

S. GRASSI (\*)

## SUL COMPORTAMENTO DELLA SORGENTE CALIDARIO (VENTURINA-LI) NEL PERIODO 1984-1990

**Riassunto** — Sette anni di osservazione sull'erogazione della sorgente Calidario hanno dato modo di acquisire una serie di elementi utili per la caratterizzazione idrologica di questo punto d'acqua. Il rilevamento in continuo della portata ha consentito di esaminare la risposta dell'emergenza alle piogge nel breve tempo e di effettuare un confronto, per l'intero periodo di osservazione, fra erogazione media mensile e pioggia utile, confronto che fornisce significative indicazioni sul comportamento stagionale della sorgente. È stato inoltre possibile controllare le caratteristiche della fase di esaurimento per cinque anni consecutivi, e quindi definire un valore medio della costante di esaurimento della sorgente Calidario, parametro utile per la previsione della portata durante la fase di magra. Analisi chimiche ed isotopiche dei fluidi erogati sono state inoltre effettuate ad integrazione delle osservazioni fisiche.

**Abstract** — *Behaviour of Calidario spring (Venturina-Livorno) during 1984-1990.* A seven years monitoring of the flow-rate of Calidario spring (SW Tuscany), provided useful data for defining the hydrologic behaviour of this water point. The relationship between average daily flow-rate and daily precipitation was examined. The average monthly spring discharge was compared with the monthly precipitation and with the difference between precipitation and actual evapotranspiration for the entire period of study. Based on the characteristics of five successive recession phases, an average value for the recession constant was estimated. This parameter can be used to evaluate the spring discharge during dry periods. Chemical and isotope analyses of the delivered fluid have also been integrated with the physical observations.

**Key words:** Springs, Thermal waters, Hydrogeology, Tuscany.

### INTRODUZIONE

Il sistema idrotermale di Campiglia Marittima comprende due gruppi separati di manifestazioni (sorgenti e pozzi), che erogano ac-

---

(\*) CNR - Istituto Internazionale per le Ricerche Geotermiche - Piazza Solferino 2, Pisa.

que a temperature comprese fra 32 e 47 °C; essi sono localizzati rispettivamente presso il paese di Venturina e presso il paese di Suvereto. Queste manifestazioni sono state oggetto di recenti indagini idrogeologiche e geochimiche (GRASSI *et al.*, 1990; CELATI *et al.*, 1991) basate su osservazioni periodiche dei parametri fisici e chimici dei vari punti d'acqua, a partire da 1983 fino praticamente a tutto il 1986.

Durante questa fase di studio del sistema di Campiglia, considerata la necessità di effettuare una corretta valutazione della quantità di fluido erogato, sono state eseguite periodiche misure di portata sulle varie sorgenti; all'Istituto Idrografico del Genio Civile di Pisa era stato affidato l'incarico del rilevamento in continuo della portata della sorgente Calidario o Bottaccio situata presso Venturina e rappresentante la manifestazione più cospicua dell'area indagata.

Alla fine del 1986, tuttavia, è stato ritenuto opportuno proseguire le misure di portata della sorgente Calidario, utilizzando l'idrometrografo registratore ivi installato dal maggio 1984 su opportuna sezione di misura. È stato così possibile acquisire una serie di dati relativi a circa sette anni (1984-1990) la cui elaborazione fornisce ulteriori elementi utili per una più completa caratterizzazione idrologica di questa sorgente termale, che riveste una particolare importanza nel contesto socio economico della zona di Venturina.

#### IL GRUPPO DI SORGENTI DI VENTURINA

La figura 1 mostra lo schema idrogeologico dell'area di studio (GIANNINI, 1955; COSTANTINI *et al.*, 1990) in cui sono presenti, fra l'altro, anche formazioni ignee sia intrusive che effusive (BARBERI *et al.*, 1967) messi in posto rispettivamente 5,7 e 4.7 milioni di anni fa (BORSI *et al.*, 1967). Il gruppo di emergenze termali di Venturina (MERCIALI, 1904) è costituito da tre sorgenti, che si trovano a breve distanza l'una dall'altra ad una quota di 25 m s.l.m., in prossimità del contatto fra gli affioramenti delle formazioni acquifere carbonatiche e le formazioni di copertura.

Le formazioni dell'acquifero principale, costituito dal complesso carbonatico-evaporitico della Falda Toscana, sono rappresentate da un affioramento di calcari liassici di circa 18 km<sup>2</sup>. Le formazioni carbonatiche Mesozoiche, confinate lateralmente da formazioni a bassa permeabilità quali i terreni della sequenza terrigena della Falda Toscana (Dogger-Oligocene) e le unità flyschoidi delle Liguridi (Cretaceo-Eocene), raggiungono le quote inferiori in prossimità del

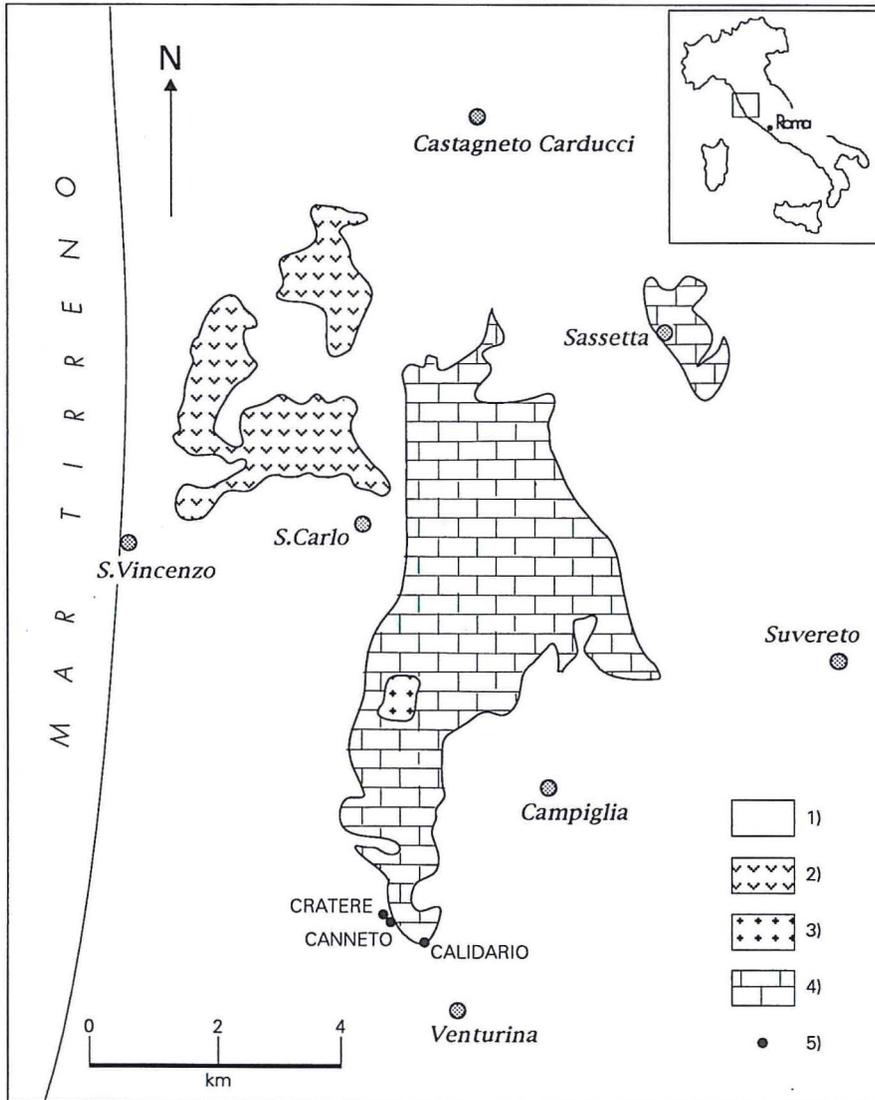


Fig. 1 - Schema idrogeologico della zona di studio. 1) Formazioni di copertura, 2) vulcaniti, 3) granito, 4) formazioni dell'acquifero carbonatico evaporitico, 5) sorgenti termali.

gruppo di sorgenti di Venturina, dove entrano in contatto con i sedimenti alluvionali della pianura. Questi sedimenti, data la prevalenza di depositi argillosi-siltosi, risultano nel complesso poco permeabili, anche se un'attiva circolazione idrica è presente in corrispondenza

dei livelli clastici grossolani. In questi livelli, nell'area circostante le sorgenti, penetrano anche fluidi termali (GRASSI *et al.*, 1990).

Delle tre sorgenti che costituiscono il gruppo di Venturina, la più conosciuta è certamente la sorgente Cratere o Caldana, le cui acque vengono utilizzate dalla locale stazione termale. Questa sorgente, essendo la più calda e salina, è stata spesso oggetto di interesse scientifico (PORLEZZA e PIRRONE 1955; FRANCALANCI, 1959; BENCINI *et al.*, 1977). La temperatura media del fluido erogato è di 44 °C e la salinità (TDS) è di 2.3 g/l. La portata media si aggira intorno a 1 l/s.

A pochi metri dal Cratere, si trova la sorgente Canneto, che con una portata media di 50 l/s alimenta una vicina piscina termale. La temperatura all'emergenza è di 32 °C e la salinità è di circa 1.6 g/l.

Spostata verso il paese di Venturina, a circa 500 m dalle precedenti emergenze, in prossimità del piede del monte si trova la sorgente Calidario o Bottaccio, che alimenta un laghetto utilizzato come piscina termale. Da qui le acque, tracimando dalla cateratta che regola il livello all'interno del laghetto, danno origine al canale «Fossa Calda» ai cui deflussi contribuisce, anche se in minor parte, la sorgente Canneto. Lungo il corso di questo canale le acque vengono successivamente prelevate a scopi irrigui.

La temperatura media della sorgente Calidario è di circa 36 °C ed il contenuto salino è prossimo a 1,7 g/l. Nel periodo 84-86 la portata della sorgente è risultata in media di 220 l/s con massimi intorno ai 420 l/s e minimi di circa 90 l/s.

Le osservazioni sistematiche condotte dall'83 all'86 sui vari punti d'acqua, oltre a fornire i dati chimici e fisici medi sopra riportati hanno messo in evidenza, come discusso da GRASSI *et alii* (1990) e CELATI *et al.* (1991), che:

— tutte le acque sono di tipo  $\text{SO}_4\text{-HCO}_3/\text{Ca-Mg}$  con salinità notevolmente influenzata dal contenuto in  $\text{SO}_4$ ; il contenuto in Cl è limitato a 30-50 mg/l. Il tritio è assente nelle acque del Cratere, mentre raggiunge una concentrazione intorno a 5 U.T. nei fluidi erogati sia dal Canneto che dal Calidario. Il contenuto in  $^{18}\text{O}$  è praticamente costante per le tre emergenze con valori di composizione isotopica dell'ossigeno intorno a  $-6.5\text{‰}$ .

— Nonostante si verificano importanti variazioni di portata in relazione alle condizioni di alimentazione meteorica e dei carichi idraulici nell'acquifero, le caratteristiche geochimiche ed isotopiche dei fluidi erogati rimangono praticamente costanti nel tempo.

— Le principali aree di alimentazione del gruppo di Venturina

sembrano essere essenzialmente rappresentate dall'affioramento dei carbonati mesozoici affioranti immediatamente alle spalle delle emergenze, come suggerisce la notevole erogazione di fluidi a salinità intermedia con significativi contenuti in tritio. È possibile, tuttavia, che contributi attualmente non quantificabili possano derivare anche dalla circolazione regionale.

#### RELAZIONI FRA PRECIPITAZIONI E PORTATE

Per verificare le relazioni fra afflussi meteorici e portate della sorgente si è scelta, come rappresentativa delle piogge per le aree di alimentazione, la stazione pluviometrica di S. Carlo Solvay (fig. 1), ubicata presso il bordo occidentale degli affioramenti carbonatici, ad una quota di 158 m s.l.m.<sup>(1)</sup>. Più significativa sarebbe stata probabilmente la stazione pluviometrica di Sassetta, che si trova ad una quota di circa 350 m s.l.m., prossima a quella media degli affioramenti calcarei della zona di Campiglia; tuttavia la sua prolungata inattività durante il periodo di osservazione ne ha reso impossibile l'utilizzo.

È stata, comunque, notata una buona correlazione fra i dati pluviometrici delle diverse stazioni dell'area a supporto di una piovosità alquanto omogenea nella zona.

La figura 2 riporta alcuni idrogrammi della sorgente Calidario messi a confronto con le relative precipitazioni misurate a S. Carlo. Fermo restando che le risposte della sorgente, a parità di condizioni al contorno, variano in funzione della distribuzione, dell'intensità e della quantità delle precipitazioni, si può osservare che l'onda di piena del Calidario presenta generalmente un certo ritardo rispetto all'evento meteorico. La portata tende ad aumentare quasi immediatamente, ma raggiunge i valori massimi solitamente dopo una decina di giorni.

Tale ritardo è da mettere in relazione a diversi fattori quali:

— la presenza di uno spessore di zona insatura di circa 300 m (la quota media degli affioramenti carbonatici è di circa 350 m s.l.m., mentre il pelo libero della falda idrica dovrebbe aggirarsi intorno ai 40-50 m s.l.m., come indicano vari sondaggi nell'area in esame);

---

(1) Ad un controllo recentemente effettuato con i tecnici dell'Istituto Idrografico del Genio Civile di Pisa è risultato che la quota di 350 m s.l.m. riportata sugli Annali Idrologici per la stazione di S. Carlo Solvay è errata.

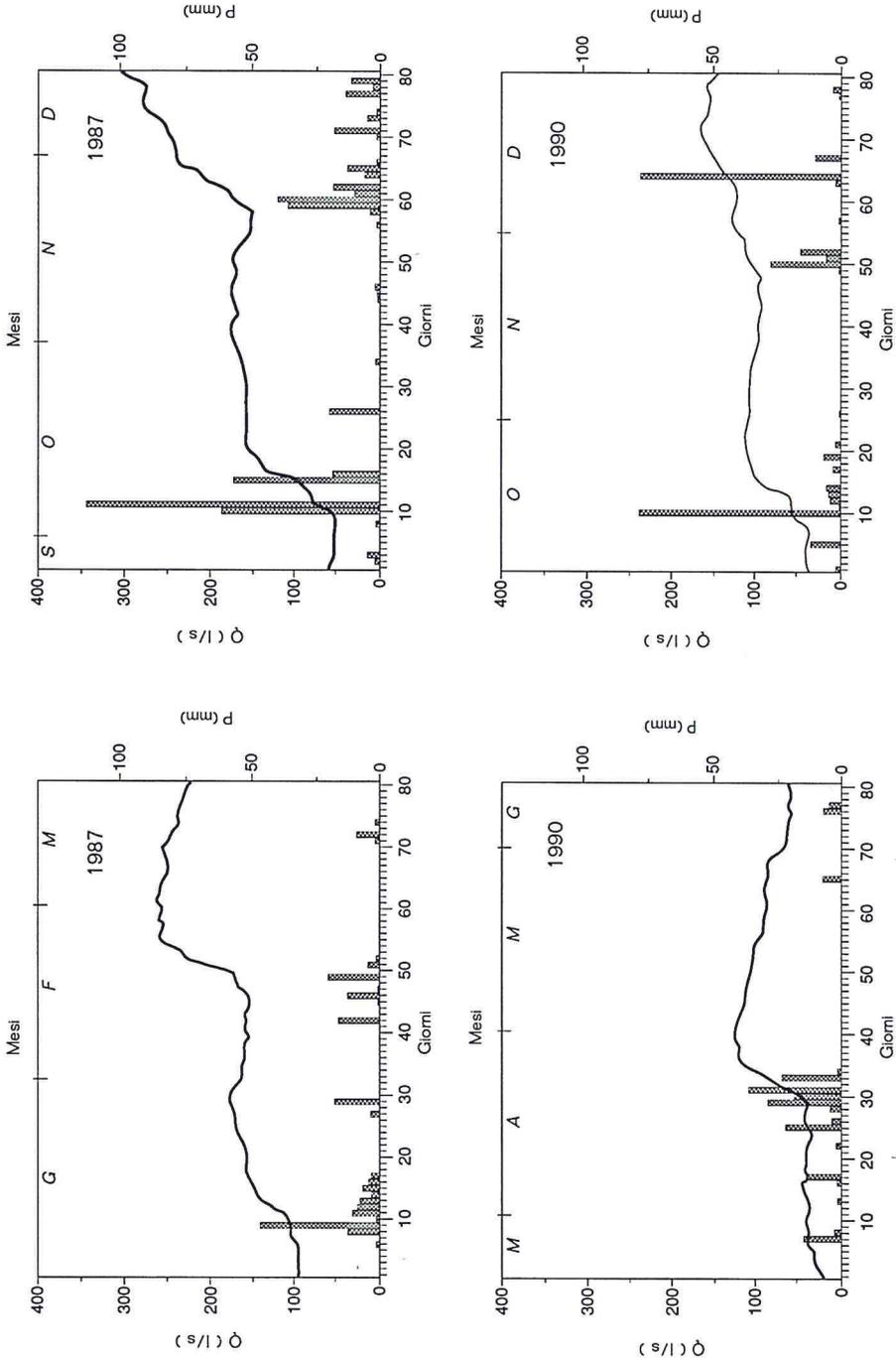


Fig. 2 - Confronto fra andamento della portata media giornaliera della sorgente Calidario e istogrammi della precipitazione a S. Carlo in diversi periodi.

— le dimensioni del sistema e la distanza fra emergenza e zona di massimo carico idraulico;

— la permeabilità dell'acquifero, la quale sembra legata a sistemi di fratture più o meno fitti, piuttosto che a meati di grande dimensione quali i condotti carsici localmente presenti negli affioramenti calcarei della zona.

Che la circolazione alimentante la sorgente in questione non riceva particolari contributi da circuiti carsici è suggerito anche dalle condizioni di stazionarietà termica, chimica ed isotopica rispetto alla notevole variabilità della portata come evidenzia la figura 3.

#### ALIMENTAZIONE ED EROGAZIONE NEL PERIODO 1984-90

Per meglio caratterizzare il comportamento della sorgente Calidario, si è ritenuto opportuno effettuare un confronto strettamente qualitativo fra alimentazione meteorica e portata della sorgente per l'intero periodo di osservazione, utilizzando i dati medi mensili. Tale confronto è stato effettuato considerando non solo il dato pluviometrico, ma calcolando mese per mese la pioggia utile, ovvero la quantità d'acqua piovana che, al netto dell'evapotraspirazione reale, dovrebbe approssimare la potenziale alimentazione dei corpi idrici sotterranei.

L'evapotraspirazione reale è stata valutata applicando il metodo del Thornthwaite (THORNTHWAITE e MATHER, 1957) ai dati pluviometrici di S. Carlo ed utilizzando le temperature misurate nel periodo di osservazione a Suvereto (quota 112 m s.l.m.), unica stazione termometrica della zona. In fig. 4 sono riportati gli andamenti nel tempo della portata media mensile della sorgente, delle precipitazioni a S. Carlo e della pioggia utile ottenuta attribuendo ai carbonati una riserva idrica di 50 mm.

Nei limiti dei metodi utilizzati e della rappresentazione grafica adottata, si nota un generale buon accordo fra andamento della portata e della pioggia utile.

La fase di ricarica dell'acquifero avviene fra ottobre ed aprile, quando consistenti sono gli apporti meteorici e minori sono le perdite per evapotraspirazione. In questo periodo l'alimentazione del sistema supera le perdite dallo stesso, quali il deflusso sorgivo, l'infiltrazione nella pianura, gli eventuali sfruttamenti e i possibili contributi alla circolazione regionale. Si ha pertanto un progressivo aumento del volume idrico immagazzinato nel serbatoio carbonatico e quindi un aumento del carico idraulico; conseguentemente la

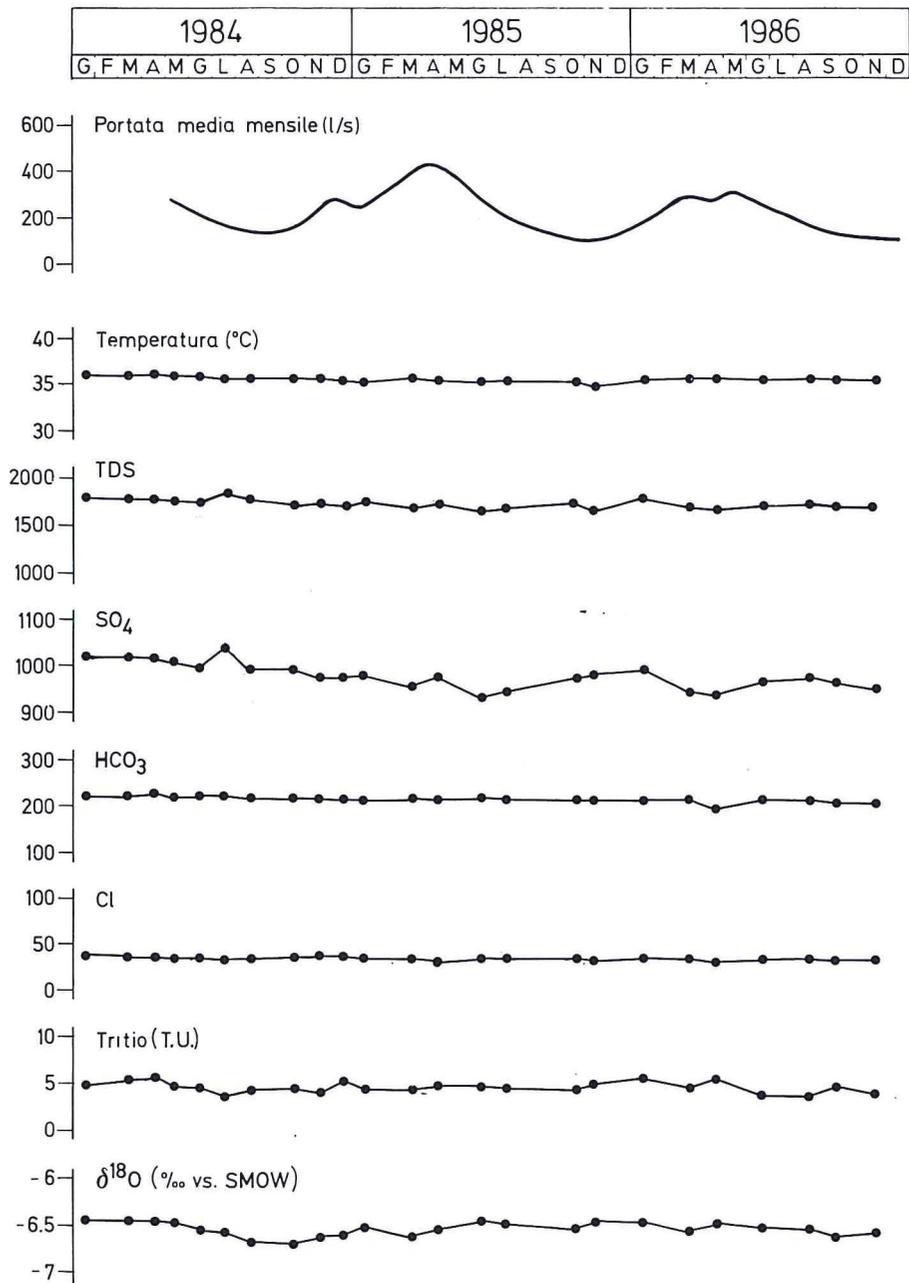


Fig. 3 - Andamento delle caratteristiche fisiche, chimiche ed isotopiche della sorgente Calidario durante il periodo 1984-86 (da GRASSI *et al.*, 1990). Le concentrazioni chimiche sono in mg/l.

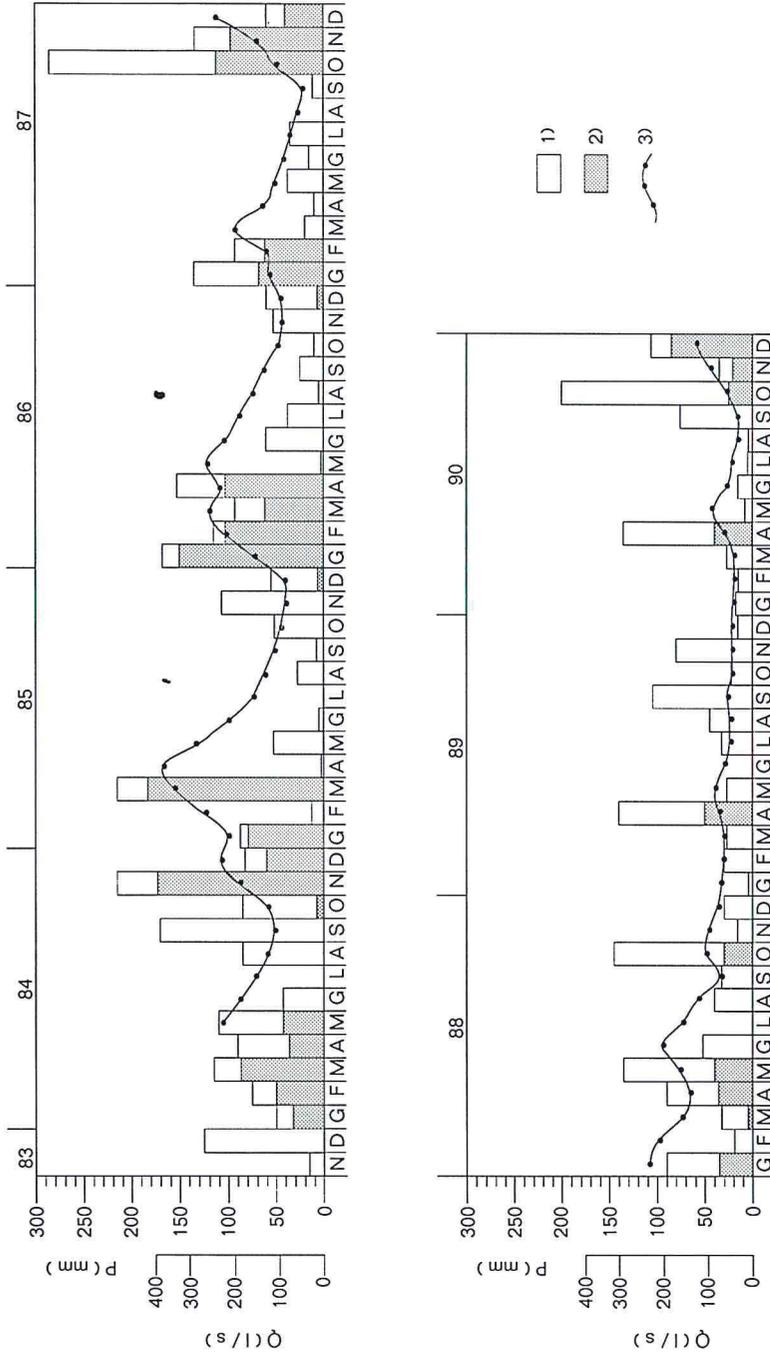


Fig. 4 - Confronto fra precipitazioni mensili a S. Carlo (1), pioggia utile secondo Thornthwaite (2) e portata media mensile del Calidario (3) per l'intero periodo di studio.

portata della sorgente aumenta, raggiungendo valori massimi generalmente ad aprile.

Lo sfasamento che si osserva fra andamento mensile della portata e andamento della precipitazione/alimentazione dipende dal protrarsi per tempi piuttosto lunghi dello stato di piena connesso al singolo evento meteorico, come evidenziato dagli idrogrammi di figura 2. Ciò influenza sensibilmente il dato medio mensile della portata, che risulta solitamente più elevata in corrispondenza del mese successivo a quello relativo alla precipitazione responsabile della piena.

Una volta raggiunta la massima erogazione verso la fine della primavera, subentra una drastica riduzione delle piogge ed un concomitante aumento della temperatura ambiente. In queste condizioni, come mostra l'andamento della pioggia utile in figura 4, non esiste alcun contributo meteorico alla circolazione sotterranea.

Il serbatoio tende quindi a svuotarsi progressivamente, con conseguente riduzione progressiva dei carichi idraulici nell'acquifero e diminuzione nel tempo della portata della sorgente (fase di esaurimento o di recessione). La fase di esaurimento si protrae spesso sino ad autunno inoltrato, quando, solitamente, la portata raggiunge i valori minimi, nonostante frequenti siano gli eventi meteorici importanti. Questi eventi non influiscono però sulla circolazione idrica sotterranea, dato che in questo periodo le precipitazioni vengono utilizzate quasi esclusivamente nel processo evapotraspirativo e nella ricostituzione della riserva idrica del suolo depauperata dalla fase secca estiva.

Durante gli anni '80 le precipitazioni in Toscana sono state in genere al di sotto della media normale (RAPETTI e VITTORINI, 1991). Negli anni 88-89 e 89-90 (Fig. 4), la distribuzione delle precipitazioni nel tempo e la diminuzione delle stesse sono state tali che gli afflussi meteorici, escludendo eventi primaverili episodici, non sono stati sufficienti a fornire contributi idrici importanti al serbatoio carbonatico. Da sottolineare a questo proposito come la sorgente, dopo la fase di piena di giugno 1988, non abbia ricevuto più alcuna alimentazione significativa sino all'agosto 1990.

Durante questo periodo di magra la portata sembra tendere progressivamente verso condizioni di stabilizzazione (fig. 5). Gli stessi dati di un diagramma log/log (fig. 6), con l'esclusione di episodici fenomeni di piena, dimostrano che l'andamento dell'erogazione del Calidario in questo periodo risulta approssimabile, almeno dal trentesimo giorno successivo alla piena del giugno 88, dalla relazione

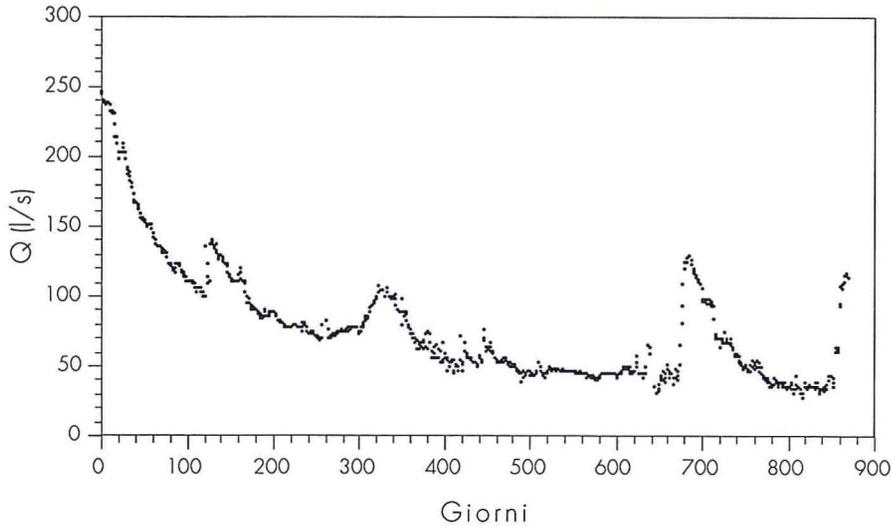


Fig. 5 - Portata media giornaliera in funzione del tempo per il periodo 22 giugno 1988 - 31 ottobre 1990.

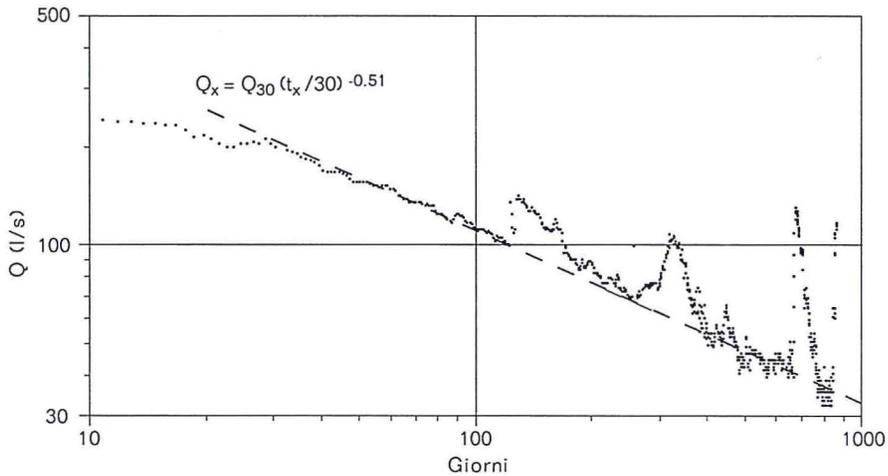


Fig. 6 - Diagramma logaritmico della portata in funzione del tempo per il periodo 2 luglio 1988 - 31 ottobre 1990.  $Q_x$ =portata al tempo  $t_x$ ,  $Q_{30}$ =portata trenta giorni dopo la piena del giugno 1988.

$Q_x = Q_{30} (t_x/30)^{-0.51}$ . Tale relazione indica un lento, ma progressivo processo di riduzione della portata con corrispondente lento, ma progressivo svuotamento del serbatoio di alimentazione.

È interessante osservare che, anche in condizioni di magra estrema, le caratteristiche termiche, chimiche ed isotopiche delle acque erogate non subiscono particolari variazioni (Tab. 1), essendo prossime a quelle di massima concentrazione, già osservate in precedenza al Calidario.

TABLE 1 - *Temperature, principali caratteristiche chimiche e contenuti isotopici della sorgente Calidario in tempi diversi. I dati relativi a due campionamenti effettuati nell'89 e nel 90 sono messi a confronto con i valori medi, massimi e minimi relativi a 24 campionamenti eseguiti dal 1983 al 1986. Concentrazioni in mg/l,  $\delta^{18}O$  in ‰ vs. SMOW.*

	31/10/89	7/9/90	Media	Max.	Min.
T(°C)	35.8	35.6	35.8	36.1	35.1
Na	20.2	21.8	26.3	30.3	24.2
K	4.2	4.1	4.2	6.0	3.0
Ca	393	400	361	378	344
Mg	94	89	75	82	69
HCO <sub>3</sub>	217	218	216	226	194
SO <sub>4</sub>	1030	1030	980	1040	894
Cl	31	39	37	41	34
SiO <sub>2</sub>	23	25	25	33	21
TDS	1812	1830	1730	1810	1649
$\delta^{18}O$	-6.47	-6.46	-6.54	-6.39	-6.84

L'emergenza in esame continua a drenare, anche durante prolungati periodi di magra, un serbatoio notevolmente omogeneo, almeno dal punto di vista sia termico che geochimico. I valori di TDS sembrano escludere contributi significativi da parte del circuito regionale il quale, se presente, dovrebbe essere caratterizzato da valori di TDS prossimi a 3 g/l (CELATI *et al.*, 1990).

#### FASE DI ESAURIMENTO

Durante la fase di esaurimento della sorgente, quando il flusso idrico può assumersi in regime praticamente indisturbato, l'andamento nel tempo della portata può essere approssimato dall'equazione di MAILLET (1905):  $Q_x = Q_o \cdot e^{-\alpha t}$  in cui  $Q_x$  = portata della sorgente al tempo  $t$ ,  $Q_o$  = portata dall'inizio della fase di esaurimento e  $\alpha$  = coefficiente di esaurimento.

Il coefficiente  $\alpha$ , oltre a rappresentare un interessante parametro per la caratterizzazione idrogeologica di una sorgente, dipendendo esclusivamente da fattori fisici quali la trasmissività, il coefficiente di immagazzinamento e le caratteristiche geometriche del serbatoio, ha una funzione pratica consentendo, attraverso l'applicazione dell'equazione di Maillet e quando sia noto  $Q_0$ , di prevedere, con buona approssimazione, la portata durante un periodo di magra. Il coefficiente  $\alpha$  può essere anche utilizzato per la stima del volume immagazzinato ( $W_0$ ) nel serbatoio all'inizio della fase di esaurimento attraverso la relazione  $W_0 = Q_0 * 86400 / \alpha$ .

La prolungata osservazione in continuo della portata del Calidario ha consentito di analizzare in dettaglio il comportamento della sorgente durante le magre dal 1984 al 1988, attraverso l'elaborazione dei classici diagrammi semilogaritmici analoghi a quello riportato in figura 7.

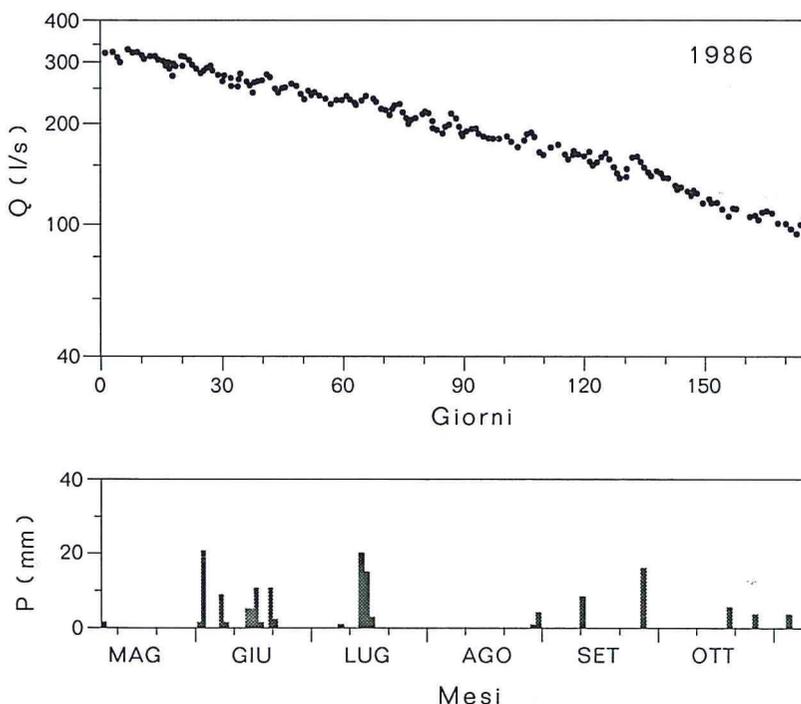


Fig. 7 - Portata in funzione del tempo per la fase di esaurimento del maggio-novembre 1986 e relative precipitazioni a S. Carlo. Le lievi oscillazioni della portata, a periodo approssimativamente settimanale, dipendono da operazioni di riempimento e scarico del laghetto termale a valle del quale era posta la stazione di misura.

Gli elementi caratteristici delle fasi di esaurimento durante il periodo in questione sono riportati in Tab. 2.

TABLE 2 - Elementi caratteristici della fase di esaurimento per la sorgente Calidario.  $t_0$  e  $t_1$  date di inizio e fine esaurimento;  $Q_0$  e  $Q_1$  portate corrispondenti (l/s);  $\alpha$ =coefficiente di esaurimento (giorni<sup>-1</sup>),  $r$ =coefficiente di correlazione.

Anno	$t_0$	$Q_0$	$t_1$	$Q_1$	$\alpha$	$r$
1984	1/06	257	23/09	124	0.0061	0.98
1985	11/04	463	19/11	98	0.0069	0.97
1986	6/05	331	6/11	95	0.0064	0.99
1987	6/04	181	7/09	60	0.0072	0.99
1988	12/06	253	13/10	99	0.0075	0.99

In base a questi elementi, si può ritenere che la relazione  $Q_x = Q_0 * e^{-0.0068t}$ , con  $\alpha$ =media dei valori calcolati per le diverse fasi, possa descrivere, con buona approssimazione, l'andamento medio della portata della sorgente durante la fase di magra annuale. Detta relazione costituisce un elemento conoscitivo importante per eventuali programmi di sfruttamento e sviluppo delle acque termali della zona.

#### BIBLIOGRAFIA

- BARBERI F., INNOCENTI F., MAZZUOLI R. (1967) - Contributo alla conoscenza chimica, petrografica e magmatologica delle rocce intrusive, vulcaniche e filoniane del Campigliese (Toscana). *Mem. Soc. Geol. It.*, **6**, 643-681.
- BENCINI A., DUCHI V., MARTINI M. (1977) - Geochemistry of thermal springs of Tuscany (Italy). *Chemical Geology*, **19**, 229-252.
- BORSI S., FERRARA G., TONGIORGI E. (1967) - Determinazione con il metodo K-Ar della età delle rocce magmatiche della Toscana. *Boll. Soc. Geol. It.*, **26**, 403-410.
- CELATI R., GRASSI S., D'AMORE F., MARCOLINI L. (1991) - The low temperature hydrothermal system of Campiglia, Tuscany (Italy): a geochemical approach. *Geothermics*, **20**, 67-81.
- COSTANTINI A., LAZZAROTTO A., MACCANTELLI M., MAZZANTI R., SANDRELLI F., TAVARNELLI E. (1990) - Carta geologica della provincia di Livorno a sud del F. Cecina. Amministrazione Provinciale di Livorno e Dipartimento di Scienze della Terra - Università di Siena.
- FRANCALANCI G.P. (1959) - Contributo per la conoscenza delle manifestazioni idrotermali della Toscana. *Atti Soc. Toscana Soc. Nat., Serie A, Fasc. II*, **LXV**, 373-432.
- GIANNINI E. (1955) - Geologia dei Monti di Campiglia Marittima (Livorno). *Boll. Soc. Geol. It.*, **74**, 219-296.

- GRASSI S., SQUARCI P., CELATI R., CALORE C., PERUSINI P., TAFFI L. (1990) - Nuove conoscenze sul sistema idrotermale di Campiglia Marittima (Livorno). *Boll. Soc. Geol. It.*, **109**, 693-706.
- MAILLET O.E. (1905) - Essais d'hydraulique souterraine et fluviale. Libr. Scient. Herman, Parigi.
- MERCIAI G. (1904) - Le acque termali di Caldana presso Campiglia Marittima. Tip. Mariotti, Pisa.
- PORLEZZA C., PIRRONE P. (1955) - Indagini chimiche e chimico-fisiche sull'acqua termominerale di Caldana (Venturina-Livorno). *Atti Soc. Toscana Sc. Nat. Serie A*, **LXIV**, 265-276.
- RAPETTI F., VITTORINI S. (1991) - Studio di serie pluviometriche secolari in Toscana. Proceeding of the Italian Geographical Society Conference, Rome 5-6 April 1990. *Mem. Soc. Geog. It.*, **XLVI**, 457-478.
- THORNTHWAITE C.W., MATHER J.R. (1957) - Instruction and tables for computing potential evapotranspiration and the water balance. *Pubbl. Clim. Drexel Inst. Technol.*, **10**.

(ms. pres. il 30 giugno 1993; ult. bozze il 16 maggio 1994)