

S. GRASSI (\*)

BILANCIO IDROLOGICO DEL BACINO DEL T. MILIA  
PER LA VALUTAZIONE DELLA RICARICA NATURALE  
DELL'AREA MERIDIONALE DEL CAMPO GEOTERMICO  
DI LARDERELLO

**Riassunto** — Il bacino del Torrente Milia, situato presso il margine meridionale del campo geotermico di Larderello, contribuisce in parte all'alimentazione del campo stesso. Stabilito il valore dell'infiltrazione profonda media annuale del bacino attraverso il bilancio idrologico, è stato possibile valutare, attraverso la suddivisione dell'area in esame in tre sottobacini secondari, che circa  $4 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/anno fluiscono per via sotterranea dal bacino del Milia alimentando il campo geotermico.

**Abstract** — *Hydrological balance of the Milia river basin for an evaluation of the natural recharge of the southern area of the Larderello Geothermal Field.* The Milia River basin, situated near the southern margin of the Larderello geothermal field, contributes in part to the recharge of the latter. Having defined the mean annual deep infiltration of the basin from the hydrological balance, we subdivided the study area into three secondary basins to evaluate the quantity of water flowing underground from the Milia basin towards the geothermal field. This value is estimated at about  $4 \cdot 10^6$  m<sup>3</sup> per year.

**Key words** — Evapotranspiration, Hydrographic basin, Hydrological balance, Infiltration, Recharge, Recharge area.

INTRODUZIONE

I diversi studi condotti sia sulle caratteristiche isotopiche del fluido prodotto dal campo geotermico di Larderello (CRAIG 1963, FERRARA et al. 1965, PANICHI et al. 1974), sia sulle caratteristiche idrogeologiche del campo stesso (CELATI et al. 1973, PETRACCO, SQUARCI 1975) hanno messo in evidenza che il sistema geotermico di Lar-

---

(\*) Istituto Internazionale per le Ricerche Geotermiche, C.N.R., Pisa.

derello, perlomeno sul margine meridionale del campo, è un sistema aperto. La fig. 1 (CELATI et al. 1973) mostra come le acque sotterranee affluiscono al campo geotermico prevalentemente da sud,

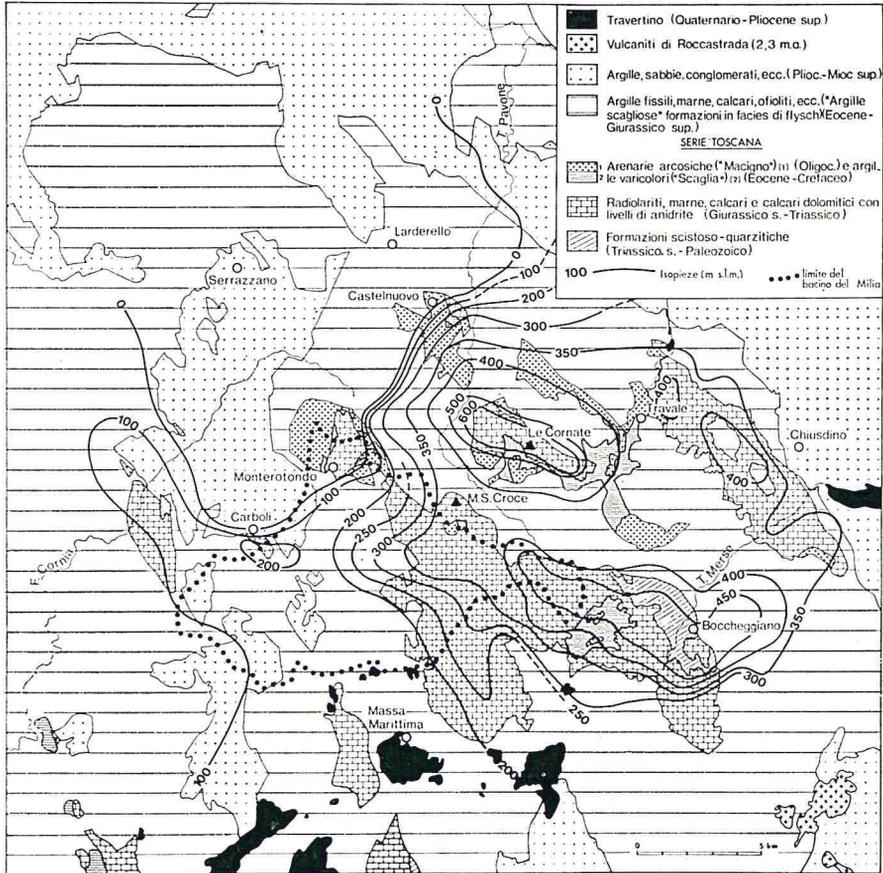


Fig. 1 - Schema idrogeologico del margine meridionale del campo geotermico di Larderello (CELATI et al., 1973).

dove affiorano le formazioni mesozoiche permeabili. Lo studio geoidrologico del bacino del T. Milia, la cui posizione è riportata in fig. 1, ci ha consentito, attraverso l'esecuzione del bilancio idrologico, di valutare, seppur approssimativamente, a quanto ammonti il contributo idrico medio annuale che le formazioni permeabili

affioranti in questa area possono offrire alla circolazione idrica profonda e quindi all'alimentazione del campo geotermico.

#### AREA DI STUDIO

Il torrente Milia, affluente di sinistra del F. Cornia, sottende un bacino di circa 77 km<sup>2</sup> avente un'altitudine massima di 916 m s.l.m. ed una altitudine media di circa 393 m s.l.m.; l'asse maggiore del bacino si sviluppa grossomodo secondo una direttrice E-W.

La stazione di misura di portata è costituita da un idrometrografo situato ad una quota di 101 m s.l.m. nei pressi del casale Il Grillandino ed a circa 7 km dalla confluenza con il F. Cornia.

In fig. 2 è riportato lo schema morfologico del bacino in esame.

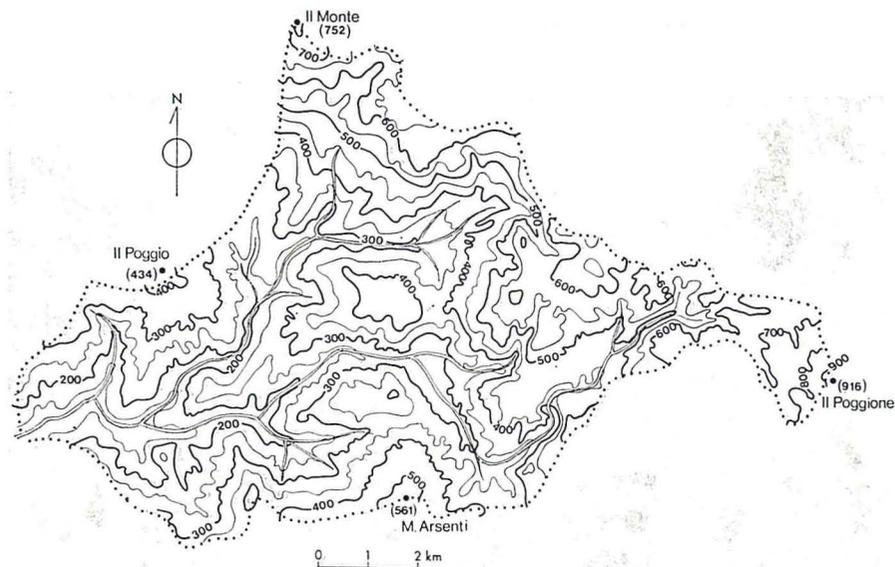


Fig. 2 - Topografia del bacino del T. Milia.

#### PERIODO DI OSSERVAZIONE

L'anno medio a cui si fa riferimento nello svolgimento del presente lavoro è quello relativo al periodo che va dal '70 al '76 compresi, dato che gli elementi di deflusso del Milia sinora dispo-

nibili sono limitati a questi sette anni (1). Certamente, considerato il ridotto periodo di osservazione, i valori dei parametri relativi al bilancio potranno scostarsi da quelli medi deducibili attraverso periodi di osservazione più lunghi. Tuttavia riteniamo che il comportamento geoidrologico del bacino possa risultare sufficientemente definito dagli elementi relativi all'anno medio considerato.

## DEFLUSSI

Il deflusso superficiale medio annuale del T. Milia, per l'anno medio '70-'76, risulta di 0,342 m<sup>3</sup>/sec pari ad un volume di 10,8 × 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup>/anno. Tale valore rapportato ai 77 km<sup>2</sup> di superficie del bacino ci fornisce un valore di deflusso medio pari a 140 mm/anno.

Tuttavia, considerata la particolare situazione dell'alveo nei pressi della sezione di chiusura (foto 1-2), si ritiene che, oltre al



Foto 1 - Sezione di misura.

(1) Parte degli elementi idrologici e climatici utilizzati nel presente lavoro sono relativi ai dati dedotti in prima elaborazione dall'Istituto Idrografico di Pisa e non ancora pubblicati.

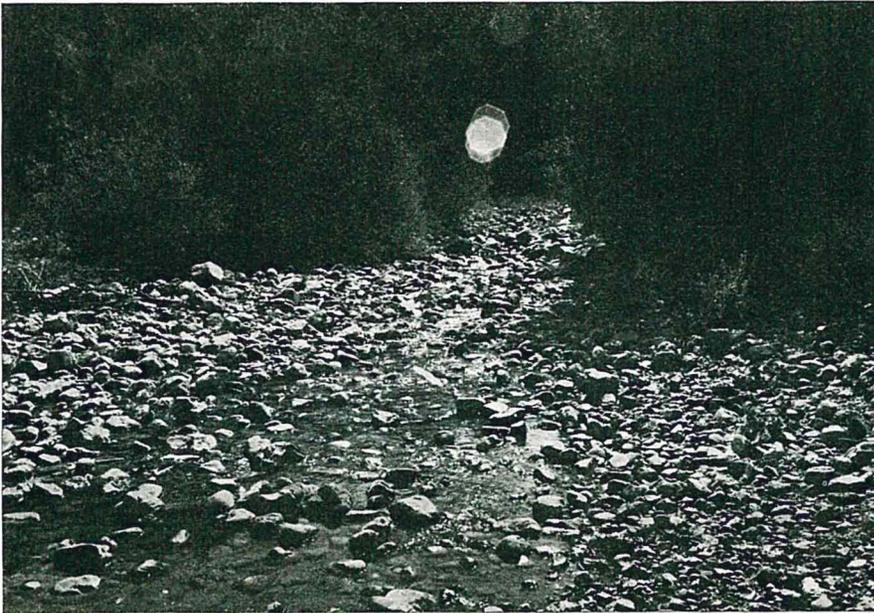


Foto 2 - Aspetto dell'alveo immediatamente a valle della sezione.

deflusso superficiale, esista una attiva circolazione idrica sia di subalveo, sia lateralmente alla sezione stessa, almeno nel suo lato sinistro. Abbiamo stimato in circa 30 mm/anno tali perdite occulte ed abbiamo pertanto considerato nello svolgimento del lavoro un deflusso medio annuo complessivo di 170 mm.

#### LINEAMENTI GEOLOGICI

Nell'area di studio sono presenti formazioni del basamento regionale sormontate in discordanza tettonica da formazioni appartenenti alla « Serie Toscana » ed alle « Liguridi ». A queste ultime si sovrappongono trasgressivi i sedimenti del ciclo neoautoc-tono Mio-Pliocenico.

A partire dalle formazioni più profonde si ha

- 1) Basamento regionale: costituito nei livelli più profondi da filladi e quarziti filladiche con intercalazioni di dolomie cristalline ed anidriti di probabile età devono-siluriana (BAGNOLI et al. 1979). Localmente tali terreni sono sormontati da arenarie e filladi grafitose (OLIVIERO 1963) di probabile età car-

bonifera. Queste formazioni sono state interessate da fasi tettoniche erciniche ed alpine <sup>(2)</sup>.

- 2) Serie Toscana: è rappresentata principalmente dalla sua parte basale costituita da dolomie ed anidriti del Trias superiore fortemente tettonizzate, talvolta ridotte a breccia (« calcari cavernosi »). Sono presenti inoltre modesti affioramenti di calcari e radiolariti giurassiche, di argille varicolori eoceniche (« scaglia toscana ») e di arenarie arcosiche oligoceniche (« macigno »).
- 3) Liguridi: sono rappresentate dalla formazione delle « argille a palombini » del Cretaceo. Si tratta di una formazione costituita in prevalenza da argille fissili e subordinatamente da strati calcarei.
- 4) Sedimenti Neogenici: sono presenti nella zona occidentale dell'area di studio e costituiscono il riempimento di bacini sedimentari legati alle fasi tettoniche distensive mio-plioceniche della orogenesi alpina. Si tratta di sedimenti conglomeratici che si sovrappongono in discordanza angolare sulla formazione delle « argille a palombini ».

## GEOIDROLOGIA

Le formazioni precedentemente descritte sono state classificate, in base alle loro caratteristiche geoidrologiche, nelle seguenti classi di permeabilità.

### *Permeabilità primaria*

Formazioni neogeniche con grado di permeabilità variabile da media a scarsa, secondo la composizione del deposito.

### *Permeabilità secondaria*

*Permeabili:* Calcari cavernosi, calcari massicci e diaspri; localmente le formazioni carbonatiche sono interessate da fenomeni carsici, come testimoniano alcune doline presenti nell'area di studio.

*Mediamente permeabili* - Formazione del macigno.

*Limitatamente permeabili* - Filladi del basamento.

---

(2) Il basamento non affiora nell'area di studio.

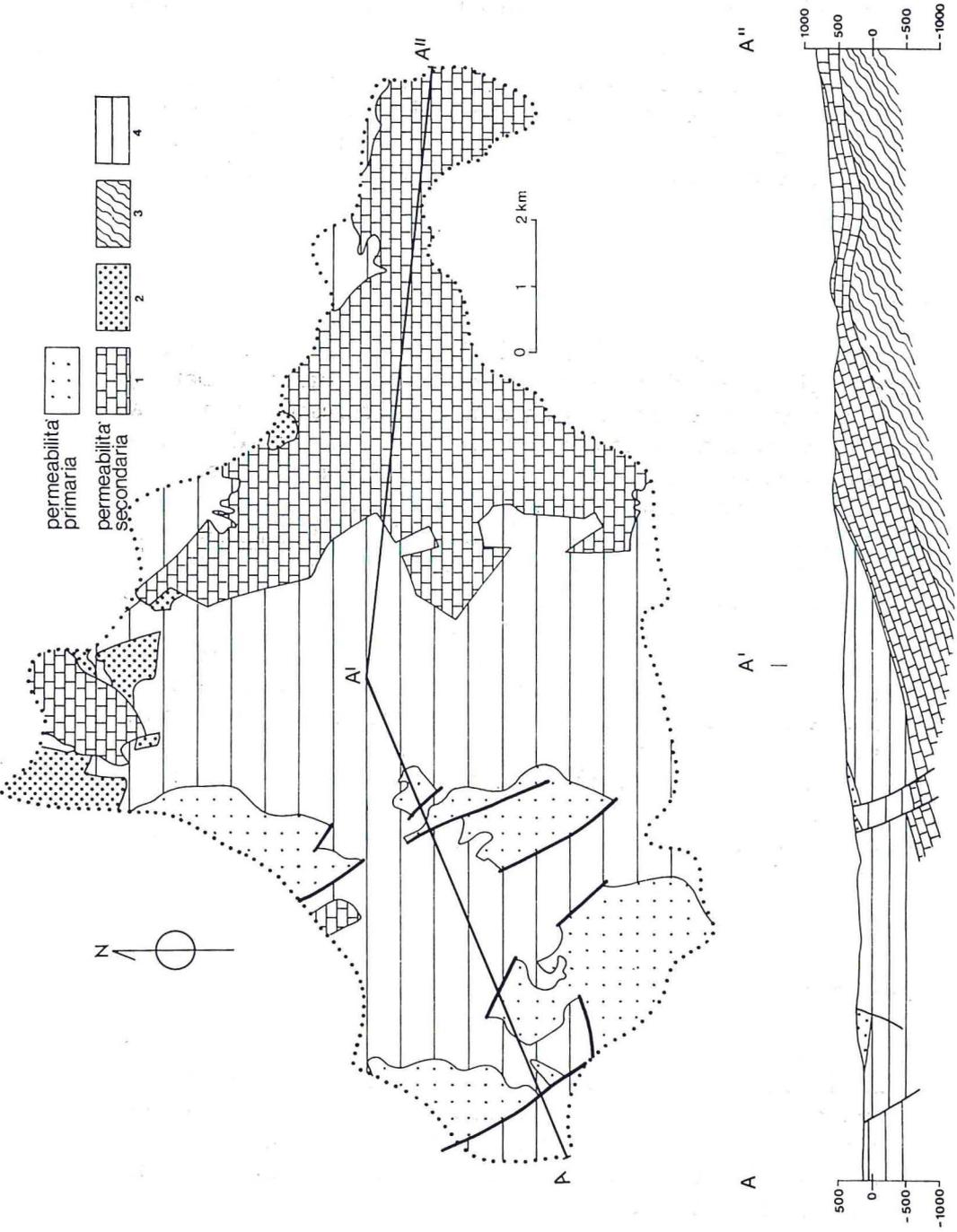


Fig. 3 - Schema geoidrologico del bacino del T. Milia. Quote in metri.  
 Permeabilità primaria: Neogene.  
 Permeabilità secondaria: 1) calcari cavernosi; 2) macigno; 3) filladi del basamento; 4) formazioni delle argille a palombini e scaglia toscana.

*Impermeabili* - Formazioni delle « argille a palombini » e « scaglia toscana ».

Su tali basi è stata redatta la carta della permeabilità del bacino (fig. 3) come schematizzazione di quella geologica. Dall'esame di tale carta si deduce che gli affioramenti permeabili e mediamente permeabili costituiscono il 34% della superficie dell'area in esame.

#### PLUVIOMETRIA

Entro il territorio del bacino del Milia sono presenti due sole stazioni pluviometriche: Monterotondo e Montebamboli. Data la loro posizione, esse non sono sufficienti a rappresentare la situazione pluviografica dell'intero bacino. In ragione di ciò è stata presa in considerazione una rete pluviometrica più estesa, costituita cioè da una decina di stazioni sparse all'intorno dell'area in esame. Valutata pertanto la precipitazione media annua per il periodo '70-'76 di ciascuna di esse, si è redatta una carta delle isoiete per una zona più vasta rispetto a quella di nostro interesse. Una volta in possesso dell'andamento pluviografico generale, basandosi sulle caratteristiche orografiche dell'area in esame e sulla sua esposizione alle perturbazioni, si è elaborata la carta delle isoiete per il bacino del Milia come compare in fig. 4 da cui si è dedotto un afflusso medio annuo per il bacino di 926 mm.

Le stazioni pluviometriche di Monterotondo e di Montebamboli sono state successivamente utilizzate per risalire, con un procedimento di ripartizione proporzionale, alla distribuzione media mensile delle piogge nel bacino in esame, per l'anno medio '70-'76 (Tab. 1).

#### TEMPERATURE

All'interno dell'area in esame non esistono stazioni termometriche, la più vicina è quella di Massa Marittima situata nell'attiguo bacino del Pecora. Tale stazione può essere ritenuta sufficientemente rappresentativa della termometria media del bacino del Milia dato che si trova ad una quota di 370 m s.l.m., prossima quindi alla quota media del bacino in oggetto.

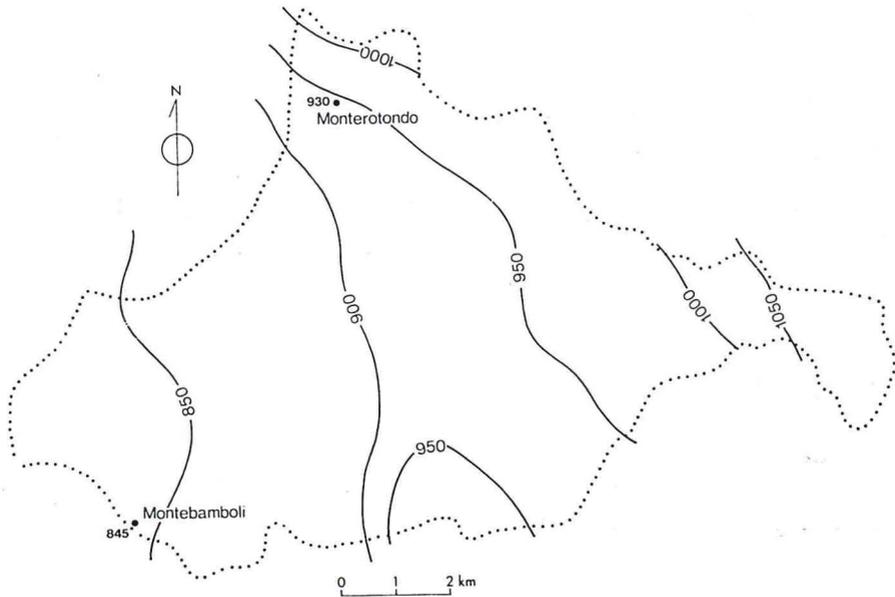


Fig. 4 - Pluviografia del bacino del T. Milia per l'anno medio '70-'76. I valori sono in millimetri.

TAB. 1 - Elementi caratteristici medi del periodo '70-'76.

	Precipitaz. mm	Deflusso mm	Er Th. * mm	Er Turc ** mm
Gennaio	90	30	16	
Febbraio	87	21	19	
Marzo	81	23	27	
Aprile	97	15	46	
Maggio	59	9	82	
Giugno	49	5	86	
Luglio	33	1	58	
Agosto	70	1	75	
Settembre	86	1	85	
Ottobre	92	9	56	
Novembre	101	9	28	
Dicembre	81	16	18	
ANNO	926	140	596	599

\* Er Th = Evapotraspirazione secondo Thornthwaite.

\*\* Er Turc = Evapotraspirazione secondo Turc.

Tuttavia, onde verificare l'omogeneità fra dati termici della stazione citata e quelli delle aree circostanti, abbiamo preso in considerazione altre stazioni termometriche della regione geotermica ed abbiamo correlato la temperatura media mensile con la rispettiva quota di rilevamento. Tali correlazioni, oltre a permetterci di accertare la buona rappresentatività degli elementi termometrici della stazione di Massa Marittima, ci hanno consentito di valutare le temperature medie mensili delle maglie in cui è stato successivamente suddiviso il bacino.

#### EVAPOTRASPIRAZIONE

La valutazione dell'evapotraspirazione reale è stata effettuata utilizzando sia il metodo del Turc sia quello del Thornthwaite sulla base degli elementi climatici acquisiti.

#### *Metodo del Turc*

L'evapotraspirazione reale annua è data da

$$E_r = P / \sqrt{0.9 + \frac{P^2}{L^2}}$$

dove:

$E_r$  = Evapotraspirazione reale annuale

$P$  = Precipitazione annuale

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

$N = \frac{\sum P(m) \cdot T(m)}{P}$

in cui  $P(m)$  e  $T(m)$  rappresentano rispettivamente le precipitazioni e le temperature medie mensili. Tale metodo non tiene in alcuna considerazione la situazione pedologico vegetativa dell'area in esame.

*Metodo del Thornthwaite*

Tale metodo risulta generalmente di più laboriosa applicazione dato il numero di variabili che devono essere di volta in volta determinate.

Viene calcolato inizialmente il valore della evapotraspirazione potenziale mensile

$$Ep(m) = K \cdot 16(10 \cdot \frac{T(m)}{I})^\alpha$$

dove:

K = coefficiente funzione della latitudine

I = indice termico annuale pari alla somma degli indici termici mensili definiti come  $i = (\frac{T(m)}{5})^{1.514}$

$$\alpha = 0,49239 + 1792 \cdot 10^{-5} I - 771 \cdot 10^{-7} I^2 + 675 \cdot 10^{-9} I^3$$

In base ai valori dell'evapotraspirazione potenziale mensile, che rappresenta il massimo quantitativo di acqua che può evapotraspirare in quelle determinate condizioni termiche, si risale al valore dell'evapotraspirazione reale mensile e quindi annua, tenendo conto della distribuzione mensile delle precipitazioni e della variazione della riserva idrica del suolo. La riserva idrica, che rappresenta il contenuto d'acqua del suolo utilizzabile dalla vegetazione e dipende quindi sia dalle caratteristiche della copertura vegetale, sia dalle caratteristiche tessiturali del suolo, è un parametro che giuoca un ruolo fondamentale nel calcolo dell'evapotraspirazione reale e risulta generalmente di complessa determinazione.

Nel presente lavoro, per l'applicazione del procedimento del Thornthwaite, è stata considerata una riserva idrica media del suolo di 100 mm, dato che le caratteristiche vegetative del bacino del Milia sono simili a quelle del vicino bacino del Farma per il quale, in un precedente lavoro (GRASSI 1981), era stato valutato con un procedimento indiretto, appunto una riserva idrica media di 100 mm.

L'applicazione di entrambi i metodi ci ha fornito valori di evapotraspirazione reale media annua per il bacino del Milia presso-

ché coincidenti, infatti abbiamo ottenuto valori di  $E_r$  di 599 mm secondo il Turc e di 596 mm secondo il Thornthwaite (Tab. 1).

La differenza fra precipitazione ed evapotraspirazione reale annuale ci dà il valore dell'eccedenza idrica o disponibilità idrica, pari alla lama d'acqua che annualmente si ripartisce in deflussi superficiali ed infiltrazione profonda.

In Fig. 5 si è cercato di fornire la rappresentazione areale dell'eccedenza idrica del bacino del Milia. La carta è stata elaborata determinando il valore dell'eccedenza idrica secondo Turc di

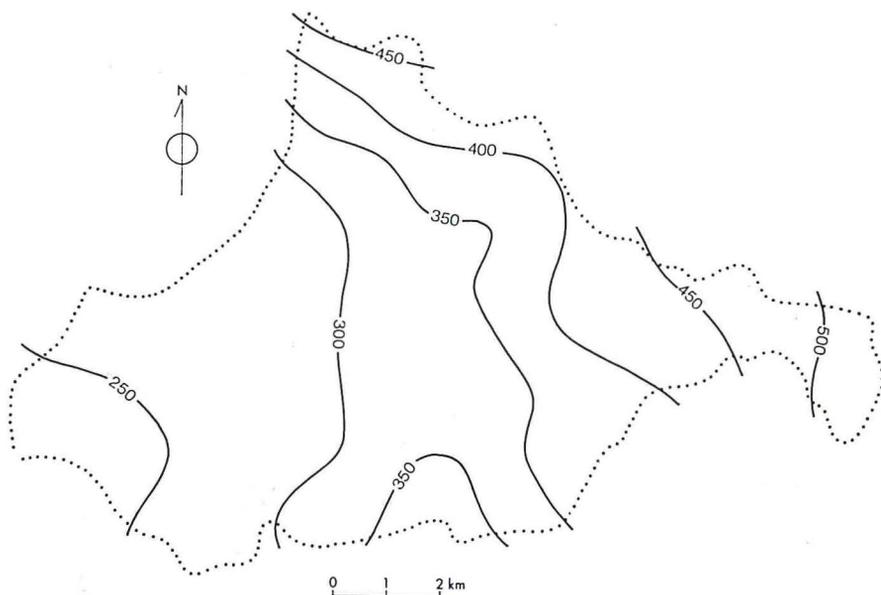


Fig. 5 - Eccedenza idrica in mm secondo Turc per l'anno medio '70-'76.

circa cento punti disposti secondo un reticolo a maglie quadrate di 1 km di lato. La valutazione degli elementi climatici di ciascun punto, necessari al calcolo, è stata effettuata, per le precipitazioni, sulla base della carta delle isoiete (fig. 4) e, per le temperature, sulla base dei grafici temperatura/altitudine precedentemente menzionati.

## BILANCIO IDROLOGICO ED INFILTRAZIONE

Conoscendo l'afflusso medio annuo  $P$ , il deflusso  $D$  e l'evapotraspirazione reale  $E_r$  del bacino, è possibile calcolare dall'equazione di bilancio

$$P = D + E_r + Q_w$$

le perdite per infiltrazione  $Q_w$  del bacino, ovvero la quantità di acqua che nell'anno medio abbandona il bacino per via sotterranea per andare ad alimentare la circolazione profonda. Data la generale approssimazione con cui si determinano le diverse grandezze che compaiono nella soprastante equazione, abbiamo ritenuto opportuno arrotondare i valori dei parametri precedentemente valutati. Pertanto nel nostro caso abbiamo

$$Q_w = P - D - E_r = 930 - 170 - 600 = 160 \text{ mm}$$

che, ragguagliati alla superficie del bacino ( $77 \text{ km}^2$ ) corrispondono a  $12,3 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{anno}$ .

Date le caratteristiche geoidrologiche del bacino del Milia, è lecito attribuire ai soli affioramenti calcarei ed arenacei il volume di infiltrazione determinato. Se consideriamo che tali formazioni hanno una superficie complessiva di circa  $26 \text{ km}^2$ , otteniamo una infiltrazione profonda media annua di  $474 \text{ mm}$  che, rapportata a  $977 \text{ mm}$  di precipitazione media annua di tali aree, ci fornisce un coefficiente medio di infiltrazione profonda  $I_p$  per le aree permeabili pari a circa il 50%. L'affioramento arenaceo ha una superficie di soli  $2 \text{ km}^2$  circa ed un coefficiente di infiltrazione certamente inferiore a quello medio dedotto. Ne risulta che l'infiltrazione in questo affioramento può ritenersi trascurabile rispetto a quella totale, pertanto è ragionevole assumere un valore del 50% come coefficiente di infiltrazione profonda di calcari e diaspri.

## IDROGEOLOGIA

La formazione carbonatica del Trias superiore costituisce senza dubbio l'acquifero principale della zona. Abbiamo visto che, mediamente nell'anno, la ricarica di tale acquifero da parte del ba-

cino in oggetto può considerarsi di circa 12 milioni di metri cubi. Data la finalità del presente lavoro, è necessario cercare di stabilire quanti di questi 12 milioni di metri cubi possano andare ad alimentare effettivamente il serbatoio del campo geotermico di Larderello.

Basandoci sullo schema idrogeologico di fig. 1, notiamo che nell'area del bacino del Milia esiste un alto piezometrico con asse orientato grosso modo E-W che separa la circolazione idrica verso il campo di Larderello da quella verso WSW.

Possiamo, quindi, suddividere l'area in esame in due sottobacini le cui acque seguono circuiti diversi. Per disporre di ulteriori informazioni sulla situazione idrogeologica profonda del bacino del Milia, è stata redatta la carta di fig. 6<sup>(3)</sup> raffigurante le isobate del tetto del basamento filladico-quarzitico e quindi il letto delle formazioni carbonatiche che costituiscono l'acquifero principale. Dall'osservazione della carta, si nota che la parte



Fig. 6 - Isobate del tetto del basamento quarzitico-filladico, m s.l.m.

(3) Tale carta è stata costruita sulla base dei dati ENEL (GIANELLI et al., 1978) per la zona di Monterotondo e delle stratigrafie dei pozzi della Solmine per la parte orientale del bacino.

orientale del bacino è caratterizzata da un alto strutturale con due assi principali, l'uno in direzione appenninica e l'altro in direzione antiappenninica. La struttura, procedendo poi verso ovest, degrada progressivamente con un andamento caratterizzato da alti e bassi relativi. Considerando la parte orientale del bacino e confrontando le quote del tetto del basamento filladico con le quote piezometriche, si comprende come gli assi strutturali positivi rappresentino degli spartiacque geologici che regolano la circolazione delle acque meteoriche infiltratesi entro gli affioramenti carbonatici soprastanti. Basandoci pertanto sulle indicazioni, sia di carattere piezometrico, sia strutturale, possiamo tracciare i presumibili spartiacque idrogeologici (fig. 7) che suddividono l'area in esame in tre sottobacini di assorbimento.

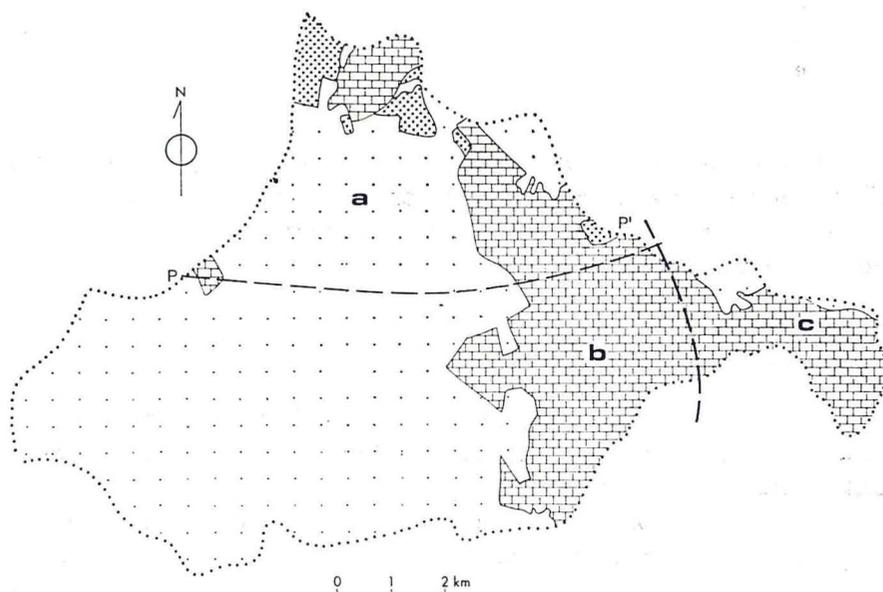


Fig. 7 - Sottobacini di alimentazione.

Le aree di alimentazione dei sottobacini **b** e **c** sono costituite da carbonati, pertanto, in base alle considerazioni precedenti, possiamo ritenerle caratterizzate da un valore di  $I_p$  pari a circa il 50%.

Utilizzando tale valore e considerando la superficie degli affioramenti calcarei presenti nei due sottobacini precedenti e la rela-

tiva alimentazione meteorica, è possibile calcolare per differenza il contributo medio annuo alla circolazione sotterranea del sottobacino **a**, di cui circa il 22% degli affioramenti permeabili è costituito dalle arenarie del macigno. In tal modo si deduce per tale area una infiltrazione media di  $4 \times 10^6$  m<sup>3</sup>/anno. In Tab. 2 viene fornito un quadro riassuntivo degli elementi caratteristici dei singoli sottobacini.

TAB. 2 - Dati caratteristici dei sottobacini.  
Anno medio (1970-'76)

Sottobacini	Area di assorb. km <sup>2</sup>	Precip. media annua mm	Infilt. media 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> /anno
<b>a</b>	9	965	4,0
<b>b</b>	12	955	5,7
<b>c</b>	5	1050	2,6

In base alle precedenti considerazioni si ritiene che solo gli affioramenti della zona **a** contribuiscono alla alimentazione del serbatoio geotermico con un volume medio annuo pari al valore precedentemente calcolato.

## CONCLUSIONI

In base alle attuali conoscenze, si può affermare che 1/3 circa del volume medio annuo infiltratosi entro il bacino del Milia va a contribuire alla ricarica del campo geotermico di Larderello.

Tuttavia, in considerazione che lo spartiacque piezometrico P-P' (fig. 7) si trova in condizioni dinamiche, ovvero tende ad arretrare progressivamente verso sud per l'interferenza dello sfruttamento geotermico con l'acquifero, è possibile che la ricarica media annuale del campo da parte del bacino del Milia possa incrementarsi nel tempo.

## BIBLIOGRAFIA

Annali idrologici. Min. LL.PP. Ufficio speciale del Genio Civile per il Servizio Idrografico con sede in Pisa. Parte I 1970-74, Parte II 1970-71.

- BAGNOLI G., GIANELLI G., PUXEDDU M., RAU A., SQUARCI P., TONGIORGI M. (1979) - A tentative stratigraphic reconstruction of the Tuscan paleozoic basement. *Mem. Soc. Geol. It.*, **20** (1), 99-116.
- CELATI R., NOTO P., PANICHI C., SQUARCI P., TAFFI L. (1973) - Interactions between the steam reservoir and surrounding aquifers in the Larderello geothermal field. *Geothermics*, **2** (3-4), 174-185.
- CRAIG H. (1963) - The isotopic geochemistry of water and carbon in geothermal areas, in: TONGIORGI E. (ed.) - Nuclear geology on geothermal areas: Spoleto 1963: 17-53.
- FERRARA G. C., GONFIANTINI R., PANICHI C. (1965) - La composizione isotopica del vapore di alcuni soffioni di Larderello e dell'acqua di alcune sorgenti e mofete della Toscana. *Atti Soc. Tosc. Sci. Nat., Mem., Ser. A*, **72**, 570-591.
- GIANELLI G., PUXEDDU M., SQUARCI P. (1978) - Structural setting of the Larderello geothermal region. *Mem. Soc. Geol. It.*, **19**, 469-476.
- GRASSI S. (1981) - Valutazione indiretta della riserva idrica del suolo del bacino del Farma. Rapporto Interno Ist. Int. Ric. Geot.
- OLIVIERO S. (1963) - Osservazioni sul giacimento di pirite del Ritorto (Massa Marittima, Prov. di Grosseto). *Boll. Soc. Geol. It.*, **82** (1), 121-241.
- PANICHI C., CELATI R., NOTO P., SQUARCI P., TAFFI L., TONGIORGI E. (1974) - Oxygen and hydrogen isotope studies of the Larderello (Italy) geothermal system, in: Isotope techniques in groundwater hydrology 1974, vol. II: Vienna, Internat. Atomic Energy Agency, 3-28.
- PETRACCO C., SQUARCI P. (1975) - Hydrological balance of Larderello geothermal region. Second United Nations Symposium on the Development and Use of Geothermal Resources, San Francisco, vol. 1. 521-530.

(*ms. pres. il 30 aprile 1982; ult. bozze il 31 dicembre 1982*).