempo riducendo opportunamente le portate emunte e le depressioni adottate. Hanno invece entrambi i valori di  $\pi$  e  $\pi'$  troppo elevati i pozzi N. 13 I, 14 I, 9 III, 3 VI, 5 VI, 6 VI e 8 VI, onde anche per essi è possibile migliorare i risultati ottenuti solo riducendo convenientemente i valori delle penetrazioni e delle portate emunte.

Resta infine la categoria, piuttosto numerosa, dei pozzi penetranti nella zona invasa dall'acqua del mare ( $\pi' > 100\%$ ). Appartengono infatti ad essa i pozzi N. 17 I, 22 I, 3 II, 4 II, 11 II, 14 II, 16 II, 17 II, 19 II, 20 II, 1 III, 2 III, 3 III, 6 III, 10 III, 11 III, 1 IV, 1 V, 3 V, 4 V e 14 VI, per molti dei quali, come si rileva dalla tabella, risulta  $w' > h$ . Tali pozzi spesso hanno dato acqua con contenuto salino minore dell'acqua del mare, il che è perfettamente spiegato in base a quanto pocanzi si è detto circa la possibilità di scorrimento di acque dolci a quote inferiori a quelle della « interfaccia » teorica. Naturalmente, per i pozzi ora elencati, è vano sperare in un miglioramento, specie nel caso in cui sussiste  $w' > h$  (vedi figg. 1 e 2).

A completamento delle considerazioni di indole idrogeologica fin qui svolte ed allo scopo di chiarire ulte-

riormente l'origine della salinità nelle acque di falda esaminate, si riportano di queste, nella tabella IV, le analisi chimiche eseguite nel Laboratorio di Chimica Agraria della Università di Bari. Da queste analisi si deduce che, nelle acque, i cui contenuti salini sono dell'ordine di quello del mare, le percentuali di  $Cl^-$ , del gruppo  $SO_4^{--}$ , del sodio e del potassio sono assai prossime ai corrispondenti valori della normale acqua del mare, mentre se ne discostano sensibilmente, in più o in meno, il calcio e il magnesio, e ciò per le ragioni precedentemente illustrate circa i fenomeni di scambio-base con le formazioni rocciose. Quando invece le acque sono leggermente salmastre, le percentuali dei singoli componenti risentono fortemente degli apporti salini da parte delle acque vadose e pertanto si discostano notevolmente da quelli dell'acqua di mare: nella maggior parte dei casi però i rapporti di concentrazioni  $Cl^-/SO_4^{--}$  e  $Cl^-/(K^+ + Na^+)$  assumono valori sempre dello stesso ordine di quelli assunti nell'acqua del mare, il che rappresenta una riprova inequivocabile del fatto che la origine del contenuto salino delle acque sotterranee della Puglia sta prevalentemente nei fenomeni di trasmissione alina o di mescolamento idraulico fra la « falda profonda » e l'acqua del mare che invade il continente.

## Conclusioni

Le considerazioni fin qui svolte costituiscono il punto di partenza per gli ulteriori accertamenti e studi da compiere sui pozzi di ricerca della Puglia allo scopo di giungere alla massima utilizzazione delle acque profonde disponibili in tutto il sottosuolo pugliese, senza risentire gli effetti dannosissimi dell'intrusione d'acqua marina nella falda utilizzabile.

Eguale a quanto vien fatto in una comune ricerca di acque sotterranee, i capisaldi di riferimento, da anteporre ad ogni ulteriore studio sul fenomeno illustrato nel presente lavoro, sono i seguenti:

a) Delimitazione delle zone di assorbimento degli afflussi meteorici e dei gradi di deflusso delle varie regioni della Puglia. Questa determinazione implica fondamentalmente una serie di studi di carattere geolitologico nonché idrologico.

b) Accertamento delle variazioni di livello giornaliera della superficie piezometrica relativa alla falda profonda. In appositi « pozzi spia » è necessario pure misurare le oscillazioni di livello della « interfaccia ».

c) Controllo degli emungimenti dalla falda. E' opportuno che, nel primo periodo di osservazioni, le utilizzazioni siano ridotte al minimo.

d) Correlazione fra le oscillazioni dei livelli della falda e gli afflussi meteorici.

E' necessario inoltre, nel caso specifico, aggiungere le seguenti altre determinazioni:

e) Registrazione dei livelli del mare in più stazioni di misura, lungo il litorale adriatico ed jonico, e conseguente determinazione dello scostamento stagionale e annuale medio della quota zero dell'I.G.M. dal vero livello medio marino.

f) Tracciamento della « linea di spiaggia » effettiva, attraverso la determinazione delle cosiddette « curve

isocloriche ». Ciò vuol dire determinare, nella zona litoranea, il luogo dei punti ove si arresta il deflusso delle acque di falda e si rinviene esclusivamente l'acqua del mare che invade il continente. Più fratturate si presentano quindi le formazioni rocciose del litorale, maggiormente si addentra l'acqua del mare nella costa e, di conseguenza, più si scosta la « linea di spiaggia » effettiva da quella apparente.

Soltanto sulla base dei predetti accertamenti potranno giudicarsi i risultati ottenuti dal funzionamento simultaneo dei pozzi di ricerca, in varie condizioni di regime ed in periodi prolungati dell'anno.

La durata di detti accertamenti non sarà certo breve, in quanto, come si è ampiamente illustrato nelle pagine precedenti, le oscillazioni di livello statico della zona d'acqua marina, sottostante alla falda profonda, si risentono con notevole ritardo sulle cause che le determinano, il che complica notevolmente lo studio del fenomeno. Sembrano invece di determinazione molto rapida gli effetti dinamici, prodotti dall'emungimento da uno o più pozzi di una stessa zona, sulla irruzione del « cono d'intrusione » d'acqua salata nella falda utilizzabile.

Allo scopo di rendersi conto perfettamente dell'importanza degli accertamenti elencati, è bene tener presente che ad un abbassamento di un solo metro del livello statico della falda corrisponde nel tempo un sollevamento dell'acqua salata di oltre 32 m, il che potrebbe pregiudicare gravemente la utilizzazione di un intero sistema di pozzi, eseguiti con penetrazioni assegnate in base a livelli della falda più alti. Ad ogni modo, allo stato delle conoscenze attuali, è possibile affermare che ai pozzi di ricerca eseguiti in Puglia corrispondono in genere penetrazioni troppo spinte. Anche le depressioni adottate, durante le prove di emungimento, hanno raggiunto spesso valori troppo elevati.

E' naturale che, fisse restando le modalità di costruzione del pozzo, col ridurre la penetrazione di esso e la depressione nell'emungimento, diminuisce di conseguenza la portata emunta. Questa però, adottando particolari sistemi di costruzione del pozzo, può assumere egualmente valori elevati senza pregiudicare la qualità dell'acqua prelevata. E' interessante in proposito citare il caso di un pozzo eseguito nelle isole Hawaii, per approvvigionamento idrico potabile, dal quale si riescono ad emungere oltre 2 m<sup>3</sup>/sec di acqua dolce. Si tratta infatti di un pozzo che penetra per solo qualche metro nella falda soprastante all'acqua marina, diramandosi in profondità in una serie di gallerie filtranti orizzontali in varie direzioni [32].

Un artificio analogo è stato adottato nei bassipiani del Mudugh e della Migiurtinia in Somalia, ove, com'è noto, l'acqua dolce sotterranea è terribilmente scarsa e i suoi deflussi verso il mare sono notevolmente influenzati dalle oscillazioni delle maree [33]. Ciò induce, pertanto, ad includere fra le ricerche ancora da compiere sulle coste pugliesi l'esecuzione di gallerie filtranti, specie in quelle località del litorale ove è accertata la pratica impossibilità di utilizzazione di acqua dolce a mezzo di pozzi profondi, per la modesta profondità a cui si rinviene la zona dell'acqua salata.

Gli accertamenti e gli studi ancora da compiere sulle disponibilità di acqua sotterranea in Puglia rappresentano comunque delle ricerche molto scrupolose,

Tabella IV - Composizioni chimiche delle acque rinvenute nei pozzi (esprese in g/l).

Numero pozzo	R salino		pH	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>=</sup>	$\frac{Cl^-}{SO_4^-}$	CO <sub>3</sub> <sup>=</sup>	$\frac{Cl^-}{CO_3^-}$	Ca <sup>++</sup>	$\frac{Cl^-}{Ca^{++}}$	Mg <sup>++</sup>	$\frac{Cl^-}{Mg^{++}}$	Na <sup>+</sup>	K <sup>+</sup>	$\frac{Cl^-}{Na^{++}K^+}$	Non de. erminate
	110°	180°														
Mare (*)	—	35.314	7.80	19,498	2,722	7.16	0,133	146.6	0.42	46.42	1.305	14,94	10,844	0.39	1.74	—
5 I . . . . .	5,020	4,560	7,15	2,141	0,341	6,28	0,275	7,88	0,276	7,75	0,166	12,89	1,138	0,041	1,82	0,182
6 I . . . . .	1,760	1,551	7,50	0,709	0,124	5,72	0,169	4,20	0,141	5,03	0,075	9,45	0,312	0,011	2,19	0,010
7 I . . . . .	1,638	1,435	7,25	0,638	0,137	4,66	0,201	3,17	0,278	2,29	0,074	8,62	0,085	0,015	6,38	0,007
8 I . . . . .	2,144	2,054	7,25	0,900	0,142	6,34	0,239	3,76	0,151	5,96	0,089	10,11	4,63	0,051	1,75	0,019
9 I . . . . .	1,592	1,500	7,45	0,638	0,109	5,85	0,191	3,34	0,141	4,52	0,073	8,62	0,269	0,039	1,94	0,020
10 I . . . . .	2,192	2,061	7,45	0,945	0,153	6,18	0,191	4,95	0,151	6,26	0,095	9,94	0,451	0,045	1,90	0,030
11 I . . . . .	2,088	1,930	7,50	0,815	0,132	6,17	0,224	3,63	0,158	5,16	0,082	9,93	0,420	0,010	1,89	0,089
12 I . . . . .	3,828	3,572	7,60	1,684	0,256	6,58	0,238	7,07	0,183	9,20	0,133	12,66	0,915	0,034	1,77	0,129
13 I . . . . .	7,067	6,608	7,55	3,459	0,465	7,44	0,206	16,79	0,258	13,40	0,206	16,79	1,893	0,076	1,76	0,045
14 I . . . . .	8,126	7,510	7,30	3,900	0,552	7,06	0,221	17,65	0,259	15,06	0,272	14,33	2,099	0,088	1,78	0,119
15 I . . . . .	2,042	1,986	7,45	0,819	0,156	5,25	0,244	3,36	0,153	5,35	0,085	9,63	0,457	0,015	1,73	0,057
16 I . . . . .	11,394	10,356	7,50	5,638	0,780	7,23	0,229	24,62	0,317	17,78	0,366	15,40	2,850	0,118	1,90	0,058
17 I . . . . .	15,698	13,800	7,30	7,570	1,043	7,26	0,204	37,11	0,344	22,00	0,493	15,35	3,948	0,150	1,85	0,048
19 I . . . . .	0,646	0,620	7,30	0,070	0,076	9,21	0,249	0,28	0,106	0,66	0,053	1,32	0,038	0,020	1,21	0,008
21 I . . . . .	0,490	0,472	7,30	0,047	0,023	2,04	0,227	0,21	0,091	0,52	0,039	1,20	0,030	0,012	1,11	0,003
22 I . . . . .	5,948	5,279	7,15	2,695	0,403	6,69	0,200	13,47	0,191	14,11	0,187	14,41	1,479	0,070	1,74	0,054
23 I . . . . .	3,114	2,820	7,10	1,301	0,195	6,67	0,236	5,51	0,137	9,50	0,059	22,05	0,847	0,039	1,47	0,006
4 II . . . . .	21,416	19,420	7,40	10,652	1,229	8,67	0,122	87,31	0,500	21,30	0,634	16,80	5,676	0,245	1,80	0,362
5 II . . . . .	2,434	2,310	7,55	1,099	0,172	6,38	0,146	7,52	0,121	9,08	0,085	12,92	0,655	0,029	1,60	0,003
6 II . . . . .	1,836	1,668	7,60	0,766	0,083	9,23	0,155	4,94	0,121	6,33	0,072	10,63	0,427	0,037	1,65	0,007
7 II . . . . .	1,698	1,530	7,55	0,695	0,101	6,88	0,149	4,66	0,103	6,43	0,065	10,69	0,310	0,092	1,73	0,010
8 II . . . . .	1,090	1,040	7,30	0,439	0,074	5,93	0,144	3,04	0,089	4,93	0,033	13,3	0,177	0,015	2,29	0,069
10 II . . . . .	0,728	0,676	7,55	0,234	0,041	5,71	0,141	1,65	0,073	3,21	0,038	6,15	0,103	0,009	2,09	0,037
11 II . . . . .	39,438	36,440	7,55	20,123	2,799	7,19	0,089	226,1	1,389	14,48	1,198	16,79	10,251	0,589	1,99	0,002
12 II . . . . .	0,683	0,550	7,50	0,142	0,039	3,64	0,121	1,17	0,079	1,80	0,034	4,17	0,043	0,009	2,73	0,083
13 II . . . . .	0,615	0,560	7,55	0,145	0,337	0,63	0,162	0,89	0,076	1,91	0,063	2,30	0,017	0,021	3,82	0,039
15 II . . . . .	2,128	2,050	7,50	0,992	0,159	6,24	0,123	8,06	0,131	7,57	0,074	13,4	0,495	0,048	1,83	0,028
16 II . . . . .	2,824	2,651	7,50	1,356	0,185	7,33	0,120	11,3	0,123	11,02	0,082	16,53	0,748	0,027	1,75	0,010
18 II . . . . .	0,551	0,520	7,45	0,167	0,040	4,17	0,115	1,45	0,072	2,32	0,022	7,59	0,086	0,009	1,76	0,009
19 II . . . . .	10,892	9,685	7,35	5,212	0,741	7,03	0,106	49,16	0,286	18,22	0,318	16,38	2,882	0,105	1,74	0,035

20 II	31,600	29,612	7,55	15,815	2,218	7,13	0,097	163,03	0,709	22,31	0,945	16,73	9,286	0,406	1,63	0,136
21 II	0,261	0,254	7,35	0,039	0,013	3,00	0,017	2,3	0,071	0,55	0,010	3,90	0,012	0,001	3,00	0,001
22 II	0,370	0,329	7,45	0,042	0,040	1,05	0,097	0,43	0,068	0,62	0,038	1,10	0,021	0,008	1,75	0,020
26 II	3,609	3,378	7,40	1,727	0,275	6,26	0,125	1,38	0,159	18,5	0,112	15,4	0,928	0,043	1,78	0,009
30 II	1,639	1,550	7,40	0,691	0,126	5,49	0,168	4,11	0,113	6,11	0,073	9,45	0,359	0,018	1,83	0,002
1 III	4,653	4,261	7,85	2,155	0,288	7,48	0,155	13,90	0,121	17,80	0,169	12,75	1,191	0,124	1,64	0,058
2 III	36,390	33,680	7,75	18,581	2,551	7,28	0,080	232,2	0,679	27,36	1,040	17,86	10,194	0,463	1,74	0,092
3 III	42,940	39,820	7,30	21,631	2,971	7,28	0,080	270,38	1,449	14,93	0,656	32,97	12,331	0,471	1,69	0,231
5 III	1,634	1,546	7,80	0,699	0,091	7,68	0,160	4,37	0,091	7,68	0,065	10,75	0,389	0,005	1,77	0,046
6 III	40,740	37,598	7,60	20,690	2,838	7,29	0,081	255,43	0,573	36,10	1,163	17,79	11,725	0,439	1,70	0,089
7 III	0,637	0,627	7,55	0,184	0,046	4,00	0,167	1,10	0,079	2,33	0,037	4,97	0,105	0,006	1,66	0,003
8 III	0,371	0,366	7,35	0,058	0,017	3,41	0,158	0,37	0,072	0,81	0,036	1,61	0,009	0,012	2,76	0,004
9 III	7,630	7,038	7,60	3,688	0,520	7,09	0,159	23,19	0,206	17,90	0,240	15,37	2,025	0,081	1,75	0,119
10 III	27,280	25,310	7,45	13,90	1,933	7,20	0,100	139,00	0,550	25,27	0,854	16,28	7,583	0,367	1,75	0,023
11 III	22,03	—	7,35	10,87	1,817	6,72	0,147	73,94	0,543	20,00	0,729	14,91	7,80	0,340	1,33	—
12 III	0,516	0,500	7,50	0,085	0,056	1,52	0,181	0,47	0,086	0,99	0,040	2,12	0,039	0,011	1,70	0,002
13 III	0,739	0,640	7,40	0,184	0,043	4,28	0,157	1,17	0,092	2,00	0,048	3,83	0,058	0,009	2,75	0,049
1 IV	42,320	40,000	7,55	25,571	2,971	7,26	0,092	234,46	1,325	16,28	0,749	28,79	12,235	0,533	1,69	0,524
2 IV	2,654	2,456	7,30	1,177	0,180	6,54	0,172	6,84	0,127	9,27	0,096	12,26	0,634	0,035	1,76	0,035
4 IV	2,680	2,450	7,55	1,195	0,176	6,79	0,138	8,66	0,139	8,60	0,102	11,71	0,592	0,034	1,91	0,074
5 IV	1,530	1,488	7,60	0,645	0,119	5,42	0,180	3,58	0,119	5,42	0,066	9,77	0,348	0,005	1,83	0,006
6 IV	2,822	2,722	7,55	1,329	0,220	6,04	0,162	8,20	0,141	9,42	0,120	11,07	0,665	0,016	1,87	0,039
7 IV	2,682	2,424	7,60	1,217	0,181	6,72	0,140	8,69	0,150	81,13	0,096	12,67	0,622	0,012	1,92	0,006
8 IV	1,514	1,468	7,45	0,634	0,119	5,33	0,175	3,62	0,117	5,42	0,061	10,39	0,349	0,005	1,79	0,008
9 IV	1,377	1,275	7,40	0,538	0,098	5,49	0,166	3,24	0,105	5,12	0,059	9,12	0,290	0,001	1,84	0,018
10 IV	1,440	1,409	7,40	0,601	0,084	7,15	0,175	3,43	0,117	5,14	0,064	9,39	0,305	0,006	1,83	0,057
11 IV	0,660	0,596	7,55	0,170	0,076	2,24	0,149	1,14	0,068	2,50	0,064	2,66	0,057	0,007	2,65	0,005
12 IV	3,549	3,171	7,30	1,560	0,253	6,17	0,188	8,30	0,156	10,00	0,128	12,19	0,833	0,038	1,79	0,015
13 IV	4,409	4,156	7,45	2,032	0,348	5,84	0,185	10,98	0,166	12,24	0,144	14,11	0,123	0,049	11,8	0,109
1 V	4,640	4,128	7,25	1,943	0,481	4,04	0,218	8,91	0,324	6,00	0,174	11,17	0,922	0,058	1,98	0,008
3 V	7,010	6,610	7,05	3,120	0,585	5,33	0,252	12,38	0,414	7,54	0,246	12,68	1,905	0,069	1,58	0,019
5 V	2,820	2,432	7,60	1,071	0,289	3,71	0,149	7,19	0,200	5,35	0,113	9,48	0,492	0,022	2,08	0,096
6 V	2,520	2,365	7,55	1,092	1,187	5,83	0,175	6,24	0,126	8,67	0,091	12,00	0,586	0,048	1,72	0,060
9 V	1,254	1,014	7,35	0,450	0,077	5,84	0,069	6,52	0,112	4,02	0,055	8,18	0,214	0,019	1,93	0,018
10 V	0,972	0,882	7,35	0,294	0,055	5,34	0,208	1,41	0,105	2,80	0,064	4,59	0,134	0,001	2,18	0,021

(\*) I dati si riferiscono ad un campione di acqua marina normale con clorinità 19.

che vanno curate, seguite ed elaborate attentamente. Una errata valutazione di detti accertamenti potrebbe far nascere fatalmente nel tempo la paradossale convinzione che le «acque profonde» della Puglia sono tutte salate e, pertanto, non utilizzabili.

Bari, 15 marzo 1955.

## Bibliografia

- [1] E. P. L.: *Attività dell'Ente per lo sviluppo della irrigazione e la trasformazione fondiaria in Puglia e Lucania* (a cura di MANGANO G.). Relazione presentata al II Congresso Internazionale delle Irrigazioni e delle Bonifiche, Algeri, 1954.
- [2] UNESCO: *L'hydrologie de la zone aride*. Paris, 1952.
- [3] TOLMAN C. F.: *Ground water*. New York, 1937.
- [4] LEGGETT R. F.: *Geology and Engineering*. New York, 1939.
- [5] DESIO A.: *Geologia applicata all'ingegneria*. Milano, 1949.
- [6] PENTA F.: *Lezioni di geologia applicata*. Vol. II, Roma, 1950.
- [7] BROWN R. H. and PARKER S. G.: *Salt Water Encroachment in Limestone at Silver Bluff, Miami, Florida*. Economic Geology, vol. XL, n. 4, 1945.
- [8] MIN. LAV. PUBBL. (SERV. IDROGR.): *Le acque sotterranee in Italia*. Fasc. I° (Regione Pugliese), Roma, 1935.
- [9] SENSIDONI F.: *Contributo al problema idrico nelle regioni costiere a clima caldo-arido*. Giorn. del Genio Civile, fasc. I°, 1945.
- [10] VERCELLI F.: *Il mare, i laghi, i ghiacciai*. Torino, 1951.
- [11] FOX S. C.: *The Geology of water supply*. London, 1949.
- [12] MUSKAT M.: *The flow of homogeneous fluids through porous media*. Arbor (Michigan), 1946.
- [13] MUSKAT M. and WYCKOFF R. D.: *A.I.M.E.* 114, Pet. Dev. Techn., 1935.
- [14] POLAND J. E. and MORRISON R. B.: *An electrical resistivity-apparatus for testing well-water*. Trans. Amer. Geophys. Union, part. I, 1940.
- [15] JACH R. L.: *The composition of water of the Great Australian Artesian Basin in South Australia and its significance*. Trans. Roy. Soc. S. Aust., vol. 47, 1923.
- [16] SACCO F.: *La Puglia, schema geologico*. Boll. Soc. Geol., vol. XXX, Roma, 1911.
- [17] LAZZARI A.: *Sulla probabile presenza dell'Eocene nelle Murge baresi*. Boll. Soc. Naturalisti, vol. LXI, Napoli, 1952.
- [18] PENTA F.: *I materiali da costruzione dell'Italia Meridionale*. «Fondazione Polit. del Mezzogiorno», Napoli, 1935.
- [19] D'ERASMO G.: *Il mare pliocenico nella Puglia*. Memorie geologiche e geografiche di G. Dainelli, Firenze, 1924.
- [20] MONCHARMONT ZEI M.: *La microfauna delle argille pleistoceniche di Cutrofiano (Lecce)*. Boll. Soc. Naturalisti, Napoli, vol. LXIII, 1954.
- [21] COTECCHIA V.: *Osservazioni geologiche e materiali naturali per la fabbricazione di cemento e laterizi nella zona di Galatina (Lecce)*. Annali della Facoltà di Ingegneria, Bari, vol. I, 1953.
- [22] CERRUTI A.: *Ulteriori notizie sulle sorgenti sottomarine (citri) del Mar Grande e del Mar Piccolo di Taranto e sulla loro eventuale utilizzazione*. Boll. Pesca, Piscicoltura e Idrobiologia, anno XXIV, vol. III, fasc. I, 1948.
- [23] HUBBERT M. K.: *The theory of ground water motion*. The Journal of Geology, 1940.
- [24] MIN. LAV. PUBBL. (SERV. IDROGR.): *Le sorgenti italiane (Regione Pugliese)*.
- [25] KELLEY W. P. and LIEBIG G. F.: *Base exchange in relation to composition of clay with special reference to effect of sea water*. Bull. Amer. Assoc. Petr. Geol., v. 18, 1934.
- [26] BAVER L. D.: *Soil Physics*. London, 1948.
- [27] REVELLE R.: *Criteria for recognition of sea water in ground-waters*. Trans. Am. Geophys. Union (Papers, Section of Hydrology), 1941.
- [28] PENTA F.: *Le terre bianche delle Isole Pontine*. L'industria Mineraria di Italia e d'Oltremare, fasc. 1-3, 1938.
- [29] IPPOLITO F.: *Primi risultati delle ricerche di acque profonde nel Tavoliere di Foggia*. Geotecnica, n. 2, 1954.
- [30] BOTTINI O. e LISANTI L.: *Ricerche e considerazioni sull'irrigazione con acque salmastre praticata lungo il litorale barese*. Annali della Sperimentazione Agraria, Roma, 1954.
- [31] DE GIORGI C.: *Descrizione geologica e idrografica della provincia di Lecce*. Lecce, 1922.
- [32] MEINZER O. E.: *Geology and Engineering in the production and control of ground water*. Nel vol.: «Application of Geology to engineering practice», The Geological Society of America, 1950.
- [33] AHRENS T. P.: *A reconnaissance ground-water Survey of Somalia, East Africa*. Report of an E. R. P. technical assistance Mission under the auspices of the Italian Government, Rome, 1951.

RESUME: Dans la première partie l'Auteur expose les fondements géo-hydrologique et hydraulique du phénomène, donnant les limites de validité de la théorie de GHYBEN et HERZBERG. Ensuite il examine les aspects généraux du pompage de puits qui affectent les «systèmes à deux fluides» et des conséquents déplacements de la surface de separation de l'eau douce de l'eau de mer («interfaccia»).

Dans la seconde partie l'Auteur, après une brève description géologique et hydrogéologique de la région de Bari et de la presqu'île Salentina, examine la géochimie des eaux souterraines contenues dans le sous-sol de la Pouille. Ensuite il démontre que les observations théoriques développées dans la première partie s'adaptent aux recherches courantes inhérentes l'utilisation du «délit profond» contenu dans les formations calcaires crevassées de la Pouille.

Enfin il établit les critères à suivre dans l'achèvement des recherches.

SUMMARY: In the first part of this work the Author explains the geohydrologic and hydraulic principles of the phenomenon, giving the limits of validity of the GHYBEN and HERZBERG theory. Afterwards he deals with the general problems of the pumping out of wells affecting (or concerning?) the «two fluids system» and of the resulting displacements of the surface separating freshwaters from sea-waters («interfaccia»).

In the second part the Author, after a brief geologic and hydrogeologic description of the country of Bari and of the Salentina Peninsula, deals with the geochemistry of the underground waters of Puglia. Then he points out that the theoretical considerations of the first part suit well the current research on the utilization of the «deep layer» contained in the fractured calcareous formations of Puglia.

At last he establishes the criteria to follow in completing this research.