

GIOVANNI ARNONE *

STUDIO DELLE SORGENTI TERMALI DEL LAZIO SETTENTRIONALE

RIASSUNTO. — Sulla base della carta gravimetrica e di alcuni sondaggi eseguiti in zona, si interpreta la situazione strutturale del substrato sedimentario della coltre vulcanica. La falda acquifera profonda contenuta nelle formazioni carbonatiche mesozoiche è separata dall'insieme di falde superficiali, sinteticamente denominate « acquifero superiore », dall'interposizione dei sedimenti prevalentemente argillosi del Cenozoico-Quaternario inferiore.

Utilizzando il diagramma di Piper, le acque calde emergenti nella regione sono state classificate in tipi di famiglie geochimiche.

I risultati ottenuti applicando sia il geotermometro SiO_2 , sia il geotermometro Na-K-Ca per lo studio delle temperature delle acque calde in profondità, risultano convergenti nei due metodi con scarti minimi delle temperature determinate.

ABSTRACT. — On the basis of gravimetrical map and some wells drilled in the region, structural situation of sedimentary substratum of volcanic cover is interpreted.

The deep aquifer contained in mesozoic carbonatic formations is separated from the group of water bearings known as « upper aquifer » by intercalation of mainly clay sediments of Cainozoic-Lower Quaternary age.

Using Piper diagram, hot waters springing out in the region have been classified in types of geochemical families.

Results obtained using both the SiO_2 and Na-K-Ca geothermometers for the study of the temperatures of hot waters in depth, are convergent in the two methods and show very little differences in the determined temperatures.

Introduzione

Del Lazio settentrionale (fig. 1), esiste una vasta bibliografia a carattere geologico, vulcanologico, petrografico e idrogeologico; in questa zona sono state effettuate, inoltre, numerose prospezioni geofisiche, geochimiche, indagini per la ricerca di forze endogene e di mineralizzazioni uranifere.

Lo studio delle acque calde sotterranee è qui svolto utilizzando il diagramma di Piper al fine di avere la visione d'insieme delle variazioni della loro composizione chimica e la loro suddivisione in famiglie geochimiche e da qui risalire a valutare il significato del geotermometro SiO_2 e quello del geotermometro Na-K-Ca. I dati geotermometrici si rivelano utili per le ricerche di fluidi caldi.

* Servizio Geologico d'Italia - Largo S. Susanna 13, 00187 Roma.

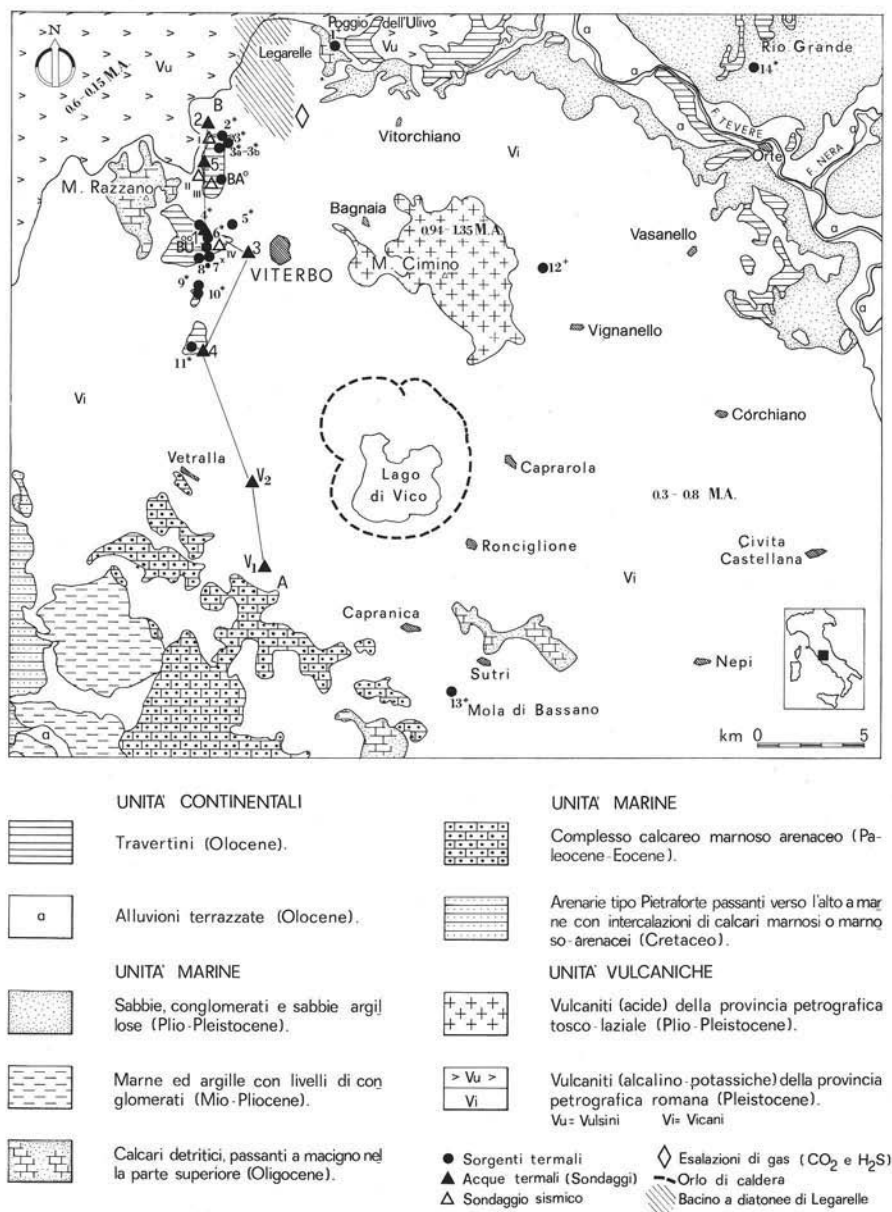


Fig. 1. — Schema geologico dell'area in esame (Lazio settentrionale).

Notizie geologiche

Il Lazio settentrionale è caratterizzato da numerose manifestazioni di acque termali con esalazioni di gas (CO_2 e H_2S), verosimilmente connesse ad un anormale flusso di calore.

L'area esaminata nel presente studio è compresa nei fogli geologici 137 « Viterbo » e 143 « Bracciano », alla scala 1:100.000. Si tratta di una regione caratterizzata da affioramenti dovuti al prevalente accumulo di rocce piroclastiche che poggiano su un substrato impermeabile costituito da formazioni sedimentarie marine (fig. 1). Le più antiche unità stratigrafiche note, ma non affioranti, sono rappresentate da sedimenti carbonatici del Trias (cfr. fig. 2). Al di sopra si stende un insieme di unità litostratigrafiche in parte autoctone e in parte alloctone; localmente forse è presente anche una successione autoctona continua, di età compresa tra il Giurassico e l'Oligocene.

La parte alta di questo insieme, con facies di flysch, affiora sia a W di Viterbo, sia a S di Vetralla, sia infine fra Ronciglione e Sutri. Le soprastanti unità sedimentarie neoautoctone sono composte da marne ed argille con livelli conglomeratici, di età plio-pleistocenica.

Queste affiorano lungo tutto il bordo settentrionale della zona in esame, mentre le altre sono presenti in vari luoghi della fascia occidentale della stessa area. Altri piccoli e sporadici affioramenti si osservano anche all'interno dell'area occupata dalla coltre vulcanica, in corrispondenza di culminazioni strutturali sede di incisioni fluviali.

I prodotti vulcanici appartengono a due province petrografiche distinte: quella tosco-laziale e quella romana. Della prima fanno parte le vulcaniti acide del monte Cimino; alla seconda appartengono le vulcaniti alcalino-potassiche dei monti Vulsini e dell'apparato vulcanico di Vico. Le datazioni radiometriche (M. NICOLETTI, 1969; E. LOCARDI e altri, 1974; M. NICOLETTI e altri, 1979) indicano un'età compresa tra 0,94 e 1,35 M.A. per le vulcaniti cimine, tra 0,3 e 0,8 M.A. per le vulcaniti vicane e tra 0,15-0,6 M.A. per le vulcaniti vulsine.

L'apparato vulcanico del monte Cimino è formato da domi quarzolattici, da colate laviche e da ignimbriti.

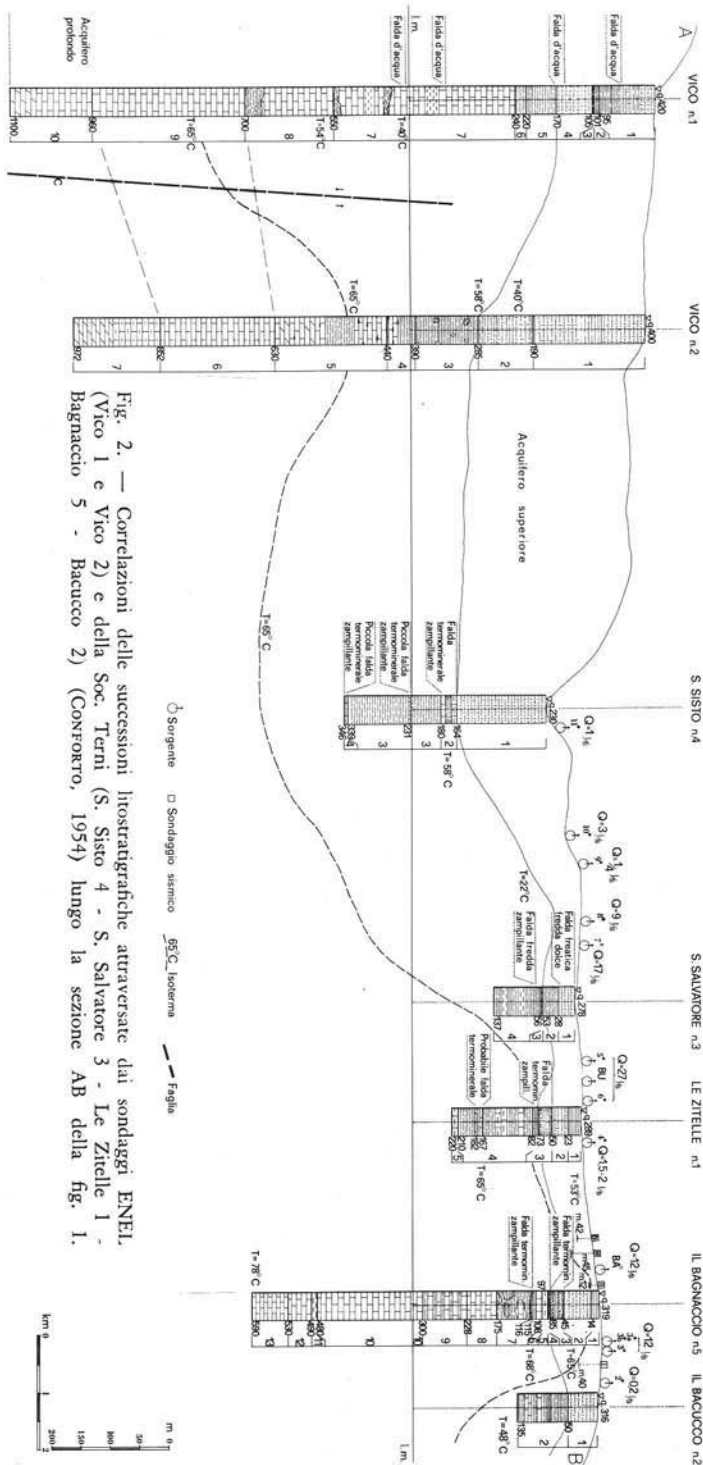
Presso Bagnaia, ad E di Viterbo, affiora alla quota di 400-500 m s.l.m. un piccolo lembo di argille, attribuite al Pliocene, la cui presenza potrebbe essere dovuta ai movimenti di risalita dei domi dell'apparato cimino che lo avrebbe sollevato rispetto alla sua posizione originaria.

Le vulcaniti dell'apparato vicano ricoprono buona parte degli edifici cimini. Hanno natura alcalino-potassica e la loro composizione è compresa fra trachiti-latiti e tefriti-fonoliti.

Nell'angolo NW dell'area presa in esame affiorano tufi stratificati varicolori dell'apparato vulsino con colate di lave, argille e diatomiti lacustri e strati o banchi di travertino. Tali vulcaniti sono delimitate dai rilievi del substrato sedimentario affiorante ad occidente di Viterbo.

Il bacino diatomeifero di Legarelle è compreso tra i rilievi vulcanici cimini e vulsini. La deposizione delle diatomee era favorita dall'apporto in silice derivante dall'attività di piccoli apparati vulcanici coevi che gravitano nello stesso bacino (O. FERRETTI & D. MOLIN, 1971).

La genesi delle manifestazioni vulcaniche della provincia tosco-laziale (MARI-



NELLI, 1967; BARBERI e altri, 1971) è da ricercarsi in fenomeni collegati ad un magmatismo acido di origine crostale che si è sviluppato sul versante tirrenico dell'Appennino a partire dal Miocene superiore, in fase tardo-orogena.

A N di Vitorchiano, sui versanti della valle del F. Tevere e in una vasta area ad occidente di Viterbo (non lontano dalle sorgenti del Bagnaccio e del Bullicame) affiorano estese placche di travertino la cui origine (BERTINI e altri, 1971 a) è connessa a venute di acque bicarbonate nel quadro delle manifestazioni idrotermali che hanno rappresentato la fase conclusiva della locale attività vulcanica. In quello stadio sarebbero infatti avvenute reazioni ipogee tra le acque solfuree ad alta temperatura (manifestazioni tardive) e le formazioni calcaree del basamento con conseguente formazione dei fluidi ricchi in CO_2 .

Condizioni strutturali e morfologia del substrato

La carta delle isoanomalie di Bouguer (fig. 3) ha permesso di individuare varie strutture gravimetriche positive.

Nella parte occidentale dell'area, a pochi chilometri a W di Viterbo, i massimi gravimetrici corrispondono ad una dorsale verosimilmente delimitata da due faglie: la più occidentale di queste ha direzione NNW-SSE e la seconda passante presso Viterbo ha direzione N-S; una terza faglia con direzione circa N-S, individuabile più ad oriente, si estende da N di Vasanello fino a Civita Castellana.

Dall'andamento delle isoanomalie sembra si possa individuare anche un sistema di dislocazioni con direzione prossima a E-W; le più marcate di esse potrebbero essere quelle vicino a Vitorchiano, quelle da Viterbo a Vignanello e altre a S di Ronciglione.

Le linee di frattura con direzioni NNW-SSE, N-S, WNW-ESE sembrano rispecchiare l'assetto tettonico regionale, la cui ultima fase è caratterizzata da una distensione, iniziata nel Miocene superiore ed attiva fino ad oggi, con conseguente formazione del graben di Caprarola, nella parte centrale dell'area.

I sondaggi dell'ENEL e i sondaggi della Soc. Terni (CONFORTO, 1954) allineati secondo quanto indicato in fig. 1, dimostrano che non esistono particolari accumuli di materiale lavico nel sottosuolo; le anomalie gravimetriche sono pertanto da riferirsi, almeno in quella zona, alle condizioni esistenti nel complesso dei corpi sottostanti.

I sondaggi Vico 1 e Vico 2 hanno raggiunto, rispettivamente, una profondità di m 1.100 e m 972, dopo aver attraversato, nel tratto inferiore, le facies carbonatiche del Trias superiore. I sondaggi della Soc. Terni si sono arrestati invece nel flysch, ad eccezione del foro Bagnaccio 5 che ha raggiunto, a m 530, i calcari selciferi e le brecce del Lias (CONFORTO, 1954).

La correlazione dei sondaggi, presentata nella fig. 2 può risentire del fatto che i diversi Autori non hanno sempre rappresentato in modo omogeneo quelle che talvolta sembrano essere le stesse unità litostratigrafiche.

Alcuni dati della sismica a riflessione (CONFORTO, 1954) indicano, per la zona

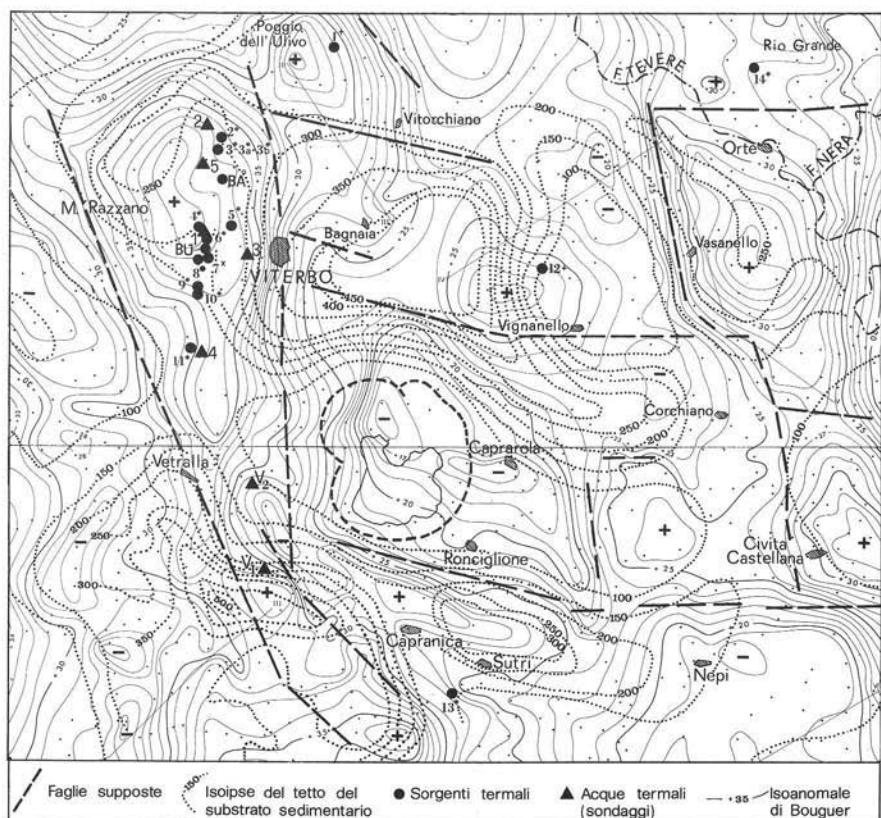


Fig. 3. — Carta gravimetrica (Servizio Geologico d'Italia) - Fogli 137: « Viterbo » e 143: « Bracciano »: isoanomale di BOUGUER dell'area in esame (Lazio settentrionale).

delle manifestazioni di sorgenti termali situate ad W di Viterbo, l'esistenza di un orizzonte di base, posto a circa 1.000 m di profondità, caratterizzato da un valore della velocità delle onde elastiche di 5.700 m/s, corrispondente a quella delle rocce carbonatiche attraversate dai sopra citati sondaggi.

Dalla carta delle isoanomale rappresentate in fig. 3 risulta che nell'ambito della zona del graben di Caprarola, il substrato della copertura vulcanica è caratterizzato dalla presenza di depressioni dovute principalmente ad un collassamento trasversale, rispetto alla zona di sollevamento che è invece allungata secondo direzioni appenniniche. Infatti si osserva: una prima depressione allungata in direzione NW-SE, e ubicata a W della dorsale compresa tra Viterbo e Vetralla; una seconda depressione tra il lago di Vico e Civita Castellana; una terza depressione si allunga da N verso S, con direzione NW-SE, tra Vasanello e Vignanello.

Nel settore occidentale dell'area in esame, figura una dorsale sepolta che si estende da Poggio dell'Ulivo fino a monte Razzano e Bagnaia; indi sempre ad W di Viterbo, continua nella stessa direzione fino all'altezza di Vetralla e poi prosegue in direzione NW-SE per Capranica e Sutri.

In definitiva, dall'esame della carta gravimetrica si è potuto rilevare:

- 1) alti strutturali ai margini laterali della regione;
- 2) una zona centrale caratterizzata dalla presenza del graben di Caprarola e da quello tra Vasanello e Vignanello;
- 3) due probabili sistemi principali di fratture, uno appenninico e l'altro con direzione pressochè trasversale.

Idrogeologia

1) *Bacino idrografico superficiale*

Il reticolo idrografico della regione presenta una struttura radiale che si sviluppa dalla sommità dei rilievi verso il bordo esterno dei singoli apparati vulcanici cimino e vicano; all'interno delle conche il reticolo è centripeto. Nell'apparato cimino il reticolo è prevalentemente centrifugo.

Idrograficamente l'area in questione appartiene al bacino imbrifero del F. Tevere.

TABELLA 1
Pluviometria dell'area in esame

Stazioni pluviometriche	Medie annue mm	Numero giorni piovosi
Vetralla	838	57
Viterbo	777	82
Soriano nel Cimino	1239	86
Orte	969	86
Capranica di Sutri	1271	77
Sutri	1093	80
Nepi	968	80
Ronciglione	1453	81
Civita Castellana	1059	75

Nella tabella 1, sono riportate le precipitazioni medie annue ed il numero di giorni piovosi per il trentennio 1921-1950 (Ministero dei LL.PP. - Servizio Idrografico, 1951).

2) *Bacino idrogeologico sotterraneo*

Dal punto di vista idrogeologico la coltre vulcanica, dovuta alle eruzioni dell'apparato vicano che occupano gran parte dell'area in esame, rappresenta un mezzo di assorbimento la cui permeabilità varia da luogo a luogo, dipendendo essenzialmente dai caratteri litologici intrinseci, dal grado di cementazione delle rocce e dal loro stato di alterazione.

I tufi, di norma ben stratificati, possono essere sufficientemente idrovori se non sono argillificati e se costituiti da elementi non fini; le lave tefritico-leucitiche si presentano abbastanza fratturate da dare luogo ad una permeabilità per fessurazione.

In seno alla copertura vulcanica, ed in particolare nella parte alta di essa, si riscontrano talvolta livelli impermeabili costituiti da tufi argillificati o da argille lacustri che formano il letto di falde sospese. Il substrato della coltre vulcanica, è costituito da terreni impermeabili eocenico-oligocenici prevalentemente argillosi nel settore ad occidente dell'allineamento Viterbo-lago di Vico, e da sedimenti argillosi del Pliocene e del Pleistocene prevalenti nel settore orientale.

Più precisamente, in questo settore orientale le formazioni neogeniche sono distribuite secondo due fasce allungate in direzione appenninica; quella più ad W è occupata da sedimenti del Pliocene inferiore ed ha una larghezza in affioramento di circa 3 km; quella più ad E, limitata dal F. Tevere e dalla «catena amerina», è occupata da sedimenti del Pliocene medio-superiore e forse anche pleistocenici.

I limiti di queste fasce (G.P. BRANDI e altri, 1972) corrisponderebbero a fratture prodottesi in momenti diversi nel corso della tettonica distensiva post-parossismica.

Dalla morfologia del tetto del substrato impermeabile (cfr. fig. 3) si ricava che gli spartiacque sotterranei non coincidono con quelli superficiali, per cui la circolazione della falda del substrato pre-vulcanico dovrebbe avvenire lungo direzioni diverse rispetto alla circolazione delle acque superficiali.

Al di sotto del substrato impermeabile si trova un complesso Mesozoico costituito da calcari selciferi e calcari dolomitici. Per la presenza di soluzioni di continuità e di fratture dovute rispettivamente a fenomeni carsici o a movimenti tettonici si viene a creare, nelle su accennate sequenze litologiche un'alternanza di notevoli spessori di rocce permeabili e minori spessori di rocce impermeabili.

Possiamo quindi affermare che, dal punto di vista idrogeologico, nella regione in esame (cfr. fig. 2) esistono:

- a) un acquifero superficiale costituito da più falde entro la coltre vulcanica, di spessore variabile da pochi metri ad alcune centinaia di metri;
- b) un acquifero profondo;
- c) un diaframma di rocce impermeabili che separa i due acquiferi.

Manifestazioni

Il bacino idrologico dell'area in studio è ricco di manifestazioni di acque calde fortemente gassate (principalmente per CO_2 ma anche per H_2S), mentre altre sono manifestazioni di acque fredde con CO_2 .

Le sorgenti termali risultano essere non costanti in quanto alcune si sono manifestate con maggiore o minore continuità nel tempo; altre sono diminuite e scomparse e infine altre ancora sono sorte in tempi recenti.

In base alla temperatura, le acque emergenti sono state distinte in:

- acque fredde, con temperatura inferiore a 20°C ;
- acque ipotermali, con temperatura da 20°C a 35°C ;
- acque termali, con temperatura da 35°C a 40°C ;
- acque ipertermali, con temperatura maggiore di 40°C .

1) *Sorgenti termali*

Le sorgenti termali sono connesse ad un'anomalia termica esistente nel Lazio settentrionale (BURGASSI e altri, 1965).

Fra le manifestazioni più importanti di sorgenti termali (fig. 1) vi sono quelle dislocate a pochi chilometri ad W di Viterbo, secondo un allineamento N-S e cioè:

- sorgente Poggio dell'Ulivo (1⁺) con temperatura all'emergenza di 36° C e con portata inferiore a 1 l/s;
- sorgente Bacucco-Vecenzale (2*) con temperatura intorno a 50° C e portata di 0,2 l/s;
- gruppo sorgenti del Bagnaccio (3* - 3a* - 3b* - BA^o), con temperatura compresa fra 38° C e 65° C e con portata complessiva di 12 l/s;
- sorgente Zitelle (4*), con temperatura di 65° C e portata da 1,5 l/s a 2 l/s;
- gruppo sorgenti del Bullicame (5* - 6* - BU^{oo}), con temperatura variabile da 55° C a 57° C e portata totale di 27 l/s;
- sorgenti Gigliola (7^x) e Uliveto (8[●]), presso le Terme Comunali con temperatura all'emergenza di 56° C e 54° C e con portate rispettivamente di 17 l/s e 9 l/s;
- sorgenti di S. Cristoforo e dell'Asinello (9* - 10*), con temperatura compresa fra i 55° C e 58° C e portate da 1/4 di l/s a 3 l/s;
- sorgente Solforosa « il Masso » (11*), con temperatura di 58° C e portata inferiore ad un litro al secondo.

Nel settore centrale della regione figurano:

- sorgente Poggio Leone (12⁺), ad E di Viterbo, con temperatura di 21° C e portata di qualche frazione di litro al secondo;
- sorgente Mola di Bassano (13*) a S di Sutri, con temperatura di 23° C e portata di 0,5 di litro al secondo.

Nel settore orientale del bacino, sulla sinistra del F. Tevere vi è localizzata la sorgente Rio Grande (14*), con temperatura di 22° C e portata di qualche frazione di litro al secondo.

2) *Esalazioni di gas*

Esalazioni gassose si trovano lungo il Fosso dell'Acquarossa, a circa 2,5 km a NW di Vitorchiano, dove attualmente esistono venute di CO₂ e H₂S.

Queste esalazioni (VIGHI, 1956) sono state sfruttate per ricavarne anidride carbonica.

3) *Acque termali (sondaggi)*

Dalle acque termali ricche di CO₂ e subordinatamente di H₂S, riscontrate nei sondaggi (CONFORTO, 1954) Bagnaccio 5, Zitelle 1 e S. Sisto 4, ubicati a W di Viterbo, si riportano nella tabella 2 solo i dati relativi alle caratteristiche idrologiche e fisiche, poichè le analisi delle concentrazioni ioniche delle medesime sono risultate insufficienti per la loro interpretazione geochimica.

TABELLA 2
Caratteristiche idrologiche e fisiche dei sondaggi della Soc. TERNI
 (CONFORTO, 1954)

Sondaggi	Profondità falda	Data	Portata l/s	Temperatura T°C
Bagnaccio 5	da m 45	1951-1952	100	65
	a m 85			
	da m 115			
	a m 116			
Zitelle 1	da m 50	1951-1952	65	68
	a m 82			
	da m 167			
	a m 182			
S. Sisto 4	da m 165	1952	75	58
	a m 180			

Chimismo delle acque

1) *Analisi chimiche*

Per lo studio e l'interpretazione del chimismo delle acque calde emergenti nella regione in esame, sono stati utilizzati i risultati delle analisi chimiche eseguite in diversi tempi e provenienti da varie fonti (Tab. 3).

In particolare le analisi chimiche (FERRARA G.C. e altri, 1973; DALL'AGLIO M. e altri, 1968; TALENTI M., 1940, 1959, 1961, 1962) relative alle sorgenti di acque termali riportate nella tabella 3, sono rielaborate in modo che le concentrazioni ioniche degli elementi maggiori siano espresse rispettivamente in mg/l, meq/l e meq%.

2) *Rappresentazioni grafiche*

È noto che i modi di rappresentazione delle analisi chimiche d'acqua sono numerosi, sia con elementi chimici espressi in valori assoluti che ridotti in percentuali.

Il diagramma di Piper (fig. 4), consentendo una rappresentazione sinottica delle caratteristiche chimiche di particolare significato, facilita l'individuazione dei rapporti e la classificazione per tipi di famiglie geochimiche (CHEBOTAREV, 1955).

In tale diagramma sono indicate la termalità e le salinità totali di ogni campione di acqua.

Come si osserva nella fig. 4 le acque studiate possono raggrupparsi nei seguenti tipi di famiglie geochimiche:

- *solfato-alcalino terrosa-acida*: ad essa appartiene la sorgente 1⁺ Poggio dell'Ulivo con un pH = 3,6;
- *solfato-bicarbonato-alcalino terrosa*: è rappresentata dalle sorgenti 2* - 3* - 3a* - 3b* - BA^o - 4* - 5* - 6* - BU^o - 7^x - 8[●] - 10* - 11* - 14*;
- *bicarbonato-alcalino terrosa e alcalina*: vi appartengono le sorgenti 12⁺ - 13*.

TABELLA 3
Analisi chimica delle acque

PT.	DEGNOMINAZIONE	pH	2°	3°	4°	5°	6°	7°	8°	9°	10°	11°	12°	13°	14°
			mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
1°	FONTE DELL'ULIVO	8	34,5	1579,00	320,64	16,00	63,26	54,58	4,29	16,96	96,60	4,20	16,60	31,28	0,60
2°	BACCOLO-MONTESILVANO	8	64,50	2609,80	535,00	26,84	69,75	152,00	12,50	26,89	37,60	1,43	3,71	35,00	0,89
3°	GRUPPO	8	62,50	2471,10	538,00	26,69	64,53	148,00	12,17	30,29	34,70	1,42	3,91	34,70	0,80
4°	DEL	8	64,40	2505,30	538,00	26,84	64,59	149,00	12,45	29,52	37,00	1,41	3,68	31,70	0,79
5°	DEL	8	64,40	2502,60	586,00	29,84	66,48	149,00	12,45	27,65	37,09	1,61	3,66	43,70	0,88
6°	BACCOLO	8	64,40	2503,70	582,50	26,07	64,48	144,50	11,80	29,56	32,60	1,41	3,50	32,20	0,80
7°	DEL	8	64,40	2503,70	582,50	26,07	64,48	144,50	11,80	29,56	32,60	1,41	3,50	32,20	0,80
8°	DEL	8	64,40	2503,70	582,50	26,07	64,48	144,50	11,80	29,56	32,60	1,41	3,50	32,20	0,80
9°	DEL	8	64,40	2503,70	582,50	26,07	64,48	144,50	11,80	29,56	32,60	1,41	3,50	32,20	0,80
10°	DEL	8	64,40	2503,70	582,50	26,07	64,48	144,50	11,80	29,56	32,60	1,41	3,50	32,20	0,80
11°	DEL	8	64,40	2503,70	582,50	26,07	64,48	144,50	11,80	29,56	32,60	1,41	3,50	32,20	0,80
12°	DEL	8	64,40	2503,70	582,50	26,07	64,48	144,50	11,80	29,56	32,60	1,41	3,50	32,20	0,80
13°	DEL	8	64,40	2503,70	582,50	26,07	64,48	144,50	11,80	29,56	32,60	1,41	3,50	32,20	0,80
14°	DEL	8	64,40	2503,70	582,50	26,07	64,48	144,50	11,80	29,56	32,60	1,41	3,50	32,20	0,80

Le sorgenti riportate nella tabella 3 sono disposte secondo una numerazione progressiva, solo le manifestazioni Bagnaccio e Bullicame sono indicate con le prime due lettere maiuscole della denominazione a cui si fa riferimento nel testo.

I simboli che figurano sui numeri e sulle lettere maiuscole come esponenti rappresentano invece la fonte delle analisi chimiche: 1° (DALL'AGLIO e altri, 1968); 2° (FERRARA G.C. e altri, 1973); BA* (TALENTI, 1940); BU^{oo} (TALENTI, 1959); 7x (TALENTI, 1961); 8* (TALENTI, 1962); S = sorgente.

Di ciascuna sorgente oltre alla denominazione con la quale è conosciuta localmente, vengono dati la temperatura, la salinità totale, i costituenti maggiori, minori, ecc. Le analisi chimiche (FERRARA G.C. e altri, 1973); DALL'AGLIO M. e altri, 1968; TALENTI M., 1940, 1959, 1961, 1962) relative alle sorgenti di acque termali elencate nella tabella 3, sono rielaborate in modo che le concentrazioni ioniche degli elementi maggiori siano espresse rispettivamente in mg/l, meq/l e meq/100.

Come vedremo in seguito la conoscenza della distribuzione dei diversi costituenti maggiori e minori disciolti nelle acque termali emergenti (cfr. fig. 1) sia ad W di Viterbo sia nel settore centrale dell'area in studio sia sulla sinistra del F. Tevere, permette di studiare il chimismo delle acque sotterranee che circolano nella zona in esame, e nello stesso tempo di interpretare la loro termalità sulla base dei risultati ottenuti applicando il geotermometro SiO₂ e il geotermometro Na-K-Ca (FOURNIER R.O. & ROWE J.-J., 1966, e FOURNIER R.O. & TRUESDELL A.H., 1973).

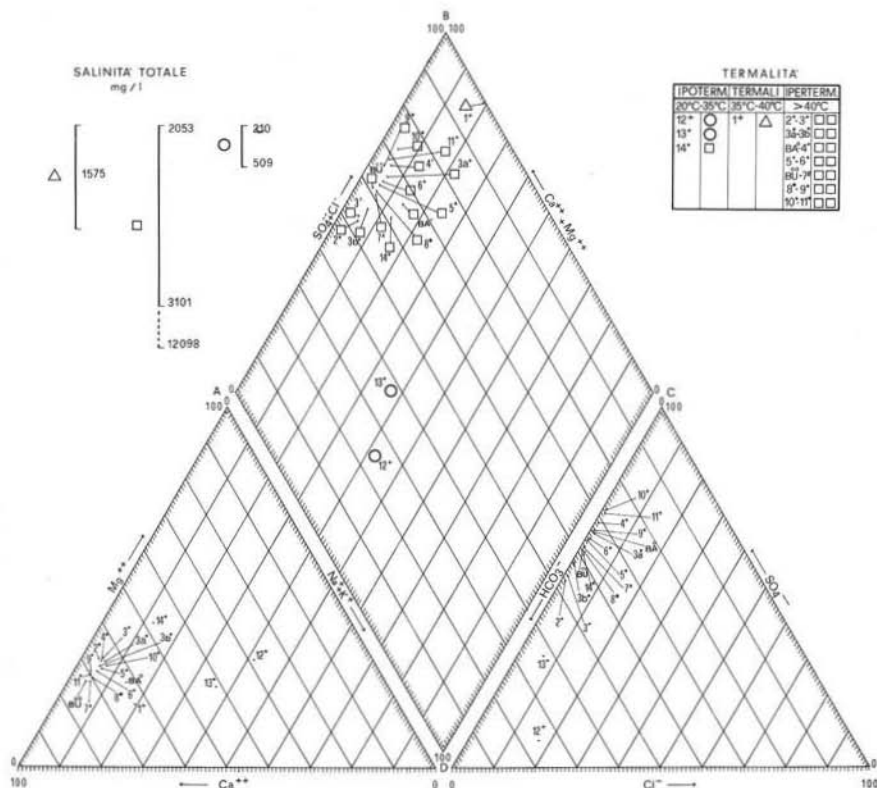


Fig. 4. — Diagramma di PIPER.

Acque: Δ Solfato-alcalino terrose-acide (DALL'AGLIO e altri, 1968). $\square$ Solfato-bicarbonato-alcalino-terrose (FERRARA G.C. e altri, 1973; TALENTI, 1940-1959-1961-1962). $\circ$ Bicarbonato-alcalino terrose e alcaline (DALL'AGLIO e altri, 1968; FERRARA G.C. e altri 1973).

TABELLA 4

Sorgenti termali

Coefficienti di correlazione lineare per ogni coppia di parametri geochimici

	CA	MG	NA	K	HCO ₃	SO ₄	CL
T°C	0.835	0.532	0.232	0.190	0.243	0.344	0.390
CL	0.030	0.509	0.544	0.926	0.696	0.664	
SO ₄	0.728	0.922	0.542	0.726	0.841		
HCO ₃	0.621	0.909	0.295	0.804			
K	0.200	0.642	0.484				
NA	0.068	0.274					
MG	0.836						

Nella tabella 4 sono riportati i valori dei coefficienti di correlazione lineare tra tutte le coppie dei parametri presi in esame.

I coefficienti di correlazione lineare risultano alti e significativi per la maggior parte delle coppie di costituenti maggiori che sono geneticamente associati tra di loro o che derivano dalla dissoluzione dello stesso minerale.

Si noti al riguardo l'alto valore del coefficiente di correlazione tra le coppie: Mg e SO_4 ; Mg e HCO_3 ; K e Cl ecc.

Evidentemente acque di questo tipo riflettono chiaramente la lisciviazione prevalente di formazioni sedimentarie.

3) *Correlazione tra salinità totale ed SO_4^{--}*

Per stabilire nelle grandi linee in quali unità geologiche è avvenuta la circolazione delle acque sotterranee è interessante utilizzare un grafico in cui si rappresenta il rapporto tra salinità totale e lo ione SO_4^{--} . Nella figura 5 l'ascissa rappresenta i valori della salinità totale, mentre l'ordinata indica i tenori dello ione SO_4^{--} delle acque già classificate in famiglie geochimiche.

Le emergenze 2* - 3* - 3a* - 3b* - BA^o - 4* - 5* - 6* - BU^{oo} - 7* - 8* - 9* - 10* - 11*, rappresentanti le acque della famiglia solfato-bicarbonato-alcantino terrosa, sono caratterizzate da un'alta salinità compresa tra i 2.053 mg/l e i 3.101 mg/l e sono disposte a sciame lungo una retta con un coefficiente angolare di 0,47.

Il tenore dello ione SO_4^{--} che varia da 1.054 mg/l a 1.609 mg/l, aumenta con la salinità totale secondo una legge lineare.

La temperatura delle acque all'emergenza è compresa fra 38° C e i 65° C.

Le emergenze 2* - 3* tendono verso acque bicarbonato-solfato alcalino terrose perchè più ricche in bicarbonati.

In base a quanto detto in precedenza si può affermare che la circolazione profonda delle acque calde è avvenuta nell'ambito delle unità calcaree e calcareo-dolomitiche del Mesozoico e nelle unità calcareo-argilloso-arenacee del Paleogene, attraverso fratture dovute a fenomeni carsici o a movimenti tettonici; la circolazione profonda secondo determinati circuiti è stata favorita dall'esistenza nel sistema di un anomalo flusso di calore legato ad un complesso intrusivo-effusivo acido anatettico (LOCARDI e altri, 1975).

Anche l'emergenza 14* di Rio Grande è solfato-bicarbonato-alcantino terrosa con un contenuto salino totale elevatissimo: 12.098 mg/l e 3.362 mg/l di SO_4^{--} . La temperatura è di 22° C.

Evidentemente, si tratta di un bacino con acque miste ed a limitata circolazione con anomala concentrazione degli elementi e quindi prive di significato dal punto di vista geochimico.

Le acque solfato-alcantino terrose acide sono rappresentate solo dalla sorgente 1* Poggio dell'Ulivo, la quale presenta un pH = 3,6 con un contenuto salino di 1.575 mg/l ed un tenore dello ione SO_4^{--} di 1.394 mg/l sono acque connesse a unità neogeniche le quali sono generalmente costituite da argille talora gessose, per cui il chimismo delle acque è influenzato nel senso di un generale aumento della

salinità dovuta in prevalenza a solfati; tuttavia, data la distribuzione limitata e discontinua dell'unità geologica in questione, non esistono altre manifestazioni simili nell'area in studio.

Pertanto si può affermare che le predette acque con temperatura all'emergenza di 36° C sono connesse a unità marine neogeniche con carattere evaporitico, in una zona dove presumibilmente persiste un'attività di tipo solfatarico. All'azione di

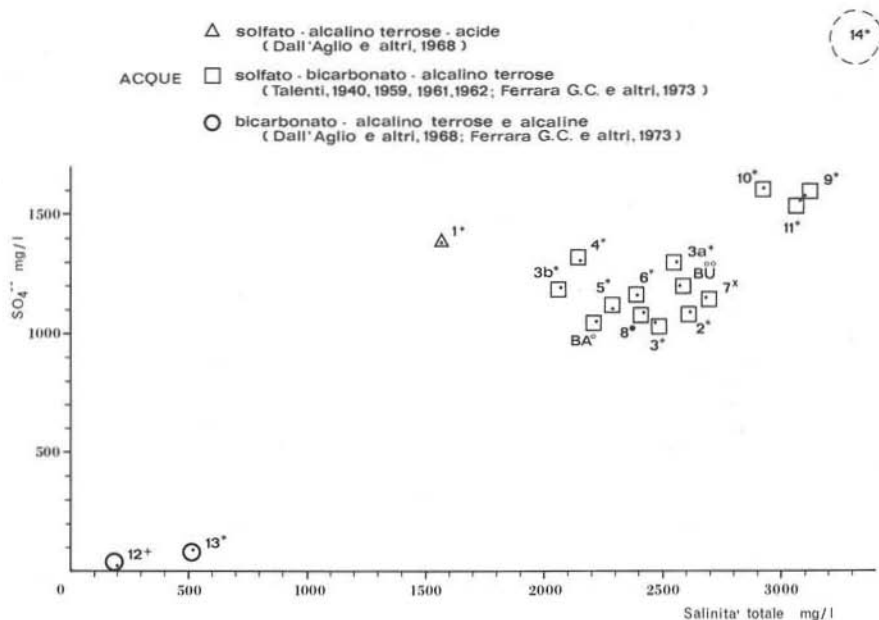


Fig. 5. — Correlazione tra salinità totale ed SO_4^{--} .

attacco esercitata dai prodotti di ossidazione dell' H_2S , si riconduce la lisciviazione di tutti i cationi della roccia, fino alla concentrazione di silice residua. In queste condizioni infatti si verifica l'abbassamento del pH per ossidazione dell'idrogeno solforato disciolto nelle acque.

Le acque bicarbonato-alcaline terrose e alcaline sono rappresentate dalle sorgenti 12* - 13* e presentano una salinità totale variabile da 210 mg/l a 509 mg/l; la temperatura è di 21° C per l'emergenza 12* e 23° C per l'emergenza 13*.

Si tratta di acque a bassa salinità totale, miste e ricche di silice e di alcalini, e circolanti tra il substrato sedimentario, rappresentato da argille marine di età riferibile al Pliocene, e le vulcaniti alcalino-potassiche del Pleistocene.

4) Pressione parziale di CO_2

Nella tabella 5 figura la distribuzione della pressione parziale di CO_2 , calcolata in base alle costanti di equilibrio dei carbonati/bicarbonati, a partire dal tenore in HCO_3^- e pH.

TABELLA 5
 pCO_2 calcolata dai valori di pH e HCO_3

NC	pH	CO ₃	Ca	HCO ₃	H ₂ CO ₃	PCO ₂	T°C
1 ⁺	3.6	10	113	100	467	175	36
2*	6.3	247	183	193	193	912	50
3*	6.5	347	173	173	123	692	65
3*a	6.4	207	173	123	123	672	65
3*b	6.4	277	183	173	153	852	64
BA ^o	-	10	133	984	-	-	38
4*	6.5	237	163	123	834	472	65
5*	8.4	205	163	123	105	554	57
6*	6.5	267	163	123	824	432	56
BU ^{oo}	-	10	183	143	-	-	55
7 ^x	-	10	183	153	-	-	56
8 ^o	-	10	173	133	-	-	54
9*	6.4	247	213	153	123	642	55
10*	6.8	477	183	123	384	212	58
11*	6.2	157	213	153	203	111	59
12 ⁺	7.4	217	665	194	185	474	21
13*	5.7	889	234	394	183	502	23
14*	-	10	143	403	-	-	22

Per le sorgenti BA^o - BU^{oo} - 7^x - 8^o - 14* non è stato possibile calcolare la pCO_2 perchè mancano i dati relativi al pH.

I valori più alti in pCO_2 sono legati alle acque emergenti dalle placche di travertino situate ad W di Viterbo secondo un allineamento N-S.

L'alta pressione di CO_2 porta alla dissoluzione dei cationi costituenti le rocce, tra i quali in primo luogo gli alcalini e gli alcalino terrosi.

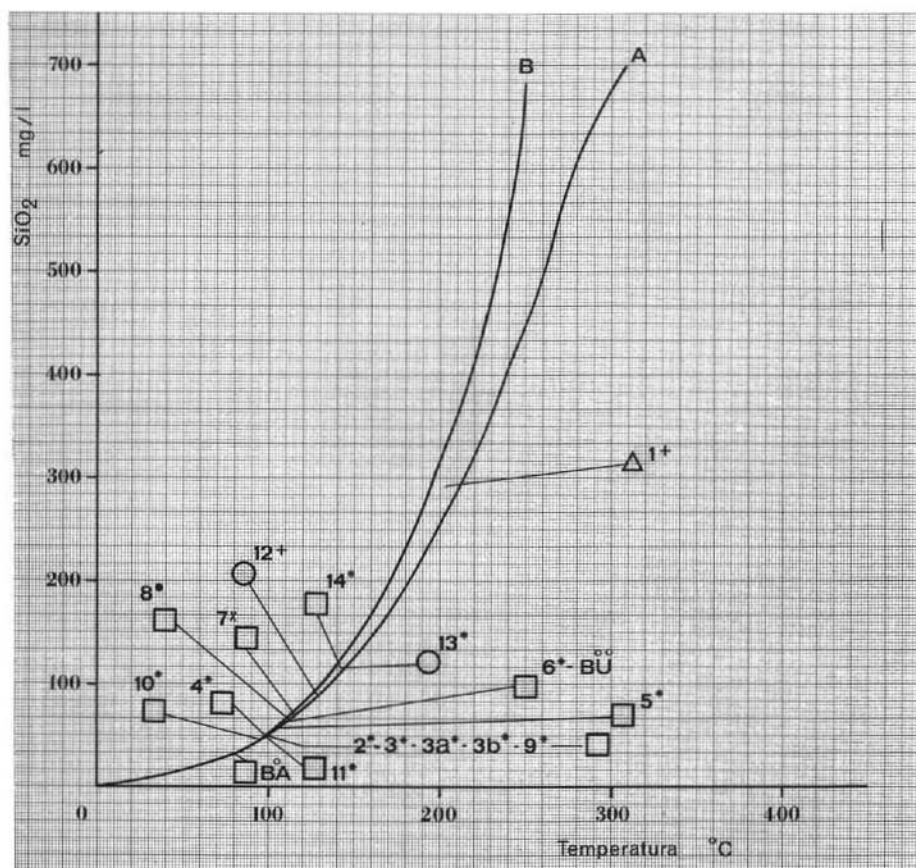
L'alta pressione parziale della CO_2 può essere causata da due processi (BRONDI e altri, 1976):

- lungo superfici di rottura profonde si ha un flusso di CO_2 e subordinatamente H_2S . Questi gas impregnano le falde acquifere che incontrano nel loro percorso, e creano delle aureole riducenti che a volte giungono sino alla superficie;
- l'acido solforico che si origina dall'ossidazione dell' H_2S e/o dei solfuri metallici provoca la liberazione di CO_2 dai bicarbonati presenti nelle acque e dai carbonati presenti nelle rocce.

In altri termini dovrebbe essere la pressione parziale di CO_2 nelle acque prossime alle emergenze, a fungere da parametro indipendente nello stabilire la composizione e la salinità delle acque.

Temperatura

Attraverso i sondaggi eseguiti dall'ENEL e dalla Soc. Terni e i pozzetti di sondaggi sismici I - II - III - IV (CONFORTO, 1954) quest'ultimi effettuati nell'ambito dell'area vulcanica vicana, rispettivamente alla profondità di m 40 - m 12 - m 45 - m 42, è stato possibile ricostruire l'andamento dell'isoterma di 65° C. Da questa ricostruzione si nota che l'anomalia termica aumenta da S verso N (cfr. fig 2), riscontrabile anche nelle manifestazioni superficiali.

Fig. 6. — Geotermometro SiO_2 .

Le anomalie termiche riscontrate nella zona con misure dirette si possono confrontare con i risultati delle prospezioni geochimiche.

Poichè la concentrazione di silice disciolta ed i rapporti ionici molali di Na-K-Ca nelle acque calde all'emergenza possono essere utilizzati come geotermometri, da questi dati si possono ricavare utili indicazioni sulla possibile temperatura dei serbatoi profondi (FOURNIER & ROWE, 1966; FOURNIER, 1969; FOURNIER & TRUESDELL, 1970; FOURNIER & TRUESDELL, 1973).

1) Il geotermometro silice

FOURNIER & ROWE (1966) hanno osservato che il tenore in silice all'emergenza di acqua termale può essere utilizzato per stimare in profondità la temperatura dell'ultimo equilibrio con il quarzo.

Basandosi su due ipotesi di raffreddamento, quegli Autori hanno stabilito delle curve empiriche:

una curva A corrispondente ad un raffreddamento dell'acqua termale per conduzione, cioè con scambio di calore con le rocce incassanti;

una curva B corrispondente ad un raffreddamento dell'acqua termale per espansione adiabatica (senza scambio di calore con l'esterno) a entalpia calore interno) costante (cfr. fig. 6).

TABELLA 6
Calcolo delle temperature di equilibrio

DENOMINAZIONE	N° RIP.	QUOTA S.L.M.	T°C Emergen- za	SiO ₂ mg/l	Temperatura Corrispon- dente T°C	MOLALITA'			Temp. Sotterra- nea T°C	β=1,26	β=1,023
						Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺⁺			
POGGIO DELL'ULIVO	1*	230	36	294.29	202	0.0042	0.00080	0.008	83		108
BACUCCO VESIZIALE	2*	308	50	52.00	99	0.001635	0.00087	0.014421	65		99
GRUPPO BAGNACCIO	3*	310	65	52.00	99	0.001626	0.000887	0.013373	68		101
	3a*		65	52.00	99	0.001611	0.000797	0.013423	65		97
	3b*		64	52.00	99	0.00161	0.00088	0.01462	66		99
	3a*		64	52.00	99	0.00161	0.00088	0.01462	66		99
BAGNACCIO	3a*	315	38	35.70	80	0.00414	0.00043	0.01011	58		81
ZITELLE	4*	295	65	50.00	98	0.001418	0.000823	0.013023	65		98
TIPO BULLICANE	5*	312	57	57.80	105	0.001365	0.000864	0.012275	67		102
	6*	312	56	63.10	108	0.001383	0.000854	0.012474	66		101
BULLICANE	80*	312	55	63.00	108	0.00135	0.00056	0.015115	50		83
GIGLIOLA	7*	252	56	70.00	115	0.00155	0.00090	0.01522	65		99
ULIVETO	8*	260	54	65.00	111	0.00141	0.00079	0.01337	63		97
S. CRISTOFORO	9*	250	55	51.50	99	0.00136	0.00076	0.0174	57		91
ASINELLO	10*	253	58	47.60	95	0.00158	0.00085	0.01525	63		97
SOLFOROSA*IL NASSO	11*	240	59	51.50	98.5	0.001365	0.000769	0.017390	57		91
POGGIO LEONE	12*	550	21	90.09	128	0.00094	0.00017	0.000375	82		107
MOLA DI BASSANO	13*	287	23	115.00	142	0.00152	0.00097	0.001395	120		153
RIO GRANDE	14*	90	28	115.00	142	0.00416	0.0032	0.01356	121		156

Nella tabella 6 si osserva che i tenori in silice disciolta variano da 35 mg/l nella sorgente Bagnaccio, a 294 mg/l nella sorgente Poggio dell'Ulivo. Le temperature corrispondenti all'equilibrio silice-quarzo in profondità sarebbero comprese fra 80° C a Bagnaccio e 202° C a Poggio dell'Ulivo.

Quella calcolata per la sorgente Poggio dell'Ulivo (202° C) è da ritenersi anomala, poichè le sue acque hanno attraversato depositi vulcanici diatomeiferi dove si può supporre che siano state notevolmente arricchite di SiO₂. Quelle calcolate per le sorgenti Poggio Leone (128° C) e Mola di Bassano (142° C) risulterebbero anomale perchè le acque calde si possono essere arricchite in silice durante la loro circolazione nelle vulcaniti vicine.

Anche la temperatura di 142° C calcolata per la sorgente Rio Grande risulterebbe anomala perchè riferita ad una sorgente di scarsa portata con anomala concentrazione degli elementi che ne altererebbero il significato geochimico.

Le altre sorgenti studiate nell'area in esame si raggruppano intorno ad un valore compreso fra gli 80° C del Bagnaccio e i 115° C di Gigliola.

2) Il geotermometro Na-K-Ca

Nello studio di moltissime acque naturali, FOURNIER & TRUESDELL (1973), trovarono che la temperatura dell'ultimo equilibrio tra acqua e roccia, sulla base delle concentrazioni molali di Na-K-Ca, può esprimersi con la seguente formula:

$$F_{(T)} = \lg \text{Na/K} + \beta \lg \sqrt{\text{Ca/Na}} \quad (1)$$

in cui β dipende dalla stechiometria della reazione.

Con l'equazione:

$$T^{\circ}\text{C} = \frac{1647}{2,24 + F_{(T)}} - 273,15 \quad (2)$$

(SWANBERG, 1974) si può calcolare la temperatura dell'equilibrio finale espressa in $^{\circ}\text{C}$.

Il riferimento al geotermometro Na-K-Ca per la valutazione delle temperature sotterranee comporta una certa limitazione del significato dei risultati poichè la temperatura sotterranea dipende da vari fattori e cioè:

- il non equilibrio termico acqua-roccia;
- mescolamento con acque superficiali;
- presenza di CO_2 ;
- precipitazione di CaCO_3 , ecc.

Lo scarto delle temperature stimate secondo le formule (1) e (2) può riflettere tanto gli spostamenti dall'equilibrio chimico, quanto le differenti reazioni intervenute ove è stato depositato il CaCO_3 .

È stato introdotto nell'equazione (2) il valore della temperatura di 65°C misurata direttamente nel sondaggio Bagnaccio 5 (fig. 2) alla profondità di m 85.

Da quanto precede segue che:

$$65^{\circ}\text{C} = \frac{1647}{2,24 + F_{(T)}} - 273,15 \quad (2)$$

da cui: $F_{(T)} = 2,63$.

Ricordando l'equazione:

$$F_{(T)} = \lg \text{Na/K} + \beta \lg \sqrt{\text{Ca/Na}} \quad (1)$$

noto $F_{(T)} = 2,63$ e sostituendo tale valore nella (1) si ha:

$$2,63 = \lg \text{Na/K} + \beta \lg \sqrt{\text{Ca/Na}}$$

Applicando la suddetta equazione a tutte le sorgenti si ricava una serie di valori di β la cui media aritmetica è pari a $\beta m_1 = 1,26$.

Dalla tabella 5, si nota che le temperature calcolate assumendo $\beta m_1 = 1,26$ risultano compatibili a quelle registrate direttamente nei pozzi.

Uguagliando l'equazione (1) tra due sorgenti contigue si ha:

$$\lg \text{Na}_p/\text{K}_p + \beta \lg \sqrt{\text{Ca}_p/\text{Na}_p} = \lg \text{Na}_s/\text{K}_s + \beta \lg \sqrt{\text{Ca}_s/\text{Na}_s}$$

e quindi:

$$\beta = \frac{\lg \text{Na}_s/\text{K}_s - \lg \text{Na}_p/\text{K}_p}{\lg \sqrt{\text{Ca}_p/\text{Na}_p} - \lg \sqrt{\text{Ca}_s/\text{Na}_s}} \quad (3)$$

dove p sta ad indicare le concentrazioni molali degli ioni riscontrati nelle sorgenti precedenti e s è riferito al valore delle concentrazioni molali delle sorgenti seguenti; applicando la (3) e procedendo dalla sorgente Poggio dell'Ulivo alla sorgente Mola di Bassano cioè da N verso S, si ricava una serie di valori di β .

Il β medio, cioè $\beta_{m2} = 1,023$ è stato calcolato sulla media aritmetica di tutti i valori di β scelti fra quelli che presentavano un minimo scarto.

Osservando la tabella 6 si nota che le temperature sotterranee ricavate utilizzando il geotermometro Na-K-Ca per $\beta_{m2} = 1,023$ variano tra 81° C nella sorgente Bagnaccio e 108° C nella sorgente Poggio dell'Ulivo, perchè quelle relative alle sorgenti Mola di Bassano e Rio Grande non sono da tenersi in considerazione per i motivi espressi in precedenza.

Analogamente applicando la (1) per $\beta = 1/3$ solo alle sorgenti con temperatura all'equilibrio acqua-roccia maggiore di 100° C e cioè Poggio dell'Ulivo (1⁺), Bagnaccio (3*), Bullicame (5*), Bullicame (6*) e Poggio Leone (12⁺), le temperature delle acque calde in profondità risulterebbero rispettivamente di 211° C, 254° C, 262° C, 260° C e 208° C.

I valori di β racchiudono la storia idrogeochimica delle acque sotterranee che circolano nell'area in esame.

In base ai risultati esposti nella tabella 6 si può concludere che esiste una convergenza nell'applicazione dei due metodi con scarti minimi delle temperature calcolate. Ciò rende attendibili i risultati sopra ottenuti.

Le temperature sotterranee delle acque calde determinate con il geotermometro Na-K-Ca per $\beta = 1/3$ risulterebbero comprese fra 208° C e 262° C.

BIBLIOGRAFIA

- AMADEI G., MAINO A. (1974) - *Considerazioni geofisiche sull'area compresa nel foglio 143 « Bracciano » della Carta d'Italia al 100.000 dell'I.G.M.* Boll. Serv. Geol. It., 93, 1973 (1), 27-40, 6tt., Roma.
- BALDI P., DECANDIA F.A., LAZZAROTTO A., CALAMAI A. (1974) - *Studio geologico del substrato della copertura vulcanica laziale nella zona dei laghi Bolsena, Vico, Bracciano*. Mem. Soc. Geol. It., 13 (1974), 11ff., 3tt., 575-606, Pisa.

- BARBERI F., INNOCENTE F., RICCI C.A. (1971) - *Il magmatismo - La Toscana Meridionale - Fondamenti geologico-minerari per una prospettiva di valorizzazione delle riprese naturali*. Rend. S.I.M.P., 27 (Fasc. spec.).
- BERTINI M., D'AMICO C., DERIU M., GIROTTI O., TAGLIAVINI S., VERNIA L. (1971 a) - *Note illustrative della Carta geologica d'Italia alla scala 1:100.000. F.º 137 «Viterbo»*. Servizio Geologico d'Italia.
- BRANDI G.P., CERRINA FERONI A., DECANDIA F.A., GIANNELLI L., MONTEFORTI B., SALVATORINI G. (1970) - *Il Pliocene del bacino del Tevere fra Celleno (Terni) e Civita Castellana (Viterbo). Stratigrafia ed evoluzione tettonica*. Atti Soc. Tosc. Sc. Nat., Mem., ser. A, 77, 308-326.
- BRONDI A., DALL'AGLIO M., LOCARDI E. (1976) - *Studio idrogeochimico di alcuni bacini uraniferi del Lazio settentrionale*. Rend. Soc. It. di Miner. e Petrol., 32 (1), 1976, 349-372, 15 ff., 1 tab., bibl., Milano.
- BURGASSI R., CATALDI R., MOUTON J., SCANDELLARI F. (1965) - *Prospezione delle anomalie geotermiche e sua applicazione alla regione amiatina*. Industria Mineraria, a. 16, 15 pp., 7 ff., bibl., Roma.
- BURRI C. (1961) - *Le province petrografiche post-mesozoiche dell'Italia*. Rend. Soc. Min. It., 17, 3-40, Pavia.
- CHEBOTAREV I. I. (1955) - *Metamorphism of natural waters in the crust of weathering. Part 1: Geoch. et Cosmoch. Acta, 8, 22-48; Part 2: Geoch. et Cosmoch. Acta, 8, 137-170; Part 3: Geoch. et Cosmoch. Acta, 198-212*.
- CONFORTO B. (1954) - *Risultati della prima fase di ricerche di forze endogene nel Viterbese*. L'Ingegnere, a. 28 (1), 1-16, Milano.
- FERRARA G.C., BALDI G.P., MASELLI L., PIERETTI G. (1973) - *Hydrogeochemistry of the Region between Monte Amiata and Rome*. Geotermica, 2 (3-4), 124-141, 12 ff., 1 tab., bibl., Pisa.
- FERRETTI O., MOLIN D. (1971) - *Concentrazioni di carnotite in un bacino diatomifero del Viterbese*. Rend. Soc. It. di Miner. e Petrol., 27, 150-165, bibl., Milano.
- FOURNIER R.O., ROWE J.J. (1966) - *Estimation of underground temperatures from the silic content of water from hot springs and wet-steamwells*. Amer. J. Sci., 264, 685.
- FOURNIER R.O., TRUESDELL A.H. (1970) - *Chemical indicators of subsurface temperature applied to hot spring waters of Yellowstone National park, Wyoming, U.S.A.* in U.N., symposium on the development and utilization of geothermal resources, Pisa, 1970, 2, Part 1: Geotermica (1970), special issue 2, pt. 1.
- FOURNIER R.O., TRUESDELL A.H. (1973) - *An empirical Na-K-Ca geothermometer for natural waters*. Geoch. Cosmoch. Acta, 37, 1255-1275.
- LOCARDI E., MOLIN D. (1974) - *Tettonica, vulcanismo e bacini uraniferi nel Lazio. L'Italia nell'ambito dell'evoluzione del Mediterraneo*. Soc. Geol. It., 29 pp., Parma.
- LOCARDI E., MOLIN D. (1975) - *Ricerche per uranio nel Lazio settentrionale*. C.N.E.N., Serie Rapporti, 106 pp., Roma.
- MIN. LL. PP. - SERVIZIO IDROGRAFICO (1951) - *Precipitazioni medie mensili ed annue e numero dei giorni piovosi per il trentennio 1921-1950*. Pubbl. n. 24 (1), Poligrafico dello Stato, Roma.
- MARINELLI G. (1967) - *Genese des magmas du volcanisme Plio-Quaternaire des Apennins*. Geol. Rdsch., 57 (1), 127-141, Stuttgart.
- NICOLETTI M. (1969) - *Datazioni Argon-Potassio di alcune vulcaniti delle regioni vulcaniche Cimina e Vicana*. Per. Min., 38 (1), 1-20, Roma.
- NICOLETTI M., PETRUCCIANI C., PICO M., TRIGILA R. (1979) - *Determinazione Kr di vulcaniti della regione Vulsina (Toscana Sud)*. Soc. It. Miner. e Petrol., in corso di stampa.
- SWAMBERG C.A. (1974) - *The application of the Na-K-Ca geothermometer to thermal areas of Utah and the Imperial Valley, California*. Geothermics, 3 (2), Pisa.
- TALENTI M. (1940, 1959, 1961, 1962) - *Analisi chimiche*. Inedito.
- VIGHI L. (1956) - *Sulla genesi dei solfuri di ferro e dello zolfo nativo solfatarici di alcune località del Lazio*. Boll. Soc. Geol. It., 75 (4), 93-105, Roma.