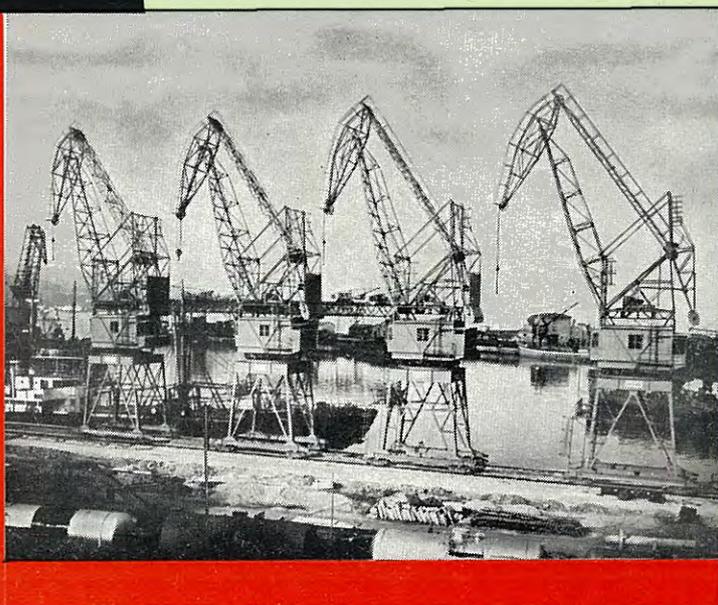


# GEO TECNICA

**GEOLOGIA TECNICA - FONDAZIONI  
COSTRUZIONI DI TERRA**

RIVISTA TECNICA BIMESTRALE  
ORGANO DELL'ASSOCIAZIONE GEOTECNICA ITALIANA

impianti  
sollevamento  
e  
trasporto



- Gru e carriponte di ogni tipo e portata.
- Trasportatori a nastro di gomma di ogni portata e lunghezza.
- Trasportatori a piastre metalliche, raschianti, a rastrelli ed a tazze oscillanti.
- Trasportatori micrometrici e a scosse.
- Trasportatori — elevatori mobili.
- Coclee.
- Elevatori a tazze.
- Frantoi e granulatori primari e secondari.
- Vibrovagli di qualsiasi dimensione e per qualsiasi qualità di materiale.

**Officine Meccaniche di Savona**

**SERVETTAZ - BASEVI**

CASELLA POSTALE 487 - GENOVA

**DIRETTORI:**

**ARRIGO CROCE  
FELICE IPPOLITO**

**In questo numero:**

**F. Penta:** Frane e cedimenti dovuti a plasticità ed a «fluidità» del sottosuolo

**V. Cotecchia:** Sviluppi della teoria di Ghyben ed Herzberg nello studio idrogeologico dell'alimentazione e dell'impiego delle falde acquifere, con riferimento a quella profonda delle Murge e del Salento.

**M. Beomonte, E. Taroni:** Su alcuni sistemi di ancoraggio della roccia per il sostegno della volta nella costruzione di una galleria

**Recensioni:**

**K. Köhler:** Il Laboratorio Geotecnico del Servizio Geologico Statale di Berlino Est e la sua collaborazione nello studio dei problemi di ingegneria (F. PENTA)

**Bibliografia**

**6**

NOVEMBRE-DICEMBRE

ANNO V - 1958

EDIZIONE



MILANO

ISTITUTO PROPAGANDA INTERNAZIONALE

SVILUPPI DELLA TEORIA DI GHYBEN ED HERZBERG  
NELLO STUDIO IDROGEOLOGICO DELL'ALIMENTAZIONE  
E DELL'IMPIEGO DELLE FALDE ACQUIFERE,  
CON RIFERIMENTO A QUELLA PROFONDA DELLE  
MURGE E DEL SALENTO

# SVILUPPI DELLA TEORIA DI GHYBEN ED HERZBERG NELLO STUDIO IDROGEOLOGICO DELL'ALIMENTAZIONE E DELL'IMPIEGO DELLE FALDE ACQUIFERE, CON RIFERIMENTO A QUELLA PROFONDA DELLE MURGE E DEL SALENTO

V. COTECCHIA (\*)

**SOMMARIO:** Tenuto conto delle notevoli difficoltà relative allo studio teorico dell'equilibrio di una falda acquifera costiera, nelle condizioni rispondenti alla teoria di GHYBEN ed HERZBERG, nei riguardi dei ravvenamenti, dei deflussi e degli emungimenti, l'A. prende spunto da talune circostanze idrogeologiche e idrologiche riscontrate nel comportamento della "falda profonda" delle Murge e del Salento, e delle manifestazioni sorgentizie a questa connesse per tracciare, sia pure in forma descrittiva, le linee fondamentali del fenomeno, il cui discernimento è di estremo interesse ai fini del razionale impiego di risorse idriche sotterranee in siffatte condizioni. Particolare rilievo assume in tale studio la "isteresi" con la quale gli spostamenti in verticale della superficie di separazione dell'acqua dolce da quella del mare ("interfaccia") seguono alle variazioni di livello della superficie piezometrica della falda stessa.

Infine l'Autore fornisce alcuni brevi ragguagli in merito alle disponibilità della "falda profonda" della penisola Salentina, sulle quali è possibile oggi contare a seguito dei fenomeni esposti.

## 1 - Premessa

Nel fascicolo n. 3 del volume 2° di questa Rivista chi scrive dava alle stampe nel 1955 uno studio dal titolo: « *Influenza dell'acqua marina sulle falde acquifere in zone costiere, con particolare riferimento alle ricerche di acqua sotterranea in Puglia* ». In tale studio venivano posti in luce gli aspetti idrogeologici e geochimici derivanti dalla particolare disposizione di talune falde acquifere laddove l'acqua del mare invade intere regioni con funzione di superficie di fondo pressoché *definita e variabile* di siffatte falde, fenomeno questo per la prima volta reso noto nel 1900 da GHYBEN ed HERZBERG.

In particolare, trattandosi di falde sostenute alla base da acqua marina, si faceva notare come il fenomeno dell'emungimento da un pozzo andasse riguardato in maniera ben diversa da quanto risulta noto per i sistemi filtranti permeati da un solo liquido, di determinata densità. Detto problema, inerente più propriamente all'equilibrio dinamico di sistemi a due liquidi di diversa densità, rappresenta indubbiamente uno dei punti delicati nell'impiego di falde di questo genere.

In seguito a tale emungimento si manifesta infatti, in corrispondenza della base di ciascun pozzo, un sollevamento di forma conica — definito, nel lavoro so-

pra citato, *cono d'intrusione marina* — dell'acqua di mare sottostante alla superficie di fondo della falda, cosicché, se si considera la forma assunta dalla *interfaccia* durante l'emungimento da più pozzi e nel caso di sensibili distanze fra pozzo e pozzo, essa si presenta pressapoco come nella Fig. 1, laddove in un certo senso può ritenersi che il livello regionale dell'*interfaccia* resti invariato, salvo i locali sollevamenti dovuti ai coni d'intrusione marina nella falda. Le variazioni nei livelli dell'*interfaccia*, prodotte sotto forma di coni dal funzionamento di ciascun pozzo, hanno pertanto un carattere puramente locale, anche se in qualche caso si raggiunge l'irruzione dell'acqua marina nel pozzo.

Trattasi in sostanza di sollevamenti della *interfaccia* prodotti in misura diversa e istantaneamente dal nuovo equilibrio statico e dinamico derivante dall'emungimento attraverso pozzi. Solo da un emungimento in forma continua, attraverso la sottrazione progressiva di acqua alla riserva costituente l'intera falda di acqua dolce ed il conseguente abbassamento regionale dei livelli statici di essa, si realizza nel tempo un sollevamento regionale dell'*interfaccia*, fenomeno questo di interesse fondamentale ai fini della valutazione dei possibili impieghi di falde così fatte.

Nello studio già pubblicato veniva chiaramente dimostrato come la possibilità di estrarre dai pozzi determinate portate d'acqua con contenuto salino accettabile, ai fini irrigui o potabili, fosse strettamente legata alla posizione della *interfaccia* in relazione con

(\*) Prof. Ing. Vincenzo COTECCHIA, docente di *Geologia Applicata* presso la Università di Bari.

la profondità raggiunta dal pozzo. Questo è uno degli aspetti principali di dette falde, il cui impiego si rende estremamente più complicato di quanto si verifichi per falde comuni, aventi come « *superfici di fondo* » dei piani definiti e fissi, rappresentati da formazioni rocciose impermeabili.

Ovunque fino ad oggi si sia proceduto nel mondo alla utilizzazione di falde acquifere, l'esperienza mostra che si è verificato un abbassamento progressivo dei livelli statici, e ciò perché raramente è stato possibile imporre alle utilizzazioni un limite in relazione alle esatte possibilità di ricarica delle falde stesse. Nei casi di falde più comuni, l'unica conseguenza verificatasi è consistita nel progressivo impoverimento delle disponibilità acquifere (1). In casi di falde di regioni costiere, adagiate su acqua marina, il risultato è stato invece ben diverso: prima ancora che si verificasse un vero e proprio impoverimento della riserva acquifera, l'attingimento attraverso i pozzi, in un primo tempo soddisfacente ai fini della qualità delle acque estratte, ha portato alla superficie acque eccessivamente salmastre, con il risultato che detti pozzi sono stati definitivamente abbandonati (2).

Premesso ciò, è evidente la necessità assoluta di studiare siffatte falde nel loro complesso, impostandone l'equilibrio regionale in dipendenza del regime degli afflussi esterni, dei deflussi verso il mare e dei possibili emungimenti, argomento questo il cui studio abbisogna di una gran messe di dati, misurazioni e registrazioni a carattere idrologico, sia pure per giungere a risultati aventi un carattere puramente indicativo.

Allo stato delle conoscenze attuali, le caratteristiche geoidrologiche di falde nelle condizioni su indicate e le modalità con cui esse circolano e defluiscono lungo i bordi verso il mare sono tali da rendere veramente ardua una qualsiasi impostazione numerica di bilanci idrologici attendibili, onde giungere alla portata massima impiegabile attraverso pozzi e sorgenti. Impossibile appare altresì la risoluzione precisa di un così complesso problema, date le molte incognite che quasi sempre sussistono soprattutto relativamente alle periodiche variazioni di livello della *interfaccia*, in connessione con quelle dei livelli statici delle falde stesse.

Nel presente articolo andranno svolte pertanto delle considerazioni, in gran parte indicative o puramente illustrative, su questioni il cui discernimento preciso deve essere, caso per caso, confortato da indagini

(1) A tal proposito LEGGET R. F., nel volume: " *Geology and Engineering* " (New York, 1939), riporta alcune registrazioni effettuate su falde sotterranee, di carattere regionale, di alcuni fra i bacini più importanti del mondo, interessati da pozzi: misure effettuate nello esteso Bacino Artesiano Australiano hanno dimostrato che la portata complessiva estratta da 223 pozzi del New South Wales è diminuita del 40% dal 1914 al 1928; nel grande Bacino Artesiano di Dakota (U.S.A.) la quota piezometrica della falda è diminuita, fra gli anni 1892-1923, da 175 a 24,5 m; nel Bacino di Parigi il livello statico della falda acquifera si è abbassato di 76 m in 93 anni; nel Bacino di Londra il livello statico della falda acquifera si è abbassato di 46 cm all'anno, a partire dal 1878.

(2) V. COTECCHIA: " *Influenza dell'acqua marina ecc...* " Loc. citata nel testo.

sistematicamente condotte e di lunga durata. A tali considerazioni si è potuto giungere sulla base di osservazioni concrete svolte sulla « *falda profonda* » contenuta in prevalenza nei calcari fratturati (forniti cioè di permeabilità in grande) del Cretacico della Puglia, le cui condizioni di giacitura rispondono perfettamente alla legge di equilibrio fra acqua dolce e acqua marina posta in luce da GHYBEN ed HERZBERG.



Fig. 1

In merito a tale falda, l'articolo già pubblicato e dianzi richiamato poneva in risalto l'efficacia delle ricerche idrologiche colà svolte di recente, attraverso una fitta rete di pozzi trivellati eseguiti dall'*Ente Irrigazione di Puglia e Lucania*, talché oggi di detta falda possono effettivamente ritenersi note l'estensione, la potenza, le caratteristiche chimiche e tutto quanto si riferisce in genere all'influenza idrologica che su essa esercita, in condizioni indisturbate, la presenza del mare che invade la regione.

Ritenendo quindi noto tutto quanto è stato dallo scrivente precedentemente già illustrato sull'argomento, viene qui preso in esame l'equilibrio all'alimentazione e ai deflussi della « *falda profonda* » delle Murge e del Salento, in quanto proprio da constatazioni pratiche e osservazioni specificamente condotte sull'equilibrio di tale falda sembrano derivare sviluppi e conseguenze della legge di GHYBEN-HERZBERG, in buona parte di validità generale (3).

Stante pertanto l'interesse di questo articolo fon-

(3) Nella bibliografia che si occupa dei fenomeni connessi alla teoria di GHYBEN - HERZBERG, ampiamente consultata da chi scrive, l'unico lavoro riferentesi in un certo modo a qualcuno degli aspetti che qui s'intende trattare è: WENTWORTH C. K., *Storage consequences of the Ghyben-Herzberg Theory* (Trans. Am. Geophysical Union, Part II, 1942).

In questo studio l'Autore considera un'isola circolare, di ampiezza e caratteristiche idrologiche pressapoco pari a quella del sistema artesiano di Honolulu, in merito alla quale tratta, brevemente e sotto un aspetto puramente teorico, principalmente il caso in cui, da uno stato di equilibrio raggiunto fra assorbimenti pluviometrici e deflussi della falda verso l'oceano, si raddoppia improvvisamente e per la durata di sei mesi l'alimentazione della falda. L'Autore mostra quanto lentamente il volume d'acqua, assorbito in più per la durata di sei mesi, si esaurisca scaricandosi nell'oceano. In particolare, del volume complessivo di  $m^3 45 \times 10^6$  assorbito in più, solo  $2,8 \times 10^6 m^3$  si scaricano nei primi due anni che seguono alla maggior ricarica.

Il WENTWORTH mostra pure gli effetti prodotti da una diminuzione improvvisa della ricarica alla falda e, a conclusione degli esempi trattati — dei quali riporta solo schemi diagrammatici senza peraltro fornire le operazioni di calcolo allo scopo svolte — sottolinea la estrema complessità dell'argomento, qualora si voglia tener conto di condizioni naturali, in cui gli elementi inerenti alla ricarica e ai deflussi della falda variano di continuo nel tempo.

damentalmente nei principi a carattere più generale che, dall'equilibrio fra acque dolci e salate, derivano agli effetti dell'equilibrio regionale di intere falde nelle sopra descritte condizioni, tutto quanto di numerico si assume relativamente alla falda della Puglia (altezze di pioggia, coefficiente d'assorbimento, portata delle sorgenti, ecc.) ha solo valore di ordine di grandezza, essendo ciò sufficiente in un problema di cui interessa soprattutto chiarire gli aspetti qualitativi.

## 2 - Alimentazione esterna della falda profonda delle Murge e del Salento

Ad una grossolana delimitazione dei tre bacini idrologici principali, di cui può ritenersi formata la intera regione in studio agli effetti della circolazione idrica sotterranea che dà luogo alla « falda profonda », si perviene facilmente sulla base del medio andamento riscontrato per le isopieziche, rilevate attraverso i livelli acquiferi nei pozzi della zona.

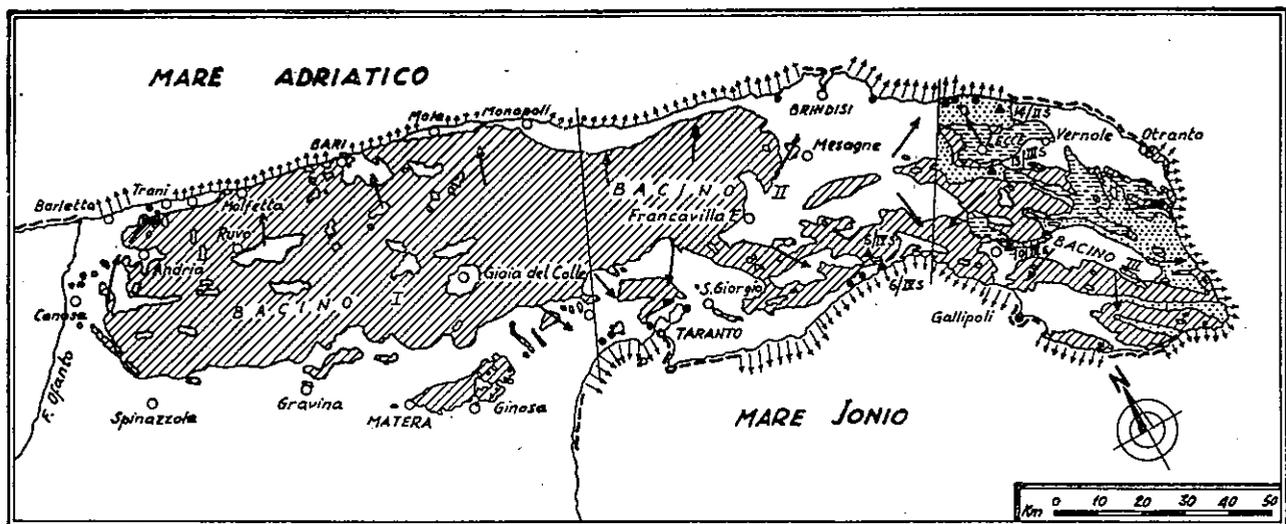
Infatti, come mostra lo schema di Fig. 2, mentre un primo bacino si individua nel grosso delle Murge, fino alla congiungente Taranto-Fasano, nella penisola Salentina propriamente detta vanno riconosciuti due altri bacini idrologici: quello di Brindisi-Taranto e quello di Lecce, rispettivamente da noi designati come 2° e 3° bacino. Nelle Murge di Martina Franca, Locorotondo e Francavilla Fontana (2° bacino), la falda profonda defluisce a NE verso il litorale adriatico di Ostuni e Brindisi, a SW verso il Mar Piccolo (Taranto) ed il litorale jonico di Taranto e Maruggio, ad ESE infine si dirige grosso modo verso quella strozzatura del Salento (fra porto Cesareo e T. Rinalda)

con la quale il Tavoliere di Lecce si divide dalla Piana Messapica. Nel bacino idrologico di Lecce (3° bacino) la falda profonda defluisce a sua volta su tre lati verso il mare e a NW in direzione della suddetta strozzatura.

Del grosso delle Murge, costituente a nostro avviso il primo bacino più a Nord, comprendente la Terra di Bari ed il litorale di Ginoza, benché di preciso poco si possa dire, data la scarsità dei dati inerenti ai livelli della falda profonda nell'interno della regione, sembra molto verosimile quanto indicato nello schema di Fig. 2, laddove si nota appunto che la falda in esame, mentre a NE defluisce verso l'Adriatico ed a SE verso lo Jonio, vada in parte ad alimentare il bacino idrologico di Taranto-Brindisi lungo un fronte che va da Massafra a Fasano, grosso modo orientato da NE a SW. In tali condizioni detto bacino risulterebbe quindi, a rigore, formante un tutt'uno col 2° bacino di Taranto-Brindisi.

Facendo riferimento quindi ai tre bacini idrologici descritti, occorre esaminare le zone di assorbimento delle precipitazioni atmosferiche, i coefficienti di assorbimento da assumere nei calcoli e l'entità delle precipitazioni stesse.

Di queste ultime considereremo in questa sede solo le piogge, pur essendo convinti che le cosiddette precipitazioni occulte, dovute in particolare nella Puglia alla condensazione diretta (rugiada) del vapore acqueo atmosferico sulle superfici aperte del suolo, giunte per irraggiamento a temperatura inferiore a quella del punto di saturazione del vapore stesso, rappresenti un fenomeno sensibile, la cui incidenza sulla alimentazione della falda non andrebbe certo trascurata in un calcolo più accurato.



FORMAZIONI PERMEABILI ATTRAVERSO LE QUALI SI RITIENE VENGA ALIMENTATA LA "FALDA PROFONDA":

 Affioramenti calcarei del Cretaceo

 Affioramenti di pietra leccese

 Affioramenti di calcare arenaceo a struttura tufacea (tufi)

DEFLUSSI DELLA "FALDA PROFONDA", VERSO IL MARE:

● Sorgenti principali

↗ Direzioni di deflusso

↑↑↑↑ Deflussi a pelo libero o in lieve pressione a poca distanza dalla costa

↑↑↑↑ Deflussi in pressione distanti dalla costa

--- Zone senza deflussi

▲ Pozzi di misure freaticometriche

Fig. 2

## Precipitazioni (4)

In merito alle precipitazioni che annualmente si verificano su tutta la Penisola Salentina, consultati ed esaminati i dati raccolti dal Servizio Idrografico di Stato e con essi la carta delle isoiete allegata alla pubblicazione dei dati trentennali di precipitazione 1921-50 del Servizio Idrografico di Bari (in corso di stampa) tracciata appunto sulla scorta delle medie trentennali di precipitazione, si riscontra che nella Penisola Salentina le quantità di precipitazione si distribuiscono in media in maniera diversa:

- a) sul complesso delle Murge;
- b) sul territorio compreso fra le congiungenti ideali Brindisi-Taranto e Gallipoli-Otranto;
- c) nella parte meridionale della Penisola Salentina.

Nella prima zona, infatti, le piogge non presentano una uniforme distribuzione, riscontrandosi, nella parte centrale di essa, dei valori di pioggia talvolta superiori ai 750 mm, mentre tanto sul versante adriatico che su quello jonico, verso cui degradano i rilievi delle Murge, detti valori vanno gradatamente diminuendo, secondo curve isoiete pressoché parallele alle coste, fino a raggiungere dei minimi rispettivamente di 600 e 500 mm.

Nella piana Salentina, compresa fra le congiungenti ideali di cui innanzi, le piogge presentano invece una distribuzione più che uniforme, risultando quasi ovunque i totali medi di precipitazione annua di poco superiore ai 600 mm. Nella parte più meridionale della Penisola si riscontra infine, contrariamente alle altre due zone, un centro di maggior rovescio, con valori di pioggia talvolta superiori agli 800 mm e variazione della stessa secondo curve isoiete concentriche.

Ma l'aspetto più interessante del regime pluviometrico della Regione sta nella distribuzione annuale delle piogge. Scorrendo infatti la raccolta dei dati trentennali, elaborati di recente dal Servizio Idrografico, si rileva innanzitutto come la maggiore quantità di precipitazioni annue si manifesta nel semestre ottobre-marzo, mentre assai scarsi risultano di contro gli afflussi nel semestre aprile-settembre.

Riguardo alla distribuzione mensile delle precipitazioni, si rileva poi che ovunque queste diminuiscono gradatamente dal gennaio al luglio, mese in cui di norma si registrano le minori quantità di pioggia, per poi gradualmente aumentare fino al mese di dicembre, allorché si registrano i più elevati totali mensili; così che, se riportati in un grafico, tali valori mensili danno origine ad una curva sinusoidale con un massimo in dicembre ed un minimo in luglio.

Pertanto così possono porsi in evidenza le caratteristiche pluviometriche generali della regione in studio:

- a) i totali annui di precipitazione risultano relativamente bassi;
- b) le precipitazioni che alimentano la falda di fondo sono precipuamente quelle che cadono nel se-

mestre ottobre-marzo, le quali costituiscono in media il 70% della precipitazione annua;

- c) l'andamento delle piogge, espresse in totali mensili, si identifica in una curva sinusoidale.

Orbene, sulla base di quanto sopra esposto, allo scopo di assumere nei calcoli, che si andranno a fare in merito all'alimentazione annua della falda in questione, elementi cautelativi, che peraltro semplifichino il ragionamento, si trascureranno del tutto gli afflussi pluviometrici del semestre aprile-settembre. Si farà riferimento poi, per quanto più propriamente riguarda l'idrologia sotterranea della regione, ai tre bacini sopra contraddistinti.

Inoltre, trattandosi di assumere nei calcoli le sole piogge che insistono sugli affioramenti calcarei assorbenti; per la gran parte del Cretacico, le medie piogge che interessano allo scopo devono riferirsi unicamente alle zone occupate da detti affioramenti. Pertanto, sulla base della carta geologica della regione e di quella delle isoiete del Servizio Idrografico, si sono ottenuti i valori medi che qui si espongono, tralasciando per brevità le operazioni di calcolo per esse svolte:

1° Bacino (Murge della Terra di Bari e di Ginosa)	mm 680
2° Bacino (Brindisi-Taranto)	» 680
3° Bacino (Lecce)	» 730

Di tali precipitazioni medie annue, da calcoli eseguiti, risulta che nel semestre ottobre-marzo cadono rispettivamente per il 1°, 2°, 3° bacino le seguenti aliquote: 69%, 79% e 78%.

## Assorbimenti

Agli effetti dell'alimentazione della falda profonda, contenuta nei calcari del Cretacico, occorre qui premettere che, fra le rocce permeabili post-cretaciche, vanno prese in considerazione unicamente quelle formazioni poste a diretto contatto con i calcari di base, vale a dire cioè capaci di alimentare la falda di fondo contenuta in detti calcari.

Per maggiore chiarezza citiamo, ad esempio, il caso dei terreni sabbiosi e ghiaiosi pleistocenici, posti su vasta estensione a ridosso di Brindisi. Orbene detti depositi di rocce porose risultano più o meno fortemente assorbenti. Essi sono però ovunque separati alla base dalla formazione calcarea fessurata del Cretacico, per mezzo di argille sabbiose grigio-azzurre pleistoceniche, onde gli assorbimenti pluviometrici vanno ad alimentare alcune falde superficiali, la cui superficie di fondo è rappresentata da dette argille e che pertanto nulla hanno a che vedere con la falda profonda in questione.

Analoghe considerazioni vanno svolte per molte placche formate da tufi calcarei assorbenti, affioranti sulle Murge. Una diversa constatazione è stata svolta invece recentemente sul comportamento idrologico dei calcari organogeni, a struttura tufacea, plio-pleistocenici del Basso Salento, affioranti esattamente entro il 3° bacino sopra delimitato: tali calcari, ove porosi e assorbenti, ove compatti, risultano spesso a diret-

(4) In merito a quanto qui si osserva sull'entità e sulla distribuzione delle precipitazioni nella regione pugliese, si ringrazia vivamente l'ing. R. LONOCE, ingegnere Capo della Sezione Idrografica di Bari, per le notizie cortesemente fornite.

to contatto con i calcari cretaci e interessati per la maggior parte da numerose fratture e vore carsiche, di talché sono da ritenersi, agli effetti dell'alimentazione della falda profonda, largamente assorbenti.

Eguale a contatto diretto con i calcari cretaci si rinvengono le arenarie calcaree del Miocene, note come « *pietra leccese* » e scarsamente permeabili (prevalentemente per fessure).

In definitiva, sulla base delle conoscenze acquisite da ricerche idrogeologiche appositamente svolte, possono ritenersi alimentanti con risurrezza la *falda profonda* nei primi due bacini idrologici sopra definiti, solo gli assorbimenti pluviometrici da parte dei calcari cretaci. Per il bacino di Lecce si ritengono invece assorbenti in misura diversa, oltre i calcari fessurati del Cretacico, anche le arenarie calcaree ed i calcari organogeni plio-pleistocenici, nonché la « *pietra leccese* ».

Per quanto si riferisce poi ai coefficienti di assorbimento di dette formazioni, una notevole incertezza sussiste ancora oggi in merito a tale argomento. Dell'assorbimento da parte di calcari fessurati in genere si sono occupati in verità molti studiosi, i quali hanno concordato, per calcari molto fessurati del tipo di quelli costituenti le Murge, valori del coefficiente di assorbimento dell'ordine del 50 e perfino del 60%.

Il Servizio Idrografico (5) ha ritenuto fra l'altro in passato che oltre il 25% delle precipitazioni annue venisse assorbito dall'intera Penisola Salentina, il che, ritenendo nullo lo assorbimento nel semestre aprile-settembre, equivale ad assumere, sull'intero territorio oggetto della ricerca, un coefficiente di assorbimento medio invernale (fra rocce fortemente o mediamente assorbenti e quelle non assorbenti per nul-

25

la) superiore al  $\frac{25}{0.70} = 36\%$ .

0.70

Di conseguenza si ritiene qui di assumere, cautamente, per i calcari cretaci fessurati, affioranti entro il 1° bacino, un coefficiente di assorbimento nel semestre autunno-invernale del 50%, e per il 2° e 3° bacino (Taranto-Brindisi e Lecce), laddove detti calcari con una morfologia più dolce risultano meno elevati e ricoperti quasi ovunque da vegetazione, un coefficiente pari al 45%.

Per quanto si riferisce ai calcari arenacei e organogeni a struttura tufacea del bacino di Lecce, dati i caratteri di rilevante permeabilità di essi (principalmente per la presenza di vore e fratture carsiche), si assume un coefficiente di assorbimento nel semestre ottobre-marzo pari al 50%. Per la *pietra leccese*, generalmente scarsamente permeabile per fessurazione, si assume infine un coefficiente di assorbimento pari al 10%.

Sulla base di quanto sopra esposto, si ottengono in definitiva gli assorbimenti elencati nella Tabella 1.

Dalla Tabella 1 risulta che l'alimentazione totale della *falda profonda* nell'intera regione in studio è pari a  $1664 \times 10^6$  m<sup>3</sup>.

(5) MINISTERO DEI LAVORI PUBBLICI - SERVIZIO IDROGRAFICO: *Le acque sotterranee in Italia* (Regione Pugliese).

TABELLA 1

Dati	1° Bacino (Bari-Ginosa)	2° Bacino (Taranto-Brindisi)	3° Bacino (Lecce)
Pioggia annua (media trentennale) in mm (p):	680	680	730
Aliquota di pioggia relativa al semestre ottobre-marzo (α):	0,69	0,72	0,78
Superficie affiorante dei calcari cretaci, in Km <sup>2</sup> (S <sub>0</sub> ):	3979	1620	737
Coefficiente di assorbimento dei calcari cretaci nel semestre ottobre-marzo (β <sub>0</sub> ):	0,50	0,45	0,45
Equivalente di detto coefficiente considerato nell'anno (β <sub>0</sub> ' = α β <sub>0</sub> ):	0,345	0,325	0,35
Acqua assorbita dai calcari cretaci in m <sup>3</sup> (10 <sup>3</sup> × α × β <sub>0</sub> × p × S <sub>0</sub> = 10 <sup>3</sup> × β <sub>0</sub> ' × p × S <sub>0</sub> ):	934 × 10 <sup>6</sup>	356 × 10 <sup>6</sup>	189 × 10 <sup>6</sup>
Superficie affior. della « <i>pietra leccese</i> » in Km <sup>2</sup> (S <sub>1</sub> ):	—	—	307
Coeff. di assorb. della « <i>pietra leccese</i> » nel semestre ottobre-marzo (β <sub>1</sub> ):	—	—	0,10
Equivalente di detto coeff. considerato nell'anno (β <sub>1</sub> ' = α β <sub>1</sub> ):	—	—	0,078
Acqua assorbita dalla « <i>pietra leccese</i> » in m <sup>3</sup> (10 <sup>3</sup> × α × β <sub>1</sub> × p × S <sub>1</sub> = 10 <sup>3</sup> × β <sub>1</sub> ' × p × S <sub>1</sub> ):	—	—	17,5 × 10 <sup>6</sup>
Superficie affior. dei calcari tufacei plio-pleistocenici a diretto contatto coi calcari cretaci, in Km <sup>2</sup> (S <sub>2</sub> ):	—	—	590
Coeff. di assorb. di detti tufi nel semestre ottobre-marzo (β <sub>2</sub> ):	—	—	0,50
Equivalente di detto coeff. considerato nell'anno (β <sub>2</sub> ' = α β <sub>2</sub> ):	—	—	0,39
Acqua assorbita dai calcari tufacei in m <sup>3</sup> (10 <sup>3</sup> × α × β <sub>2</sub> × p × S <sub>2</sub> = 10 <sup>3</sup> × β <sub>2</sub> ' × p × S <sub>2</sub> ):	—	—	168 × 10 <sup>6</sup>
Totale alimentazioni della <i>falda profonda</i> per singole zone in m <sup>3</sup> :	934 × 10 <sup>6</sup>	356 × 10 <sup>6</sup>	374,50 × 10 <sup>6</sup>

### 3 - Escursioni dei livelli della "falda profonda" pugliese e variazioni di portata delle sorgenti carsiche

E' ovvia qualsiasi considerazione sulla estrema importanza che rivestono tali elementi ai fini di una impostazione di bilancio idrologico delle disponibilità acquifere che qui interessano. Purtroppo gli elementi a disposizione sono però assai scarsi, onde essi non consentono una visione particolareggiata della falda in tutta la sua estensione, per un tempo sufficientemente lungo e con quei raffronti fra afflussi, deflussi e prelievi della falda, necessari per una più o meno rigorosa valutazione numerica.

Tuttavia risultano di somma utilità, ai fini dello studio del comportamento in generale della falda in questione in rapporto agli afflussi pluviometrici, alcune misure di livelli acquiferi sistematicamente svolte, dalla fine del 1953 ad oggi, in taluni pozzi trivellati dall'Ente Irrigazione, nonché le misure di portata svolte sulle sorgenti della Puglia dal Servizio Idrografico dal 1952 ad oggi.

Prendiamo quindi a base dei nostri ragionamenti i diagrammi ottenuti relativamente ai livelli statici, misurati mensilmente, nei pozzi di ricerca contrassegnati dalla sigla 14 II S, 10 III S, 13 III S, 5 IV S, 6 IV S, (Figg. 2 e 3). Orbene, per quanto riguarda l'entità dell'escursione subita dai livelli della falda, sembra che detta escursione sia non soltanto legata all'entità degli afflussi pluviometrici, bensì pure alla distanza del punto della falda preso in considerazione dalla costa. Così, mentre per pozzi, come quelli 10 III S e 13 III S, l'escursione registrata raggiunge e supera il metro (nel pozzo 10 III S, distante km 8 dal mare, l'escursione dal gennaio 1954 al gennaio 1955 ha raggiunto 1,5 m, portandosi il livello statico della falda da 1,36 a ben 2,86 m sul l.m.m.), nel pozzo litoraneo 6 IV S la escursione sembra invece molto inferiore, dell'ordine cioè di 30 cm appena. Gli elementi a conforto di tale osservazione non sono in verità molto esaurienti: il fatto però potrebbe avere una spiegazione ovvia, in quanto gli accumuli di acqua in prossimità della costa, come meglio sarà chiarito in seguito, troverebbero più facile e rapido sfogo verso il mare che non gli accumuli d'acqua nell'interno.

L'osservazione più degna di nota che può farsi invece esaminando i diagrammi di Fig. 3 è quella inerente allo sfasamento dell'escursione nei livelli della falda rispetto all'andamento degli afflussi pluviometrici, sebbene su tale argomento non si posseggano ancora sufficienti elementi di giudizio. A tal fine vanno osservate le posizioni dei pozzi, oggetto delle misurazioni effettuate, rispetto agli affioramenti dei principali tipi di rocce assorbenti in superficie (calcari cretaci e calcari organogeni carsici della regione del Capo, v. Fig. 2). In corrispondenza degli affioramenti di rocce assorbenti (s'intende sempre assorbenti, ai fini dell'alimentazione della falda profonda), la falda spesso sembra subire una escursione nel livello statico piuttosto immediata. Ciò naturalmente in quei casi in cui la roccia sia notevolmente fratturata, specie in senso verticale. Il pozzo n. 5 IV S, posto sull'affioramento di calcari cretaci di Avetrana, mostra ad esempio uno

sfasamento tra l'escursione dei livelli statici e le precipitazioni più lieve che in altri casi. Per gli altri pozzi, distanti dagli affioramenti superficiali di calcari assorbenti, le escursioni dei livelli statici si riscontrano con un ritardo di qualche mese sulle cadute di pioggia. Le escursioni di livello acquifero, riscontrate infine nel pozzo 14 II S, prossimo al litorale leccese e distante dagli affioramenti di calcari cretaci assorbenti a monte oltre 10 km, hanno inizio in ritardo, rispetto agli afflussi pluviometrici, di 2 ÷ 3 mesi.

Peraltro le escursioni nei livelli della falda profonda risultano meno brusche proprio in quei punti ove la falda è piuttosto distante da affioramenti di rocce assorbenti in superficie. Tutto ciò trova evidente spiegazione nella lunghezza dei percorsi sotterranei che l'acqua, assorbita in superficie e convogliata verso la falda, deve svolgere prima di raggiungere i punti sopra considerati. Così pure, sul ritardo nelle escursioni dei livelli e sulla entità di tali escursioni, molta importanza assume, oltre che l'intensità delle precipitazioni, il grado di permeabilità della roccia stessa, fattore questo non sempre facilmente giudicabile dall'esterno.

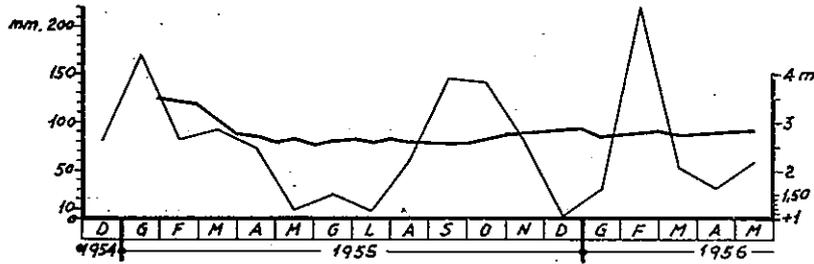
Di tali considerazioni è facile rendersi conto, come si è detto dianzi, osservando i diagrammi di Fig. 3, laddove sono riportate anche le piogge misurate alle stazioni pluviometriche del Servizio Idrografico più prossime agli affioramenti di calcari assorbenti che, ad un primo esame, si è ritenuto possano influenzare più da vicino la falda nei pozzi di volta in volta presi in esame.

Per quanto riguarda quindi il regime vero e proprio della falda, si esclude per essa qualsiasi regime pluriennale, essendo esso in genere strettamente dipendente dall'andamento delle precipitazioni, i cui valori mensili hanno in genere un massimo in dicembre ed un minimo in luglio. Ogni spostamento del regime della falda da quello delle piogge trova quindi le sue ragioni principali negli sfasamenti, cui si è dianzi accennato, e nella circostanza che le precipitazioni deboli, come quelle del periodo estivo, quasi non pervengono alla falda profonda.

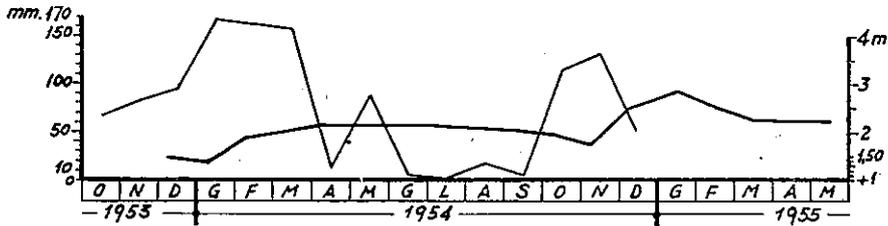
Considerazioni presso a poco analoghe possono farsi in merito al regime delle sorgenti, quantunque per queste non sempre siano note le modalità geoidrologiche che ne legano le condizioni di deflusso alla falda profonda. Infatti sovente le sorgenti litoranee pugliesi, pur prendendo in qualche modo alimento dalla falda profonda, non scaturiscono direttamente dalle fratture dei calcari, sopra definiti ampiamente assorbenti e dai quali si tengono in qualche caso anche sensibilmente distanti. D'altra parte per conclusioni attendibili risultano insufficienti i dati di portata di cui oggi si dispone, i quali dovrebbero in verità essere rilevati con maggiore frequenza, specie nei periodi di maggiore piovosità.

Vanno sottolineate inoltre le difficoltà rappresentate dal carattere delle sorgenti stesse, le quali non sono determinate da un imbasamento o sbarramento impermeabile né sono fornite di punti di sfioro ben distinti, come avviene in genere per le sorgenti più comuni, condizioni queste desiderabili per una sufficiente attendibilità delle misure di portata stesse. In effetti nei

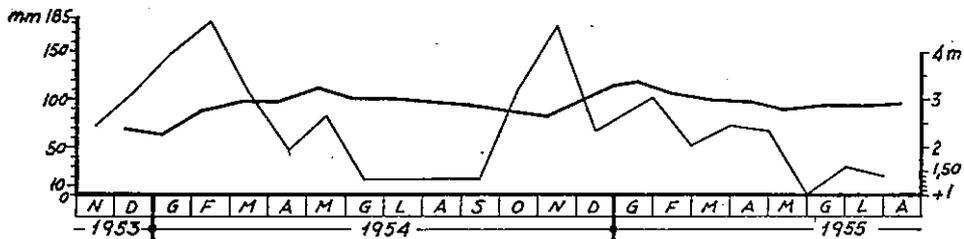
POZZO N° 14/II S - TORRICELLA (LECCE)  
STAZIONE PLUVIOMETRICA DI COPERTINO



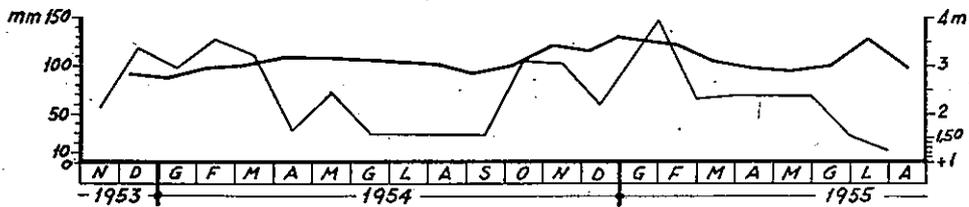
POZZO N° 10/III S - TATTI  
STAZIONE PLUVIOMETRICA DI NARDÒ



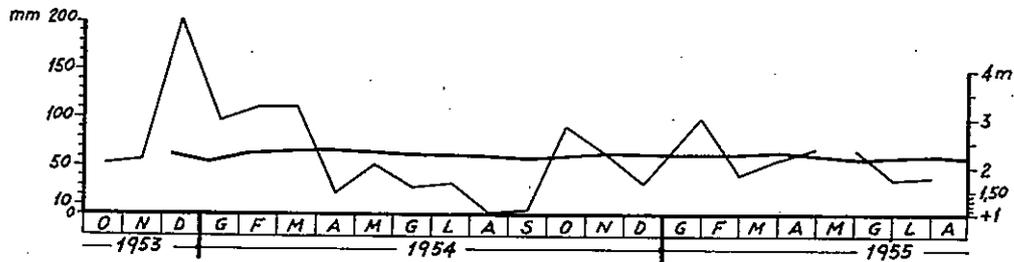
POZZO N° 13/III S - BUIA  
STAZIONE PLUVIOMETRICA DI LECCE



POZZO N° 5/IV S - RESCID  
STAZIONE PLUVIOMETRICA DI MONTERUGA



POZZO N° 6/IV S - FELLICCHIE  
STAZIONE PLUVIOMETRICA DI PORTO COLIMENA



— andamento del livello della falda  
— andamento delle precipitazioni

Fig. 3 - Variazioni del livello della falda profonda in taluni pozzi della penisola Salentina.

casi di « sorgenti di sbarramento marino » (6), laddove l'afflusso dell'acqua dolce avviene pressapoco lungo la linea di spiaggia, in parte anche al di sotto del l.m.m. e a diretto contatto dell'acqua del mare, i fenomeni di miscelamento tra le due acque — quella di falda e quella di mare che invade il continente — avvengono parzialmente nel sottosuolo, molto a monte della sorgente vera e propria, il che dà luogo appunto al carattere più o meno manifestamente salmastro di dette sorgenti. Di conseguenza i dati relativi alle portate misurate alla superficie del suolo in tempi diversi non sono sempre perfettamente compatibili fra loro, anche per una stessa sorgente. Ciò perché le condizioni stesse di deflusso di molte sorgenti risultano variabili con il variare della cadente della falda, da cui la scaturigine prende origine, e con il fenomeno di marea, che indubbiamente deve avere notevole influenza particolarmente su quelle sorgenti poste in corrispondenza della costa.

Ciò premesso, è risultato in un certo senso degno di nota l'esame di alcuni dati di portata rilevati per le principali sorgenti litoranee della Puglia. Gli aumenti di portate riscontrati non sembrano pienamente commisurati alla entità delle precipitazioni. Tale è, per esempio, il caso della sorgente Chidro, laddove la portata, oscillando negli anni 1952-53 fra 1900 ÷ 2300 l/sec, ha subito una escursione massima relativamente modesta. Tuttavia, il confronto fra portate misurate e afflussi pluviometrici ha mostrato che in genere gli aumenti nella portata delle sorgenti sono, rispetto agli afflussi pluviometrici, immediati, per sorgenti distanti dagli affioramenti calcarei assorbenti al massimo qualche chilometro, ovvero in ritardo di qualche mese, per sorgenti distanti 2 ÷ 5 chilometri dagli affioramenti assorbenti. Ripetiamo però che gli elementi che si posseggono in relazione a questo importante argomento sono veramente assai scarsi per trattare la questione in termini più precisi.

#### 4 - Considerazioni generali sul regime della falda in rapporto agli assorbimenti pluviometrici e ai deflussi

Le considerazioni che qui si espongono non possono andare oltre il carattere descrittivo, data la scarsità di elementi idrologici sopra lamentata e, soprattutto, le scarsissime conoscenze che oggi si posseggono sulle escursioni in altezza della interfaccia.

Facendo riferimento all'anno idrologico medio (7), è stato accertato che la escursione media dei livelli

(6) Nello studio pubblicato nel 1955 e sopra già citato, sono illustrate le modalità di deflusso a mare del tipo di falda che qui si descrive. In particolare si consulti pure COTECCHIA V.: *Sulle caratteristiche delle sorgenti e sulle modalità di rinvenimento della falda profonda nella Penisola Salentina in rapporto alla struttura dei calcari cretaci della regione* - Atti Fac. Ing. Univ. Bari, vol. II, 1956.

(7) Intendendo come tale l'anno in cui i deflussi verso il mare eguagliano, a meno delle perdite per evaporazione, gli afflussi dall'esterno alla falda. Con ciò si considerano per semplicità del tutto nulli gli emungimenti attuali, trattandosi di una falda il cui impiego sta soltanto oggi avendo inizio in forma più o meno estensiva per la trasformazione irrigua della regione pugliese.

della falda — a parte talune punte massime — è dell'ordine di 40 cm. Orbene, posto che la media percentuale dei vuoti nella intera formazione calcarea acquifera equivalga al 10% (valore questo già abbastanza elevato), si dimostra che un sovralzamento del tetto della falda (ovviamente nella zona ove questa defluisce a pelo libero) di 40 cm comporta un aumento della riserva acquifera di appena  $300 \div 350 \times 10^6 \text{ m}^3$  (8). Questo dato, anche a voler considerare l'incidenza dei deflussi che avvengono dalla falda verso il mare nel periodo (in genere pochi mesi) occorrente perché la superficie freatica si sollevi nella misura sopra menzionata, appare piuttosto esiguo, in confronto al volume di acqua mediamente e annualmente assorbito in superficie, volume valutato nelle pagine precedenti cautelativamente in  $1664 \times 10^6 \text{ m}^3$ . D'altra parte, se si supponesse costantemente valida la legge di equilibrio di GHYBEN ed HERZBERG, ad una escursione di volume medio annuale, nella zona di falda sovrastante al livello del mare, di  $300 \div 350.000 \text{ m}^3$  dovrebbe rispondere una escursione di volume annuale complessiva nell'intera falda di acqua dolce dell'ordine di  $300 \div 350 \times 10^6 \times 33 = 10.000 \times 10^6 \text{ m}^3$ , valore questo di gran lunga superiore all'alimentazione annuale della falda stessa sopra calcolata. Da ciò appunto la necessità di controllare le escursioni nei livelli della interfaccia, ai fini di una più o meno razionale valutazione delle effettive disponibilità della falda nell'anno idrologico medio.

A questo punto cominciamo con il considerare la falda fin dal suo primo costituirsi. Dobbiamo cioè, al fine di chiarire meglio le idee, partire dalla ipotesi che in qualche tempo la regione pugliese contenesse soltanto l'acqua di invasione marina, sulla quale non stesse praticamente alcuna falda, ciò che, anche per semplici ragioni climatologiche, può essere praticamente avvenuto in tempi probabilmente non molto remoti dell'epoca quaternaria.

Supponiamo quindi che, a partire da un certo anno, si sia verificato un afflusso di acqua piovana alla falda nella misura  $Q_a$ , distribuito annualmente con la stessa legge. Assumendo, in linea generale e per semplicità, una sezione della penisola costituita interamente da rocce assorbenti in superficie, le cose andrebbero in modo molto più semplice se, anziché trattarsi del tetto dell'acqua marina, la superficie a quota zero, sulla quale comincia a costituirsi la falda, fosse rappresentata da un vero e proprio piano di roccia impermeabile. In quest'ultimo caso, essendo la superficie di fondo della falda in fase di formazione definita e fissa, stabilire il tempo occorrente perché si raggiunga l'equilibrio tra afflussi e deflussi ( $Q_a = Q_d$  nell'anno idrologico medio) potrebbe rappresentare un problema sotto l'aspetto idraulico facilmente risolvibile, almeno per sezioni costituite da rocce a permeabilità omogenea e nota e per regimi pluviometrici rispondenti a schemi molto semplici.

Infatti, il caso più frequente è che, dell'acqua giunta nel primo anno alla falda, una piccola parte  $Q_{d_1}$  de-

(8) Tale valore è stato dedotto sulla base della effettiva superficie nella quale la "falda profonda" della regione in studio si estende a pelo libero. Per brevità si trascurano i relativi calcoli.

fluisca dai bordi ed una parte, più o meno cospicua,  $(Qa - Qd_1)$  resti alla fine dell'anno accumulata nel terreno, a costituire una falda acquifera con cadente piezometrica media nell'anno, in prossimità dei punti di sfioro,  $i_{m1}$  <sup>(9)</sup>.

Nell'anno successivo, a seguito dell'ulteriore afflusso alla falda  $Qa$ , la cadente  $i$  aumenta, di talché si rende possibile un deflusso complessivo nell'anno  $Qd_2$ , maggiore che nell'anno precedente. Tuttavia il deflusso  $Qd_2$  risulta ancora inferiore a  $Qa$ , onde la riserva acquifera rappresentata dalla falda aumenta nel secondo anno di  $Qa - Qd_2$ , risultando alla fine di detto anno pari a  $2Qa - Qd_1 - Qd_2$ .

Così procedendo oltre si giungerà, dopo un certo numero di anni e come indicato nello schema di Fig. 4a, ad una situazione di equilibrio in cui la cadente piezometrica media raggiunta sarà tale da

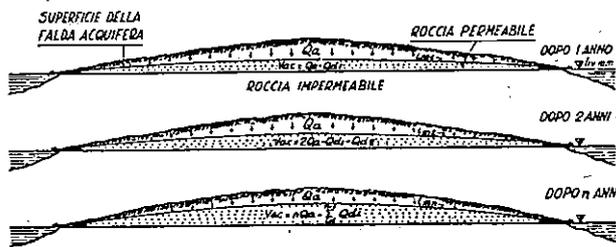


Fig. 4a

Efflusso =  $Qd_1$      $Qd_1 < Qa$

Efflusso =  $Qd_2$      $Qd_2 > Qd_1$   
 $i_2 > i_1$

Efflusso =  $Qd_n$      $Qd_n > Qd_{n-1} > \dots > Qd_1$   
 $Qd = Qa$   
 $i_n > i_{n-1} > \dots > i_1$

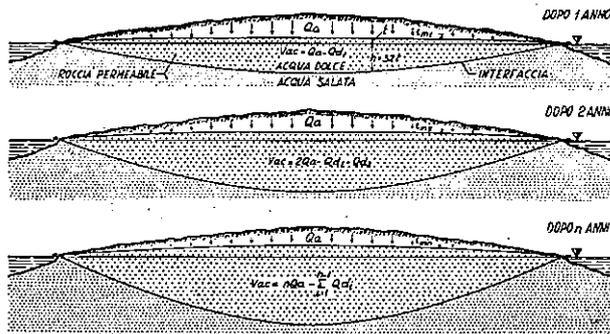


Fig. 4b

In genere

$Qd_i$  (caso b)  $<$   $Qd_i$  (caso a)  
 $i_{mi}$  (caso b)  $<$   $i_{mi}$  (caso a)

Raggiunto l'equilibrio definitivo ( $Qa = Qd$ ), si ha che:

$$i_m \text{ (caso b)} \cong \frac{1}{6} i_m \text{ (caso a)}$$

consentire un deflusso di acqua sotterranea  $Qd_n$  esattamente uguale all'afflusso medio annuo  $Qa$ . In tali condizioni la riserva acquifera, rappresentata dalla falda costituitasi in  $n$  anni, equivarrà ad  $nQa - \sum_{i=1}^{n-1} Qd_i$ , e resterà costante negli anni successivi, fino a che invariato resterà l'afflusso  $Qa$  <sup>(10)</sup>.

(9) Che  $Qd_1$  debba risultare, almeno teoricamente, inferiore a  $Qa$ , si spiega facilmente, osservando che il tempo occorrente per l'esaurimento di una falda, con superficie di fondo orizzontale e fissa, una volta annullatosi ogni ulteriore afflusso risulta in sede teorica infinito. Si dimostra infatti che la curva di esaurimento (deflussi-tempo) per una falda in fase di esaurimento risulta asintotica, con asintoto parallelo all'asse dei tempi. In sede pratica è comunque da ritenere che il primo afflusso  $Qa$  alla falda, specie se distribuito entro buona parte

Passando ad esaminare il caso della falda profonda della Penisola Salentina, il processo di formazione di essa presenta una notevole singolarità nel fatto che la superficie di fondo di detta falda, anziché essere definita e fissa, pur volendo ritenere che il passaggio dall'acqua dolce all'acqua di mare avvenga bruscamente in corrispondenza della cosiddetta « interfaccia » teorica, è definita e variabile, circostanza questa che conduce, per la legge di GHYBEN ed HERZBERG, ad un progressivo abbassamento di tale superficie di fondo, via via che si solleva la superficie freatica al di sopra della quota  $O$ . Pertanto il volume di accumulo  $Vac_i$ , dopo un numero  $i$  di anni, in parte si disporrà al di sopra del l.m.m. (quota  $O$ ), fino a raggiungere nell'anno una cadente piezometrica media  $i_{mi}$ , in parte si disporrà al di sotto di detta quota (Fig. 4b). Confrontando gli schemi delle Figg. 4a

e 4b, per i due casi di superficie di fondo di diverso tipo prese in esame, si ha peraltro che, allo scadere dell'anno  $i$ , la cadente piezometrica  $i_{mi}$ , raggiunta nel secondo caso, è minore che non nel primo. Si osservi però che non nello stesso rapporto stanno le portate di deflusso della falda verso la costa, in quanto nel secondo caso contribuisce a tale deflus-

dell'anno, non riesca a smaltirsi prima del sopraggiungere del nuovo afflusso  $Qa$  dell'anno successivo.

(10) Nel ragionamento fatto si è parlato di anni, poiché nella pratica effettivamente risulta noto che dello ordine di anni — e in non pochi casi anche di molti secoli — è il tempo occorrente perché si costituiscano, nei terreni più comuni, falde acquifere di una certa consistenza. Il fenomeno, sperimentato su modello in laboratorio, potrebbe impegnare invece dei tempi brevissimi.

so anche l'accumulo di acqua dolce posto al di sotto della quota 0.

E' ovvio che, ad equilibrio definitivamente raggiunto ( $Q_a = Q_d$ ) — vale a dire, nel caso b, con « interfaccia » ovunque a profondità  $32 t$  sotto il livello del mare, ove con  $t$  si rappresenta al solito la quota assoluta della falda — la cadente piezometrica debba

risultare ovunque  $i_m$  (caso b) =  $\frac{1}{\sqrt{33}} i_m$  (caso a)

a)  $\cong 1/6 i_m$  (caso a). Ciò si ottiene facilmente eguagliando, sulla base della legge di Darcy, le portate di deflusso in una stessa sezione di larghezza unitaria nei due casi sopra esaminati (Fig. 5).

Non altrettanto ovvio risulta il raffronto fra i tempi occorrenti perché nei due casi si raggiunga il sopradetto regime di equilibrio, sebbene, in linea del tutto generale e per un complesso di ragioni sulle quali si sorvola, si sia portati ad affermare che detto tempo, nel caso di superficie di fondo definita e variabile rappresentata dall'acqua di mare (caso b), sia maggiore che nel caso rappresentato da superficie di fondo definita e fissa, rappresentata da uno strato

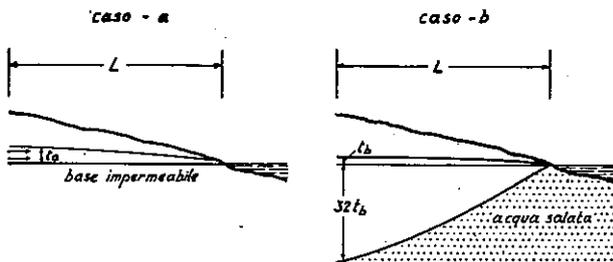


Fig. 5

caso a

$$i_m = \frac{t_a}{L} \quad V = f \frac{t_a}{L} \quad q_a = f \frac{t_a^2}{L}$$

caso b

$$i_m = \frac{t_b}{L} \quad V = f \frac{t_b}{L} \quad q_a = f \frac{t_b}{L} (33 t_b)$$

nell'ipotesi di deflussi uguali e costanti nei casi a e b si ha:

$$t_a^2 = 33 t_b^2, \text{ da cui}$$

$$t_b = \frac{1}{\sqrt{33}} t_a \cong \frac{1}{6} t_a; \quad i_m (\text{caso b}) \cong \frac{1}{6} i_m (\text{caso a})$$

roccioso propriamente impermeabile (caso a). A complicare maggiormente l'argomento, quando si è in presenza di acqua di mare alla base della falda, interviene poi il noto ritardo col quale gli abbassamenti della « interfaccia » rispondono alla legge di HERZBERG. Si tratta infatti di un vero e proprio fenomeno di « isteresi », per cui, se ad un certo punto la massa rappresentata dalla falda di acqua dolce, disposta in perfetto equilibrio statico sull'acqua marina (legge di GHYBEN-HERZBERG), aumenta per il sopraggiungere di nuovi afflussi dall'esterno, prima che si stabilisca l'equilibrio fra la quota  $t$  della falda e la profondità  $h$  della interfaccia ( $h = 32 t$ ), occorre un certo tempo, in quanto ciò implica lo spostamento della grande massa di acqua marina sottostante alla falda su percorsi molto lunghi, onde far posto all'ac-

qua dolce della falda aumentata di volume e di peso (Fig. 6).

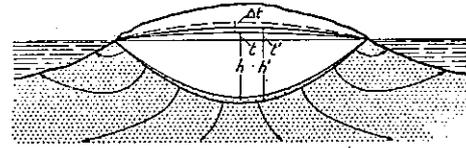


Fig. 6

Mancando il fenomeno di isteresi, ad un afflusso pluviometrico, equivalente ad un ispessimento della falda  $\Delta t$ , consegue una dislocazione della falda, rispetto al livello del mare, data da:

$$t' = t + \frac{1}{33} \Delta t \quad h' = 32 t + \frac{32}{33} \Delta t$$

Data l'isteresi invece, solo successivamente, e cioè raggiunto il nuovo equilibrio, sarà:

$$h' = 32 t', \text{ ove: } (t' + h') < (t + h + \Delta t)$$

In sostanza, la massa di acqua marina sottostante alla falda, racchiusa nei pori o nelle fessure di una formazione rocciosa, deve ritenersi paragonabile ad un fluido altamente viscoso, tale cioè che, se sulla superficie di detto fluido si va a disporre un oggetto di minor peso specifico (nel nostro caso rappresentato dalla falda di acqua dolce), prima che questo penetri, sotto il suo peso, parzialmente nel fluido e si disponga nella sua perfetta posizione di equilibrio, occorre del tempo, funzione appunto della viscosità del fluido.

Nel nostro caso l'« isteresi », con la quale la massa di acqua marina che permea la formazione rocciosa risponde agli spostamenti in altezza richiesti dall'applicazione della legge di HERZBERG, è funzione naturalmente della permeabilità del mezzo roccioso e, sembra pure, della distanza del punto che si considera dalla costa. E cioè, il fenomeno di « isteresi » si risente maggiormente quanto meno permeabile è la roccia e quanto più distante risulta l'interfaccia dalla costa, laddove la massa di acqua marina è libera di spostarsi istantaneamente come e di quanto abbisogna.

Circa la entità del ritardo col quale l'interfaccia risponde effettivamente agli abbassamenti o ai sovralzamenti del pelo libero della falda, ben poco di preciso si sa per quanto si riferisce alla Puglia, dove, se da un lato la formazione calcarea deve ritenersi permeabile in grande, è pur vero che la massima parte dei vuoti è disposta orizzontalmente (lungo i giunti di stratificazione), di talché più difficili risultano gli spostamenti in direzione verticale dell'acqua marina sottostante alla falda.

Per la falda di Miami in Florida (11), laddove il mare invade il continente penetrando entro rocce calcaree porose e parzialmente fessurate (calcarei oolitici del Pleistocene, calcari corallini e calcari tufacei del Miocene), è stato accertato che il ritardo dovuto al fenomeno di isteresi è dell'ordine di alcuni mesi, a distanza di soli 3 ÷ 4 km dalla costa. Per la Puglia, trattandosi di calcari più permeabili (in molti punti addirittura carsici), è da ritenere a nostro av-

(11) BROWN R. H. and PARKER S. G.: Salt water Encroachment in Limestone at Silver Bluff, Miami, Florida. Economic Geology, vol. XL, n. 4, 1945.

viso che l'«isteresi» difficilmente comporti dei ritardi dell'ordine di mesi, se non in punti assai lontani dalla costa.

Uno degli aspetti principali derivanti, nell'alimentazione di una falda, dalla lentezza con la quale si attua l'equilibrio contemplato dalla legge di GHYBEN-HERZBERG, sta proprio nella incertezza che sussiste circa la ripartizione degli afflussi provenienti dall'esterno, rispettivamente nelle zone di falda sovrastanti e sottostanti al l.m.m. In sostanza, riferendoci al caso generale dello schema di Fig. 6, se alla falda, caratterizzata in un punto  $P$  da un livello statico  $t$  sulla quota  $O$  e da una profondità della interfaccia  $h = 32 t$ , giunge un afflusso pluviometrico che solleva istantaneamente detto livello di  $\Delta t$ , la massa di acqua dolce costituente la falda dovrebbe a rigore spostarsi verso il basso, secondo la legge di HERZ-

32  
BERG, di  $\frac{1}{33} \Delta t$ , onde poter giungere ad una

33  
nuova posizione di equilibrio, caratterizzata da (Fig. 6):

$$t' = t + \frac{1}{33} \Delta t$$

$$h' = 32 t' = h + \frac{32}{33} \Delta t$$

Senonché, data l'«isteresi», nel tempo occorrente per il raggiungimento di detta nuova posizione di equilibrio la falda defluirà verso il mare con una cadente piezometrica  $i$  che, per intenderci, definiremo *incrementata*, derivante cioè da altezze della falda non perfettamente equilibrate rispetto al mare, cosicché tale cadente tende ad abbassarsi, nel periodo che potrebbe definirsi di «instabilità» per la falda, non solo per effetto del normale deflusso a mare della massa di acqua dolce in mancanza di nuovi afflussi, ma anche per il ristabilimento dell'equilibrio statico dell'intera falda galleggiante sull'acqua di mare. Quando sarà infine raggiunto detto nuovo equilibrio, risulteranno valori di  $t'$  ed  $h'$  rispondenti sì alla legge di Herzberg ( $h' = 32 t'$ ), ma tali che  $(h' + t') < (h + t + \Delta t)$ .

Sulla base dei concetti sopra esposti, conviene a questo punto riferirsi ad esempi più aderenti alla reale situazione idrologica della Penisola Salentina, specie per quanto si ritiene avvenga nell'anno idrologico medio, caratterizzato da afflussi pluviometrici alla falda nel solo semestre autunno-invernale.

Orbene, a dare spiegazione delle constatazioni di ordine pratico svolte nelle pagine precedenti in merito al regime della *falda profonda* e delle sorgenti ad essa collegate, vale la sezione schematica di Fig. 7, in cui la superficie del suolo è solo in parte costituita da rocce assorbenti ai fini del ravvenamento della suddetta falda.

A seguito di un afflusso pluviometrico alla falda, questa subisce, nelle zone immediatamente sottostanti alle aree di assorbimento, un sovralzamento nel pelo libero  $\Delta t$  (Fig. 7,I). Da tali accumuli accentrati di

acqua convogliata alla falda derivano, come nelle pagine precedenti è stato descritto:

- l'aumento notevole ed istantaneo nei livelli della falda in corrispondenza delle zone assorbenti;
- l'immediato aumento della portata della sorgente  $A$ , posta subito a valle di terreni assorbenti in superficie.

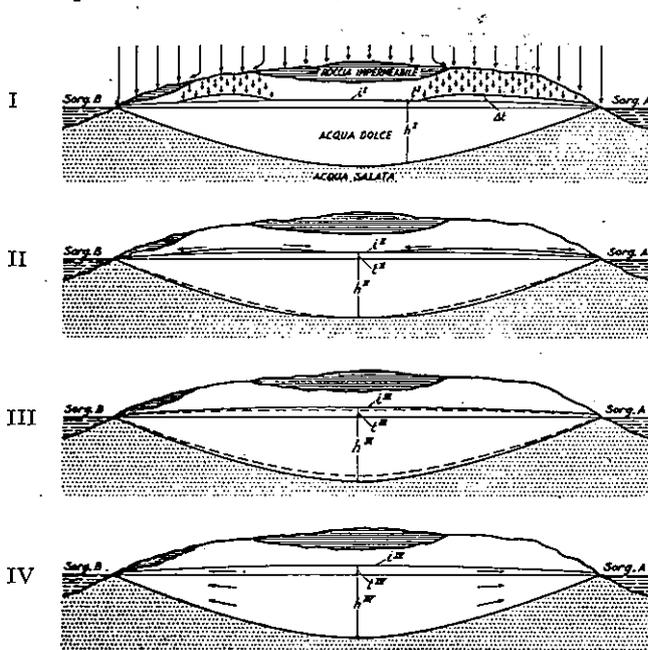


Fig. 7.

I - Durante un afflusso pluviometrico aumenta bruscamente la cadente  $i$  a monte della sorgente  $A$  e di quest'ultima aumenta di conseguenza la portata.

II -  $t$  ed  $h$  restano all'incirca eguali nelle fasi I e II - La sorgente  $B$  non ha ancora subito l'influenza dell'afflusso pluviometrico avutosi.

III -  $32 t' < h^{III} < 32 t^{III}$

Rispetto alla fase precedente risultano aumentati sia  $t$  che  $h$ ;  $t^{III}$  va diminuendo a monte della sorgente  $A$  e aumentando a monte della sorgente  $B$

IV -  $h = 32 t^{IV}$   $t^{IV} > t$   $h^{IV} > h$

$t^{IV}$  diminuisce con lentezza sia a monte della sorgente  $A$  che di quella  $B$ .

Successivamente, mentre la nuova acqua giunta alla falda tende a distribuirsi sull'intera superficie freatica, la falda tende lentamente ad abbassarsi, in virtù della legge di GHYBEN-HERZBERG. Gli abbassamenti risultano in un primo tempo prevalentemente concentrati nella zona di afflusso della nuova acqua e, di conseguenza, si constata che (Fig. 7,II):

- I livelli della falda, riferiti al l.m.m., tendono a diminuire in corrispondenza delle zone di assorbimento. Tale diminuzione è qui funzione vuoi dello spandimento del nuovo afflusso avutosi dall'esterno su tutta la superficie della falda (con un movimento prevalente orizzontale), vuoi dell'abbassamento dell'interfaccia tendente a ridurre, con l'«isteresi» sopra descritta, il sollevamento  $\Delta t$  avvenuto nella superficie freatica (con movimento prevalente verticale della massa di acqua dolce), vuoi infine del normale esaurirsi della falda per azione dei deflussi verso la costa (con movimento prevalente orizzontale).

- b) Nelle zone laterali a quelle di assorbimento può aversi, secondo i casi, che la quota della falda o si sollevi o si abbassi rispetto al l.m.m., a seconda che prevalga l'effetto dello spandimento dell'accumulo d'acqua, in un primo tempo accentrato in corrispondenza delle sole zone di assorbimento (caso più probabile), ovvero che prevalga l'effetto del normale esaurimento della falda.
- c) La portata della sorgente *A* risulta, come nella fase precedente, ancora assai rilevante, in conseguenza della notevole cadente piezometrica (sopra definita « *incrementata* »), assunta temporaneamente dalla falda a seguito dell'accumulo di acqua dolce avvenuto subito a monte della scaturigine.

Alla sorgente *B*, come mostra lo schema II della Fig. 7, potrebbe in questa fase non riscontrarsi ancora alcuna sensibile variazione nella portata.

Nella fase successiva, di cui allo schema III della Fig. 7, potremo raffigurarci gli accumuli di acqua, in un primo tempo concentrati in corrispondenza delle zone assorbenti in superficie, ormai distribuiti sull'intera falda, di talché, alle constatazioni svolte per la fase precedente, si aggiunge la circostanza inerente ad un aumento della portata della sorgente *B*, distante dagli affioramenti assorbenti, e dei livelli statici della falda nelle zone ricoperte in superficie da rocce impermeabili. Generalmente, sui livelli della falda in queste zone prevale l'effetto dello spandimento dei ravvenamenti acquiferi, avvenuti nelle zone adiacenti, rispetto al normale esaurirsi della falda.

Un'ultima fase potrebbe rappresentarsi infine al termine del fenomeno di « *isteresi* », con il quale si effettua il raggiungimento delle nuove condizioni di equilibrio contemplate dalla legge di HERZBERG. Il regime della falda in questa fase (Fig. 7, IV) differisce sostanzialmente dal precedente proprio per il modo di variare nel tempo delle altezze *t* sul l.m.m. Infatti, mentre nella fase III sugli abbassamenti dei livelli acquiferi influivano vuoi il normale esaurirsi della falda acquifera stessa (con movimento prevalente in direzione orizzontale), vuoi gli abbassamenti della interfaccia, tendenti a stabilire l'equilibrio di Ghyben-Herzberg (con movimento dell'acqua dolce prevalentemente in direzione verticale), ad equilibrio raggiunto (fase IV), gli abbassamenti dei livelli acquiferi sono vincolati unicamente al lento e normale esaurirsi della falda, cui fa riscontro un lento sollevamento della interfaccia, esattamente nella proporzione presunta dalla legge di Herzberg.

*Con ciò trova spiegazione una constatazione pratica quanto mai importante, riguardante il regime della falda profonda in Puglia, cioè che in genere, subito dopo la stagione piovosa, i livelli della falda rispetto alla quota zero vanno diminuendo con rapidità di gran lunga maggiore che non nella stagione asciutta, con un regime che mal si adegua alle variazioni di portata delle sorgenti della regione (efflussi della falda verso il mare), le quali si manifestano, in proporzione, assai meno sensibili. In sostanza sembrerebbe che la cadente piezometrica di detta falda, giunta ad un certo valore  $i^V$ , non si abbassasse oltre e che i deflussi della falda verso il mare continuassero in misura pressoché costante.*

Tale si presenta infatti il regime della falda pugliese in estate e in taluni altri periodi di prolungata siccità, quando cioè ogni variazione di *i*, conseguente a variazioni nella quota assoluta di *t*, comporta un sollevamento della interfaccia in misura pressapoco 32 volte maggiore di *t*. In tali condizioni il deflusso della falda verso le scaturigini litoranee sottrae acqua alla falda all'incirca solo per 1/32 dalla porzione di falda sovrastante al l.m.m., e per il resto dalle regioni sottostanti a tale quota. Nella stagione autunno-invernale le variazioni nella cadente *i* risultano invece legate, più che ai deflussi verso il mare, agli afflussi, i quali, giungendo alla falda in periodi assai limitati dell'anno e attraverso le sole zone assorbenti in superficie, danno luogo al fenomeno di « *isteresi* » nelle variazioni di livelli della interfaccia e allo spandimento degli accumuli di acqua sull'intera superficie della falda, fenomeni questi che creano sensibili e complesse variazioni nei livelli e nelle cadenti della falda stessa.

L'argomento, assai più si complica se si prende a considerare il caso che un nuovo afflusso pluviometrico intervenga ancor prima che si sia ristabilito l'equilibrio a seguito dell'afflusso precedente. Questo caso, che nel semestre ottobre-marzo deve risultare probabilmente per la « *falda profonda* » della Puglia piuttosto frequente, presenta molte combinazioni, assai raramente prevedibili anche ad un esame particolareggiato della idrologia della regione.

Siamo qui dell'avviso che l'argomento in questione vada più utilmente inquadrato soprattutto dal lato qualitativo. Valgano infatti gli schemi sopra illustrati a chiarire le linee fondamentali dei fenomeni, onde interpretare nella maniera più giusta gli elementi registrati nel regime della falda, specie quando agli afflussi e ai deflussi sopra considerati vanno ad aggiungersi gli effetti dell'emungimento attraverso pozzi, il cui contributo al regime della falda, per quanto si riferisce alla Puglia, sembra doversi ritenere a tutt'oggi ancora modesto.

## 5 - Considerazioni sugli emungimenti consentiti dalla falda in studio

Gli assorbimenti pluviometrici medi annuali, elencati nella Tabella I per i tre singoli bacini idrologici sopra contraddistinti, possono ritenersi equivalenti ai deflussi della falda verso il mare solo se si ritengono trascurabili gli attuali attingimenti alla falda in questione.

Questa circostanza, se può ritenersi in un certo senso ancora oggi valida, non lo sarà certamente più fra breve, poichè circa un migliaio di pozzi trivellati stanno nella regione in esame attrezzandosi per l'impiego a scopo irriguo — e in qualche caso anche potabile — onde è da presumere che fra brevissimo tempo la *falda profonda*, specie nella Penisola Salentina, non possa più ritenersi grosso modo indisturbata, come viene oggi appunto considerata.

Ritenendo quindi la falda profonda della regione in studio pressapoco ancora indisturbata, possiamo tradurre l'alimentazione sopra calcolata in deflussi della falda verso il mare con il risultato che segue:

	1° Bacino	2° Bacino	3° Bacino	Complessivamente per i 3 bacini
Alimentazione annuale della falda profonda in m <sup>3</sup> :	934×10 <sup>9</sup>	356×10 <sup>9</sup>	374×10 <sup>9</sup>	1.664×10 <sup>9</sup>
Deflusso medio annuale di detta falda verso il mare in m <sup>3</sup> /sec:	29,5	11,2	11,8	52,5

A questo punto va sottolineato che sistemare una rete di pozzi partendo dal contributo medio di deflusso relativo all'unità di superficie della falda in questione (valutato nell'ordine di  $5 \div 6$  lt/sec km<sup>2</sup>) rappresenta un criterio applicabile solo in pochi casi, essendo ben numerose le ragioni per le quali detto contributo unitario varia fortemente da punto a punto della regione in studio. Infatti, a parte la considerazione che i maggiori contributi al deflusso si hanno in corrispondenza di quelle zone di falda ricoperte da rocce assorbenti in superficie, laddove più diretta è l'alimentazione della falda stessa, va osservato che il mezzo acquifero presenta una permeabilità molto variabile, di talché un valore medio calcolato per tale contributo avrebbe un significato puramente teorico, di utilità molto dubbia ai fini della disposizione dei pozzi e dell'influenza reciproca fra essi.

In effetti una riprova di quanto si è detto sta nella entità delle portate di talune sorgenti della regione (per esempio Idume, Tara, Galese, Chidro), le quali raggiungono in qualche caso portate di oltre 4000 lt/sec, il che dimostra che in taluni punti i deflussi sono convogliati in gran quantità lungo vie preferenziali di tipo carsico, come particolarmente sembra avvenire per la parte sud della Penisola Salentina.

Sulla entità dei suddetti deflussi unitari gioca peraltro un ruolo di prevalente importanza la presenza di sbarramenti costituiti da rocce impermeabili lungo la costa, le quali, ostacolando in non pochi casi il deflusso diretto della falda a mare lungo tratti di parecchi chilometri, deviano i deflussi verso i margini di tali affioramenti impermeabili, laddove si riscontrano in genere i maggiori accentramenti di deflussi della regione.

A spiegare ciò non bastano però le sole sorgenti a tutt'oggi note attraverso i rilevamenti effettuati dal Servizio Idrografico (12). Queste rappresentano nè più nè meno che le manifestazioni concentrate, grossomodo misurabili e comunque più evidenti, della emergenza della falda profonda lungo il perimetro della regione bagnata dal mare (Fig. 2). In aggiunta a queste ed a parte il numero indubbiamente molto elevato delle sorgenti litoranee, singolarmente di entità modesta, costituenti il deflusso della falda

(12) L'elenco di esse e le relative portate medie sono elencate nel già citato studio, pubblicato dallo scrivente nel 1955 nella presente rivista.

distribuito in misura più o meno continua in corrispondenza dei lunghi tratti di calcari acquiferi della regione, immergentisi direttamente nel mare (« Acque di Cristo » del litorale Adriatico barese), va rilevata infatti la presenza di molte altre scaturigini, più o meno concentrate e manifestantisi attraverso impaludamenti di talune aree costiere della penisola, ovvero a quota inferiore al livello del mare (sorgenti subacquee), onde difficile ne risulta la individuazione e addirittura impossibile la misurazione di portata, anche solo come ordine di grandezza.

E' sintomatico in proposito il caso del litorale adriatico, laddove le sorgenti note attraverso i dati del Servizio Idrografico raggiungono una portata media complessiva di due m<sup>3</sup>/sec appena, contro un deflusso della falda a mare che deve raggiungere e superare indubbiamente i 20 m<sup>3</sup>/sec, trattandosi di una buona parte del deflusso della zona corrispondente al maggiore dei tre bacini idrologici sopra contraddistinti. Da tale raffronto si deduce facilmente che assai rilevante, lungo tale litorale, deve risultare il deflusso di tipo continuo e piuttosto uniforme, privo cioè di grosse manifestazioni sorgentizie. Queste ultime si riscontrano invece per il secondo bacino (Brindisi-Taranto, laddove le sorgenti note raggiungono una portata pari a circa metà del deflusso medio complessivo, calcolato in poco più di 11 m<sup>3</sup>/sec.

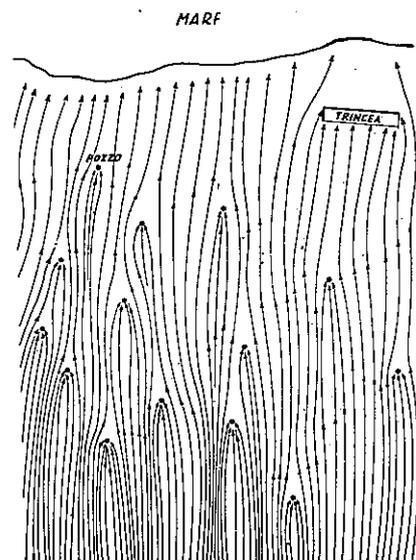


Fig. 2

Per quanto riguarda infine il bacino idrologico di Lecce, scarsa importanza avrebbe un raffronto con le sorgenti a tutt'oggi note attraverso gli elementi rilevati dal Servizio Idrografico, poichè molte altre sono le sorgenti litoranee non note e delle quali necessita un accurato rilevamento, documentato da frequenti ed attente misure di portata.

Ciò premesso, chiarito che i deflussi della « falda profonda » verso il mare avvengono in parte in forma continua, diremo quasi con una certa uniformità lungo il perimetro delle formazioni geologiche acquifere bagnate dal mare, in parte invece in forma concentrata, vale a dire cioè in punti ben determinati con portate accentrate dell'ordine di centinaia ed anche migliaia di lt/sec, vien fatto di chiedersi: quan-

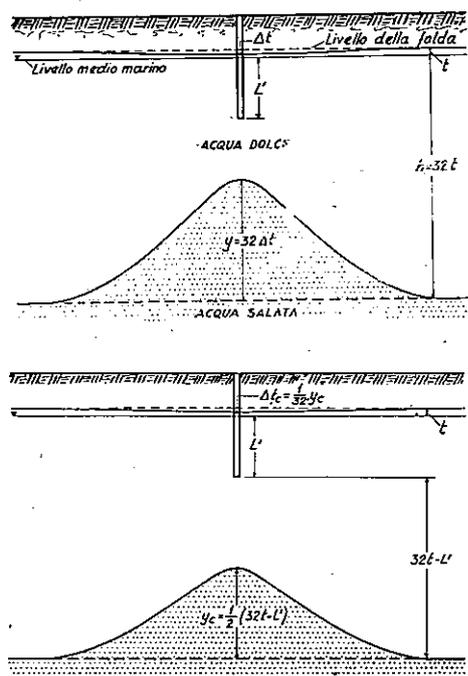


Fig. 9

do la falda non potrà più ritenersi indisturbata, e cioè quando sarà iniziata la vera e propria utilizzazione della falda, cosa avverrà nel regime delle scaturigini verso il mare? A questo punto occorre premettere qualche chiarimento su quello che sarà il nuovo regime della falda, in funzione non soltanto degli afflussi e deflussi, come fatto in precedenza, bensì anche degli emungimenti.

Segnatamente a tale argomento, si esamina il caso che gli emungimenti avvengano unicamente nel semestre aprile-settembre (falde in fase di esaurimento), quando cioè può ritenersi che gli afflussi pervenuti dall'esterno alla falda siano ormai distribuiti con regolarità su tutta la superficie freatica. Riferendosi, come si è fatto negli schemi precedenti, a quanto avviene nell'anno idrologico medio e posto che — ovviamente — gli emungimenti non superino in tale anno il totale degli afflussi alla falda, fino a che questa è indisturbata sussiste  $Qa = Qd$ ; nel regime che si stabilisce in presenza di emungimenti, corrispondenti ad una portata complessiva nell'anno  $Qe$ , dovrà risultare invece  $Qa = Qd + Qe$ . Vale a dire con ciò che gli emungimenti sottrarranno acqua alla falda prima che questa raggiunga il mare, con la conseguenza che, trattandosi nel nuovo regime di smaltire al mare un deflusso minore che nel caso di falda indisturbata, per la legge di Darcy detta falda defluirà nell'anno idrologico medio con una cadente  $i_m$  e, corrispondentemente, con livelli  $t$  della superficie freatica minori. In osservanza alla legge di Herzberg deve presumersi quindi che lo schema IV di Fig. 7 assuma, riferito alla falda in fase di emungimento, una forma tale che, confrontata col precedente schema, mostri valori di  $t_1^{IV} < t_1^{IV}$ ,  $h_1^{IV} < h_1^{IV}$  e  $i_1^{IV} < i_1^{IV}$ .

Pertanto, dalle considerazioni sopra svolte scaturiscono in breve le seguenti conseguenze degne di nota:

a) Il regime relativo alla falda, sottoposta all'utilizzazione nel periodo aprile-settembre, si differen-

zierà dall'attuale regime della falda indisturbata soprattutto per livelli e cadente piezometrica di magra più o meno sensibilmente inferiori ai valori fino ad oggi misurati.

b) Le distanze  $h - L'$  (v. Fig. 9), fra il fondo dei pozzi a tutt'oggi costruiti e la nuova posizione assunta dall'interfaccia risulteranno, nel regime di impiego della falda, per forza di cose inferiori a quelle misurate nel regime della falda presso a poco indisturbata, il che rende ottimistici, ai fini dell'intrusione di acqua marina nei pozzi, i calcoli sulla portata massima emungibile, svolti sulla base dei livelli di magra della falda in condizioni indisturbate.

c) Nel graduale passaggio al regime finale di utilizzazione intercorrerà un certo periodo — probabilmente di alcuni anni — in cui, contrariamente a quanto sopra esposto, risulterà nell'anno  $(Qd + Qe) > Qa$ , e ciò perché, dovendo la falda stabilizzarsi nel nuovo regime su valori medi di  $t$ ,  $h$  e  $i$  inferiori a quelli del regime attuale pressoché indisturbato, gli emungimenti e i deflussi sommati assieme finiranno col sottrarre acqua non solo ai normali afflussi alla falda, ma anche alla riserva costituita da quest'ultima, comportando il nuovo regime un assottigliamento dell'intera falda adagiata sull'acqua di invasione marina.

Per quanto riguarda l'entità degli emungimenti complessivi consentiti, si è già detto nelle pagine precedenti quanto arduo risulti pronunciarsi oggi, con gli scarsi elementi a disposizione, su tale argomento. Si sa, ovviamente, che essi debbono nell'anno tenersi molto inferiori alla portata di afflusso  $Qa$  alla falda, specie se si considera la circostanza che quelli per uso irriguo avverranno nel solo semestre primaverile-estivo, mentre nel semestre ottobre-marzo ad esaurire la falda ci saranno solo i deflussi verso il mare e gli emungimenti di acqua per uso potabile. Trascurando questi ultimi — perché di quantità molto limitata rispetto agli attingimenti per uso irriguo — e considerato quindi l'emungimento limitato al solo semestre primaverile-estivo, la possibilità che detto emungimento assuma una certa consistenza implica che la falda posseda in tale periodo delle convenienti altezze sul l.m.m., il che determina indubbiamente una cadente non nulla in corrispondenza della linea di spiaggia e di conseguenza un deflusso verso il mare.

Ciò vuol dire praticamente che gli attingimenti non potranno evitare del tutto i deflussi contemporanei della falda verso il mare, ma essi produrranno solo una limitazione di questi ultimi, in confronto a quelli che, nello stesso semestre, si sarebbero avuti nel caso di falda indisturbata. Ai deflussi verso il mare contemporanei agli emungimenti contribuiranno soprattutto i deflussi della falda esternamente alle zone di influenza di ciascun pozzo, secondo quanto mostra la Fig. 8. Infatti, posto a base del nostro ragionamento la constatazione che i pozzi nei calcari fessurati della Puglia si influenzano praticamente solo se posti a breve distanza (dell'ordine di alcune centinaia di metri) e considerato che tali pozzi risultano invece costruiti, nella regione in studio, a distanza media dell'ordine di qualche chilometro, deve ritenersi cospicuo quel deflusso che, evitando tali pozzi, riuscirà a rag-

giungere egualmente il mare, nonostante l'azione degli emungimenti.

Meglio sarebbe, naturalmente, se l'utilizzazione della falda potesse attuarsi attraverso una rete di pozzi assai numerosi, disposti a breve distanza fra loro, il che ridurrebbe di molto l'entità del deflusso della falda a mare. Potrebbe così evitarsi gran parte del deflusso in forma continua ed uniforme lungo le linee di costa.

Le sorgenti carsiche vere e proprie non risentirebbero però, in tal caso, che solo di una riduzione di portata, dipendente principalmente dalla diminuzione delle cadenti a monte, in quanto, trattandosi di acqua proveniente da ben determinate vie preferenziali nel sottosuolo (fratture carsiche), l'esperienza ha dimostrato che difficilmente queste si rintracciano e si seguono con pozzi trivellati, di talché bisogna ritenere pressoché impossibile captare buona parte della portata di una sorgente carsica attraverso pozzi trivellati a monte.

Considerata quindi, da quanto esposto, la incertezza che ancora oggi sussiste in merito alla effettiva entità degli emungimenti che potranno in seguito consentirsi dalla « falda profonda » della regione in studio, è opportuno qui procedere almeno ad un confronto fra la portata estraibile dai pozzi a tutt'oggi eseguiti nella regione e i deflussi della falda indisturbata verso il mare.

A questo punto, riprendendo quanto esposto già nel lavoro pubblicato nel 1955 in merito al sollevamento, di forma conica, dell'acqua marina sottostante al pozzo in fase di emungimento, va ricordato che ad una depressione  $\Delta t$  corrisponde un sollevamento della interfaccia  $y = 32 \Delta t$  (Fig. 9). Orbené, veniva pure illustrato in detto studio come il pompaggio attraverso un pozzo influisca sull'equilibrio della interfaccia in maniera assai più complessa di quanto sia espresso dal semplice equilibrio statico, contemplato dalla legge di HERZBERG. L'applicazione diretta dei principi idrodinamici al problema mostra infatti che il cosiddetto « cono d'intrusione » di acqua salata, aumentando via via la depressione  $\Delta t$  durante il pompaggio, irrompe nella falda d'acqua dolce soprastante prima ancora che il vertice di detto cono raggiunga il fondo del pozzo, e cioè prima ancora che la depressione  $\Delta t$  raggiunga il valore limite  $t = 1/32 L'$  (Fig. 9).

Riprendendo il termine, adottato dallo scrivente nello studio sopra richiamato, di « depressione critica », oltre la quale si ha, per determinate condizioni di regime della falda, l'irruzione dell'acqua salata nel pozzo, sulla base di elementi statistici relativi alle ricerche freatiche svolte sui pozzi della regione in studio e di taluni dati teorici, tratti da altri studi effettuati sull'argomento, si può ritenere, cautelativamente, che il cono di acqua marina irrompe nella falda quando il sollevamento della interfaccia raggiunga il valore  $y = \frac{1}{2} (32 t - L')$ , di talché alla depressione critica  $\Delta t_c$  può assegnarsi approssimativamente il valore  $1/32 \times 1/2 (32 t - L')$ . Di conseguenza il valore della depressione  $\Delta t$  che conviene adottare nell'uso di un pozzo deve risultare in ogni caso:

$$\Delta t < \frac{1}{32} \frac{32 t - L'}{2}, \text{ e cioè } \Delta t < \frac{t}{2} - 0,01562 L',$$

ove con  $t$  si indica il livello di massima magra della falda, essendo questo l'unico livello cui si può ritenere corrisponda, in seguito al fenomeno di *isteresi* negli spostamenti della interfaccia, una profondità  $h$  di questa eguale all'incirca a  $32 t$ .

Dai diagrammi portate-depressioni, rilevati in sede di costruzione di ciascun pozzo, sarà quindi possibile leggere, in corrispondenza della depressione sopra ricavata, la massima portata consentita per ciascun pozzo.

Va ricordato inoltre che, come lunghezza  $L'$  del pozzo, deve assumersi la profondità, sotto il l.m.m. fino alla quale si spinge il tratto di pozzo in formazione rocciosa permeabile, elemento questo da dedursi caso per caso, sulla base della effettiva stratigrafia ottenuta durante la perforazione, la quale risulta talora attestata, per un certo tratto al fondo, in formazione rocciosa impermeabile.

In base a detto procedimento si perviene approssimativamente alle cosiddette *portate critiche*, le quali è naturale che risultino approssimate per eccesso, vuoi perché difficilmente possono assumersi nei calcoli valori di  $t$  di effettiva magra, vuoi perché i livelli di falda, di cui oggi si è in possesso, risultano indubbiamente superiori a quelli che si stabilizzeranno nel nuovo regime che assumerà la falda durante il suo impiego.

Nel confronto che mostreremo fra le portate complessive emungibili dai pozzi esistenti nella regione pugliese e i deflussi della falda, riferiti al caso di falda indisturbata, sarà bene peraltro tener conto che, nel semestre aprile-settembre (quando cioè si effettuano i maggiori emungimenti), i deflussi della falda verso il mare si mantengono, per le complesse ragioni sopra illustrate, inferiori ai valori medi annuali sopra calcolati. Potremo ritenere, ad esempio, che almeno i 3/5 del ravvenamento annuale della *falda profonda* defluisca a mare nel semestre ottobre-marzo, mentre i 2/5 defluirebbero nel semestre aprile-settembre in assenza di emungimenti, con valori calcolati di 23,6, 9 e 9,4 mc/sec, rispettivamente per il 1°, 2° e 3° bacino idrologico sopra considerati. E' a questi valori pertanto che conviene più cautelativamente far riferimento nelle considerazioni che qui in breve si riassumono per ciascuno dei tre bacini idrologici in cui si è divisa la regione in studio:

#### I Bacino idrologico (Murge di Bari - Ginosa)

— portata media defluente a mare durante il semestre aprile-settembre, per falda indisturbata:	23,6	m <sup>3</sup> /sec
— portata media complessiva delle sole sorgenti litoranee carsiche note:	5,05	»
— portata che si ritiene venga normalmente estratta da n. 800 pozzi a scavo provvisti di norie o modestissime motopompe:	0,45	»
— portata massima estraibile, secondo i criteri sopra suggeriti, da pozzi in gran parte trivellati forniti di pompe:	3,90	»

In effetti, la portata totale estraibile dai pozzi che si presumono a tutt'oggi esistenti nell'area corrispon-

dente al bacino idrologico in questione raggiunge un valore totale che al confronto della portata calcolata per la falda, considerata come indisturbata e defluente verso il mare, ne rappresenta una modesta aliquota. Si tratta in sostanza di circa 4,5 contro 23,6 m<sup>3</sup>/sec.

Il ragionamento assume però un diverso aspetto se si tiene conto del fatto che la massima parte dei pozzi trivellati di recente entro l'area di detto bacino è accentrata in provincia di Taranto, e più specificatamente in quella parte di versante ionico pugliese interessato dalla cospicua scaturigine del Tara, avente da sola una portata media di circa 4 m<sup>3</sup>/sec, nonché dal noto anello di S. Cataldo. Pertanto, dovendo ritenere che, nella zona ove tali pozzi sono oggi più accentrati, la riserva di acqua rappresentata dalla *falda profonda* tributa fundamentalmente alla sorgente del Tara, risulta che in questa zona bisogna porre assolutamente freno alla incontrollata iniziativa individuale, riesaminando scrupolosamente le possibilità di bilancio idrologico locale e ridimensionando eventualmente gli impieghi dei pozzi.

Al contrario il litorale adriatico barese (da Barletta a Fasano), laddove in forma continua e quasi ininterrotta avvengono i massimi deflussi della falda verso il mare e i pozzi sono per la massima parte rappresentati da quelli modestissimi, forniti di norie e prossimi alla linea di spiaggia, presenta condizioni della falda tali da poter sottoporre quest'ultima ad un più vasto impiego, attraverso l'esecuzione di altri pozzi, possibilmente lontani dalla costa, ad evitare la nociva influenza dell'acqua marina sulla falda. Lungo tale tratto di litorale, predisponendo gli attingimenti nella forma tecnicamente più conveniente, si potrebbe contare su un'attingimento complessivo alla falda di molti m<sup>3</sup>/sec, contro il m<sup>3</sup> appena, corrispondente ai pozzi attualmente esistenti.

#### II Bacino idrologico (Brindisi-Taranto)

— portata media defluente a mare durante il semestre aprile-settembre, per falda indisturbata:	9	m <sup>3</sup> /sec
— portata media complessiva delle sorgenti carsiche note:	5,26	»
— portata estraibile secondo i criteri di cui sopra, dai pozzi perforati di recente:	5,1	»

La domanda da farsi a questo punto sarebbe: di quanto diminuirà la portata media complessiva delle sorgenti comprese entro questo bacino nel nuovo regime della falda, relativo alla fase di emungimento da tutti i pozzi considerati? A questa domanda non è facile rispondere. D'altra parte è da tener conto della circostanza, sopra più volte sottolineata, e che cioè, mentre le sorgenti ridurranno, forse non di molto, la loro portata, a questa bisognerebbe altresì aggiungere quel deflusso in forma continua lungo il litorale, che sfugge in verità alla osservazione e che comunque, sia pure in forma molto ridotta, sussisterà anche quando si procederà all'emungimento da tutti i pozzi della zona.

Comunque, allo scopo di rendersi conto dell'entità notevole, raggiunta dalla portata complessivamente emungibile dai pozzi eseguiti nel bacino in questione, basta considerare che quest'ultima, sommata alla por-

tata delle sorgenti — considerate in condizioni di falda pressochè indisturbata — supera sensibilmente il deflusso verso il mare calcolato per la falda indisturbata. Questo non è certo un conto ortodosso, essendo considerata la portata delle sorgenti in condizioni di falda indisturbata. D'altra parte, in via del tutto preliminare, basta tale considerazione perché si stimi eccessiva — ai fini del bilancio idrologico di questo bacino e allo stato delle conoscenze attuali — la portata complessiva dei pozzi sopra calcolata.

#### III Bacino idrologico (Lecce)

— portata media defluente a mare, durante il semestre aprile-settembre, per falda indisturbata:	9,4	m <sup>3</sup> /sec
— portata media complessiva delle sorgenti note:	1,95	»
— portata massima estraibile, secondo i criteri di cui sopra, dai pozzi fino ad oggi eseguiti:	5,3	»

E' nostra opinione però, come è stato illustrato nelle pagine precedenti, che le sorgenti a tutt'oggi rilevate dalla Sezione Idrografica non siano tutte quelle che effettivamente si rilevano nella zona qui presa in esame. Comunque, su questa base, le conclusioni cui si perviene per il bacino idrologico di Lecce sono le stesse esposte per il bacino precedente, di Brindisi-Taranto. Una portata complessiva di 5,3 m<sup>3</sup>/sec<sup>(13)</sup>, emungibile da pozzi costruiti nella zona prima ancora che si stabilissero dei sani criteri connessi alle possibilità di ravvenamento della falda stessa, se confrontata al deflusso verso il mare di 9,4 m<sup>3</sup>/sec, ottenuto per la falda in condizioni indisturbate, deve ritenersi per ora senz'altro eccessiva.

Non va dimenticato, nello studio idrologico dei singoli bacini e sottobacini idrologici di un'intera regione, il carattere della permeabilità della formazione acquifera, in relazione alla presenza di eventuali sorgenti cospicue, specialmente laddove fra i caratteri della formazione acquifera e delle sorgenti prevale il carsismo. La presenza di sorgenti carsiche notevoli può subordinare in qualche caso la possibilità di impiego attraverso pozzi di una più o meno rilevante estensione della falda a monte della sorgente stessa. Vogliamo cioè dire, più semplicemente, che esistono taluni sottobacini idrologici, le cui disponibilità di acqua sotterranea sono prevalentemente convogliate, attraverso particolari fratture propriamente carsiche, verso una determinata sorgente e che quindi, stando la pratica difficoltà di attingere acqua da dette fratture nelle zone a monte della sorgente, deve ritenersi che detti bacini siano pressochè sterili, ai fini di un più o meno integrale impiego delle effettive disponibilità locali di acqua sotterranea mediante pozzi. In casi

(13) Nel calcolo di tale portata non è stato naturalmente tenuto in conto il contributo dato da quei pozzi attingenti a falde ritenute indipendenti dalla "*falda profonda*". Si vuole qui far riferimento a quelle falde di acqua dolce contenute nei calcari organogeni a struttura tufacea, compresi fra Lecce e Otranto e non comunicanti con le fessure dei calcari cretacei di base, imbevuti qui per la maggior parte di acque eccessivamente salmastre.

di questo genere l'emungimento da pozzi finirebbe col produrre essenzialmente il sollevamento della *interfaccia* a monte della sorgente, aumentando di conseguenza la salinità dell'acqua affluente a quest'ultima.

Per quanto riguarda più da vicino la Penisola Salentina, da queste brevi considerazioni e da quanto si è avuto in precedenza a dire circa le cautele da adoperare nell'impiego dei pozzi, al fine di evitare un eccessivo e dannoso sollevamento del tetto di acqua marina sottostante alla *falda profonda*, scaturisce l'opportunità di impiegare, ovunque ce ne sia bisogno, anche le sorgenti là dove esse affiorano, trattandosi di deflussi che in ogni caso continuerebbero ad andare in buona parte a mare, perdendosi del tutto.

A sviluppare in sede pratica le tesi sopra sostenute, traducendole caso per caso in piani organici per lo sfruttamento di falde del tipo in questione, non poche sono naturalmente, come si è avuta già occasione di dire, le indagini da compiere allo scopo di giungere gradualmente all'utilizzazione della massima parte possibile di risorse idriche così fatte, senza interferenza nociva da parte dell'acqua marina di fondo ed evitando il progressivo impoverimento delle risorse stesse.

Fra le più importanti ricerche da compiere caso per caso, va segnalato qui un altro dei punti riguardanti le modalità di emungimento da un pozzo. Tale punto è rappresentato dal quesito se, a parità di portata giornaliera, convenga emungere per 24 ore su 24 o per un numero minore di ore. Per quanto si riferisce alla Penisola Salentina, allo stato delle conoscenze attuali, sembra per esempio potersi optare per la prima soluzione. Ciò non soltanto ai fini di una più completa utilizzazione della *falda profonda* della regione, defluente senza soste verso il mare, ma altresì al fine di ridurre la portata oraria e, di conseguenza, la depressione di regime durante l'esercizio del pozzo con gli oramai noti vantaggi nei riguardi della influenza sulla falda da parte dell'acqua marina di fondo.

Tali considerazioni valgono però nell'ipotesi che le condizioni di regime idrodinamico, nei riflessi del « cono di intrusione di acqua marina » nella falda acquifera, si stabiliscano dopo un periodo di emungimento limitato ad alcune ore al massimo, circostanza questa valevole solo per rocce aventi forte permeabilità. Per rocce aventi permeabilità medie e basse, potrebbe convenire anche il contrario.

## 6 - Conclusioni

Da quanto sopra detto risulta chiaro che lo studio dell'equilibrio di una falda acquifera costiera, nelle condizioni rispondenti alla legge di GHYBEN ed HERZBERG, nei riguardi dell'alimentazione dei deflussi e degli emungimenti è cosa quanto mai complessa. Gli elementi in gioco, sia a carattere geologico che idrologico, sono molti e quasi tutti di difficile e incerta valutazione. Tuttavia l'aver chiarito le linee fondamentali del fenomeno, sia pure in forma descrittiva e ben lontana da quella quantitativa, aiuta non poco chi in un caso concreto — come quello sopra descritto per la Penisola Salentina — debba procedere all'impiego di una risorsa idrica sotterranea così fatta e stabilire i controlli da svolgere durante l'impiego stesso.

In sostanza appare chiaramente, dall'esposizione svolta, che solo attraverso un primo impiego, in forma ridotta e cautelativa, di pozzi e sorgenti nelle condizioni sopra descritte e l'attenta osservazione, sotto forma di studio, di tutti quegli elementi idrologici relativi agli effetti che tali emungimenti producono — relativi specialmente ai conseguenti movimenti in verticale che subisce la *interfaccia* — è possibile, dopo un certo numero di anni, acquisire un'idea più concreta circa i prelevamenti di acqua sotterranea di cui si possa tranquillamente disporre.

E' stato altresì chiarito, nelle pagine precedenti, quanto difficile risulta peraltro l'indagine nei primi tempi, fino a che cioè, da un regime di falda pressochè indisturbata, si raggiunga il nuovo regime, relativo alla fase di impiego della falda stessa.

Per quanto riguarda le modalità da osservare nell'emungimento dai pozzi, presi singolarmente e senza alcun riferimento alle effettive disponibilità della falda, ai fini di preservare ciascun pozzo dall'influenza dell'acqua marina occorre mantenersi con la depressione nel pozzo al di sotto del valore:

$$\Delta t_c = \frac{1}{2} t - 0,01562 L'$$

ove, ripetiamo, con  $\Delta t_c$  viene indicata la cosiddetta « depressione critica », la quale serve caso per caso a regolare la portata massima emungibile da ciascun pozzo. In effetti, della formula sopra riportata ci si può avvalere in due modi diversi: ritenendo cioè  $t$  (livello statico di magra della « falda profonda ») ovvero  $L'$  (profondità del pozzo al di sotto del l.m.m., o meglio la massima profondità alla quale si incontra, lungo il pozzo, la formazione rocciosa permeabile) costanti.

Nel primo caso si ha  $\Delta t_c = f(L')$ , o meglio ancora  $L' = f(\Delta t_c)$ , formula della quale ci si avvale fondamentalmente durante la costruzione di un pozzo, onde stabilirne appunto la profondità più conveniente. A ciò si può giungere servendosi in pari tempo delle curve di portata relative a varie profondità raggiunte dal pozzo, in quanto sostanzialmente interessa conoscere in quali condizioni del pozzo si possa ottenere l'optimum di portata.

Nel secondo caso, invece, si ha  $\Delta t_c = f(t)$ , formula della quale ci si avvale fondamentalmente durante la utilizzazione del pozzo. A dette due formule corrispondono i diagrammi lineari, di utilità essenzialmente pratica, riportati rispettivamente nelle Figg. 10 a) e b).

Le portate corrispondenti alle depressioni critiche, di cui ai suddetti diagrammi, rappresentano dei massimi ai quali è necessario tenersi convenientemente al di sotto, se si vuole evitare la irruzione di acqua salata nel pozzo. Esistono però delle ragioni di altra indole, che vincolano egualmente le portate singole emungibili dai pozzi, e queste si ispirano al criterio di ridurre quanto più possibile i deflussi della falda a mare, durante la stagione degli attingimenti, fondando soprattutto sulla più idonea distribuzione dei pozzi stessi zona per zona.

In altre parole si osserva che, laddove si riscontra un forte addensamento di pozzi, è necessario ridurre le portate singole. L'adozione di un tale criterio appa-

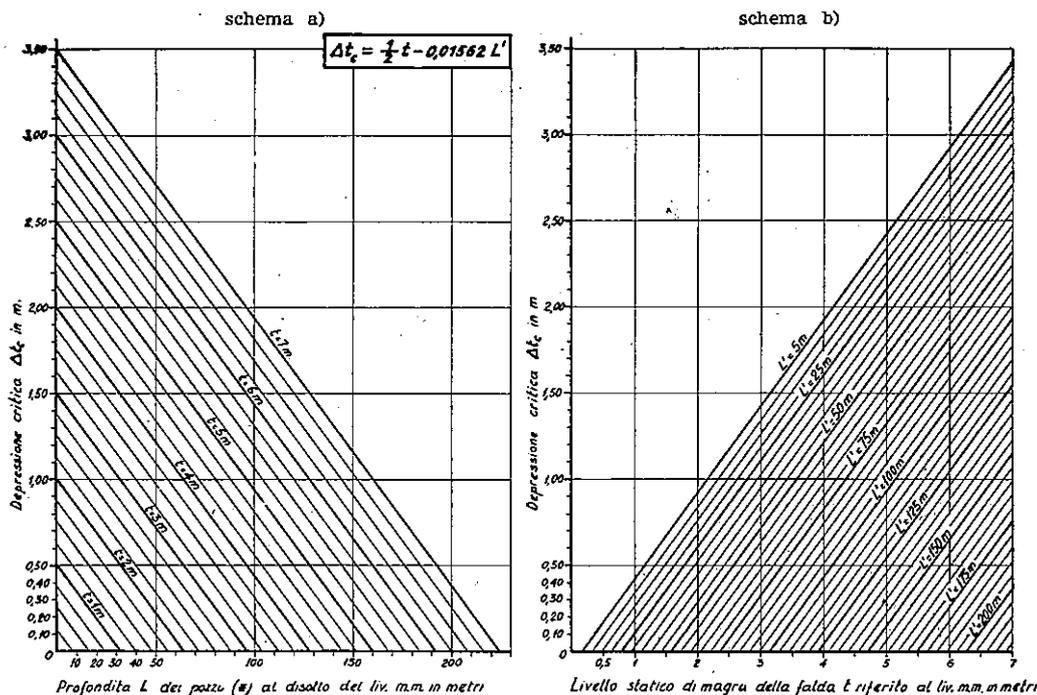


Fig. 10

(\*) Se il pozzo è attestato in formazione impermeabile, con L' s'intende la profondità alla quale si spinge lo strato acquifero più profondo rinvenuto dal pozzo.

re del tutto ovvia; allo scopo di ridurre il sollevamento della interfaccia in una certa zona ricca di pozzi e lasciare scorrere altrove la falda del tutto indisturbata verso il mare, conviene estendere i pozzi ovunque le caratteristiche geologiche consentono e limitarne le portate singole.

In sostanza talune modalità di proficuo impiego di falde del tipo descritto variano da caso a caso, essendo esse strettamente legate al comportamento singolare delle falde stesse, per le quali, a parte le direttive di impiego dei singoli impianti, interessa soprattutto disciplinare nel loro complesso e con visione unitaria l'insieme degli emungimenti, per evitare l'esaurimento delle risorse disponibili e non essere costretti a ridurre a un certo punto, con evidenti gravissime

conseguenze, gli impieghi sui quali in un primo tempo si è creduto di poter contare.

Gli esempi che possono trarsi dalla bibliografia estera relativamente a questo argomento sono numerosissimi, nè ci pare questa la sede per elencarli. Dalle coste della Germania settentrionale e dell'Olanda, ove il fenomeno fu studiato per la prima volta nel 1900, alle coste della Florida, da quelle dell'Attica a quelle dell'Algeria, nelle Haway ed in tante altre grosse isole fornite di falda profonda nelle condizioni previste da GHYBEN ed HERZBERG, ovunque il fenomeno, non preso seriamente in conto dal primo momento, ha assunto durante l'impiego delle falde stesse, forme estremamente pericolose ai fini della qualità delle acque estratte da pozzi, fino a costringere in moltissimi casi al completo abbandono di questi ultimi.

SOMMAIRE: On sait bien quelles remarquables difficultés on rencontre dans l'étude théorique de l'équilibre d'une nappe d'eau côtière, dans les conditions de GHYBEN et de HERZBERG, à l'égard des filtrations, des écoulements et de leur utilisations. L'Auteur examine certaines circonstances hydrogéologique et hydrologiques qui se sont vérifiées dans le comportement de la "nappe profonde" des Murge et du Salento et des manifestations des sources connexes à cette nappe. Il décrit ensuite les lignes fondamentales du phénomène dont la connaissance est d'un extrême intérêt pour l'emploi rationnel des ressources hydriques souterraines dans de pareilles conditions. Un intérêt particulier prend dans cette étude l'"hystérésis" par laquelle des déplacements verticaux de la surface de séparation de l'eau douce de l'eau de mer ("interface") suivent aux variations de niveau de la surface piézométrique de la nappe même.

Enfin l'A. donne quelques renseignements sur les disponibilités de la "nappe profonde" de la presqu'île du Salento, sur lesquelles on peut se baser aujourd'hui, tenant compte des phénomènes exposés.

SUMMARY: The theoretic study of the equilibrium of a coast water-storage, under GHYBEN-HERZBERG conditions, concerning infiltration, natural leakage and intakes, is very difficult. The Writer, therefore, takes as a starting point some hydrogeologic data found about Murge and Salento "deep storage" behavior; he describes, then, the essential characters of the phenomenon, whose knowledge is extremely interesting for ground-water rational draft under these conditions. The "hysteresis" by which the vertical movements of the surface of balance between fresh and salt water ("interface") follow the piezometric head-changes is very important in this examination.

Finally the Writer, taking into consideration the above said phenomena, gives some short information about the available water in the Penisola Salentina "deep-storage".