



ATTI
DELLA
SOCIETÀ TOSCANA
DI
SCIENZE NATURALI

MEMORIE • SERIE A • VOLUME CXXXI • ANNO 2024



Edizioni ETS

ATTI DELLA SOCIETÀ TOSCANA DI SCIENZE NATURALI

MEMORIE

Via Santa Maria, 53 - 56126 Pisa

Rivista di proprietà della Società Toscana di Scienze Naturali. Fondata nel 1875, la rivista pubblica Memorie e Note originali, recensioni, corrispondenze e notiziari nel campo delle Scienze Naturali. È inviata ai soci e depositata in biblioteche corrispondenti. Tutti i contenuti dei volumi a stampa (articoli originali, comunicazioni brevi, notizie e recensioni) è liberamente disponibile in rete, in conformità all'Open Access, sulle pagine <http://www.stsn.it/en/memorie-serie-a.html> (Serie A) e <http://www.stsn.it/en/memorie-serie-b.html> (Serie B). *Journal owned by Società Toscana di Scienze Naturali. Founded in 1875, the journal publishes original papers, short communications, news and book reviews on Natural Sciences. The Journal is sent to Società Toscana di Scienze Naturali members and deposited in selected libraries. All content of the printed version (original papers, short communications, news and book reviews) is freely available online in accordance with the Open Access at <http://www.stsn.it/en/memorie-serie-a.html> (Serie A) and <http://www.stsn.it/en/memorie-serie-b.html> (Serie B).*

Gli Atti sono pubblicati in due volumi (Serie A - Abiologica, ISSN 0365-7655; Serie B - Biologica, ISSN 0365-7450) all'anno nel mese di dicembre. Possono essere pubblicati ulteriori volumi, definiti Supplementi, su temi specifici.

Atti are published yearly in two Issues (Serie A - Abiological, ISSN 0365-7655; Serie B - Biological, ISSN 0365-7450) in December. Some monographic volumes may be published as Supplementi.

Le lingue usate dalla rivista sono l'inglese o l'italiano // *The languages of the journal are English or Italian.*

Comitato scientifico (*Editorial Board*)

Serie A: G. Bianucci (Pisa, Italia), R. Blanco Chao, (Santiago de Compostela, Spagna), L. Disperati (Siena, Italia), W. Finsinger, (Montpellier, Francia), C. Montomoli (Torino, Italia), A. Oros Sršen (Zagabria, Croazia), E. Pandeli (Firenze, Italia), S. Richiano (Puerto Madrin, Argentina), E. Starnini (Pisa, Italia).

Serie B: A. Aguilera (Valencia, Spain), N.E. Baldaccini (Pisa, Italy), E. Biondi (Ancona, Italy), B. Foggi (Firenze, Italy), E. Palagi (Pisa, Italy), G. Paradis (Ajaccio, France), L. Peruzzi (Pisa, Italy), M. Zuffi (Pisa, Italy).

Direttore scientifico (*Editor in Chief*): Paolo Roberto Federici

Comitato di redazione (*Editorial Office*)

Serie A: A. Chelli (*Segretario agli Atti / Editor*)

Serie B: G. Bedini (*Segretario agli Atti / Editor*), G. Astuti, A. Carta, M. D'Antraccoli, L. Peruzzi, F. Roma-Marzio

La corrispondenza deve essere inviata ai Segretari agli Atti (per la Serie A: A. Chelli, Dipartimento di Chimica, Scienze della Vita e della Sostenibilità Ambientale, Parco Area delle Scienze, 157/A - 43124 Parma, email: alessandro.chelli@unipr.it; per la Serie B: G. Bedini, Dipartimento di Biologia, via Derna, 1 - 56126 Pisa, e-mail: gianni.bedini@unipi.it).

The correspondence must be sent to Editors (for Serie A: A. Chelli, Dipartimento di Chimica, Scienze della Vita e della Sostenibilità Ambientale, Parco Area delle Scienze, 157/A - 43124 Parma, email: alessandro.chelli@unipr.it; for Serie B: G. Bedini, Dipartimento di Biologia, via Derna, 1 - 56126 Pisa, e-mail: gianni.bedini@unipi.it).

Per ulteriori informazioni / *For further information:* <http://www.stsn.it/>

Per informazioni editoriali / *For editorial information:* Edizioni ETS - <https://www.edizioniets.com/>

SOCIETÀ TOSCANA DI SCIENZE NATURALI

Fondata nel (*founded in*) 1874

Via Santa Maria, 53 - 56126 Pisa

Consiglio Direttivo (*Executive Committee*)
(2023-2024)

<i>Presidente</i>	P.R. Federici
<i>Vice Presidenti</i>	W. Landini, M. Pappalardo
<i>Segretario generale</i>	F. Rapetti
<i>Segretari agli Atti (Editors)</i>	A. Chelli (Serie A), G. Bedini (Serie B)
<i>Bibliotecario</i>	M. Zuffi
<i>Economo-Cassiere</i>	R. Narducci

Autorizzazione n. 17/56 del 26 luglio 1956, Trib. di Pisa

Direttore responsabile (Editor in Chief): Paolo Roberto Federici

© Copyright 2023-2024 by Società Toscana di Scienze Naturali.

Per tutti gli articoli pubblicati (articoli originali, comunicazioni brevi, notizie e recensioni) gli autori trasferiscono i diritti d'autore e di pubblicazione alla rivista.

For all published articles (original papers, short communications, news and book reviews) the authors transfer copyright and publishing rights to the Journal.

Tutti gli articoli pubblicati sugli Atti (articoli originali, comunicazioni brevi, notizie e recensioni) sono rilasciati con licenza CC BY 4.0. Essi possono essere condivisi e adattati, a condizione che venga dato credito adeguato, e possono essere utilizzati anche per scopi commerciali.

All published articles in Atti (original papers, short communications, news and book reviews) are released under CCL BY 4.0. They can be shared and adapted, provided that adequate credit is given, for any purpose, even commercially.

SIMONE FIASCHI ⁽¹⁾, MARCO DE MARTIN MAZZALON ⁽²⁾, ENRICO PANDELI ⁽³⁾

STIMA DELLA PORTATA MASSIMA EMUNGIBILE DELLA SORGENTE LEOPOLDINA DELLE TERME DI MONTECATINI TERME (TOSCANA, ITALIA)

Abstract - S. FIASCHI, M. DE MARTIN MAZZALON, E. PANDELI, *Estimate of the maximum flow rate of the Leopoldina spring of the Montecatini Terme SPA (Tuscany, Italy).*

This document was drawn up with the aim of establishing the quantity of water extractable from the Leopoldine 2 and Leopoldine 3 wells in Montecatini Terme for thermal uses. The analysis of the annual precipitation data recorded at the Montecatini Terme pluviometric station, in the time interval 1935-2017, interfaced with the flow data measured at the Rinfresco, Regina and Tettuccio springs and at the Leopoldina wells, in the decades 1932-2003, show a more or less marked correlation between the two sets of data. During the carrying out of the flow test the greatest drops occur for the Rinfresco and Regina sources with values of 26% and 48% and 60% and 11% respectively, in the two steps of the test. The order of magnitude of 20 l/s corresponds to what had already been reported by Canavari (1924), who established an extractable flow rate of 24 l/s for the Leopoldine springs. For the future management of the “Leopoldine” resource and of the entire thermal complex, it is essential to perform a continuous monitoring policy of the resource and the related catchments with new measurement and flow tests.

Key words - thermo-mineral waters, flow variations, hydrogeology, Montecatini Terme, Tuscany, Italy

Riassunto - S. FIASCHI, M. DE MARTIN MAZZALON, E. PANDELI, *stima della portata massima emungibile della sorgente Leopoldina delle Terme di Montecatini Terme (Toscana, Italia).*

Il presente elaborato è stato redatto con la finalità di stabilire il quantitativo di acqua estraibile dai pozzi Leopoldine 2 e Leopoldine 3 dell'area termale di Montecatini Terme (Toscana, Italia) per gli usi termali. L'analisi dei dati di precipitazione annuale registrati alla stazione pluviometrica di Montecatini Terme, nell'intervallo temporale 1935-2017, interfacciati con i dati di portata misurati alle sorgenti Rinfresco, Regina e Tettuccio e al pozzo Leopoldina, nei decenni 1932-2003, mostrano una correlazione più o meno marcata tra i dati. Durante la realizzazione della prova di portata i maggiori abbassamenti si verificano per le sorgenti Rinfresco e Regina con valori rispettivamente del 26% e del 48% e del 60% e dell'11%, nei due gradini della prova. L'ordine di grandezza dei 20 l/s corrisponde a quanto era già stato segnalato da Canavari (1924), che stabiliva una portata estraibile di 24 l/s per le sorgenti Leopoldine. Per la gestione futura della risorsa “Leopoldine” e di tutto il complesso termale è fondamentale comunque attuare una continua politica di monitoraggio della risorsa e delle relative captazioni con nuove misure e prove di portata.

Parole chiave - acque termominerali, variazioni di portata, idrogeologia, Montecatini Terme, Toscana, Italia

INTRODUZIONE

I numerosi studi effettuati sulle Terme di Montecatini, compreso l'importante e recente studio del CNR (Grassi *et al.*, 2011), non hanno mai stimato le portate estraibili dalla sorgente Leopoldina delle Terme di Montecatini Terme, e monitorato gli effetti che tali emungimenti possono generare sulle sorgenti vicine. Per questo motivo sono state effettuate delle prove di portata sulle sorgenti Leopoldina 2 e Leopoldina 3.

Conoscere l'entità di tali portate è importante, oltre che per la comprensione dei fenomeni di possibile interferenza tra le captazioni all'interno dello stesso bacino idrotermale, per la necessità di dover disporre di un quantitativo di acqua notevole per soddisfare quanto richiesto dalle normative in materia di “piscine termali” sotto il profilo igienico-sanitario.

Ad oggi, la suddetta normativa ha subito un aggiornamento sostanziale che riduce sensibilmente il quantitativo di acque di ricambio giornaliero dalle piscine termali, riducendolo ad almeno il «2% del volume della piscina ogni ora, considerando nelle ventiquattro ore solo l'orario di apertura dello stabilimento termale» (art. 47ter della L.R. 38/2004 così come modificata dalla L.R. 74 del 02.11.2016). Tale aggiornamento risponde ad esigenze di salvaguardia dello sfruttamento della risorsa idrotermale nell'ottica della sua sostenibilità ambientale consentendone il parziale ricircolo nelle stesse piscine termali delle acque emunte o disponibili dal serbatoio termale. Le suddette operazioni devono però sottostare a precise e specifiche condizioni di natura tecnico-igienico-sanitarie indicate in normativa.

Essendo il sistema termale di Montecatini noto e sfruttato da secoli, e in relazione allo scopo prefissato per la stesura del presente elaborato, nel documento è stato inserito un primo capitolo che sintetizza le informazioni bibliografiche principali note in letteratura.

Tale riepilogo introduce ad un secondo capitolo che analizza dal punto di vista climatico e pluviometrico, quanto registrato alla stazione di Montecatini Terme nei decenni 1935-2017 (fonte: SIR Regione Toscana), e i

⁽¹⁾ IDROGEO S.r.l., via S.Pellico 16, 50142 Certaldo (FI)

⁽²⁾ Comune di Montecatini, viale G. Verdi 46, 51016 Montecatini Terme (PT)

⁽³⁾ Dipartimento di Scienze della Terra dell'Università di Firenze, via G. La Pira 4, 50121 Firenze

Corresponding author: Simone Fiaschi (info@idrogeosrl.it)

dati di portata noti al pozzo Leopoldine e alle sorgenti Rinfresco, Regina e Tettuccio nei decenni 1932-2003 (fonte: Terme di Montecatini Spa).

Nell'aprile 2016, a seguito di una specifica campagna di analisi terminata poi nel giugno 2016, si è potuto disporre di una mole consistente di dati ottenuti dall'esecuzione di una prova di portata nei pozzi Leopoldine 2 e Leopoldine 3, con contemporaneo monitoraggio alle sorgenti Rinfresco, Regina e Tettuccio. Tale indagine, svolta dal 12.04 al 14.06.2016, ha permesso di stabilire l'ordine di grandezza delle portate emungibili dai pozzi Leopoldine 2 e 3, e di verificare la possibile interferenza con lo sfruttamento in essere delle vicine sorgenti.

ANALISI STORICA DEI DATI PREGRESSI

Il sistema idrotermale di Montecatini, noto e sfruttato fin dalla metà del XIV secolo, è caratterizzato da numerose sorgenti a temperature e salinità diverse, strettamente ricollegate alle modalità di circolazione delle acque sotterranee e alla complessità geologica dell'area nella quale sono presenti la Falda toscana e le soprastanti unità liguri, nonché diverse coperture sedimentarie fluviali e lacustri di età plio-quadernaria (Brandi *et al.*, 1967; Trevisan *et al.*, 1971; Fazzuoli & Maestrelli Manetti, 1973; Grassi *et al.*, 2011; Puccinelli *et al.*, 2015 con bibliografia).

Le diverse caratteristiche chimiche delle acque (Coradossi & Martini, 1965; Chiappini, 1967; Martini, 1968; Grassi *et al.*, 2011; Capeccchiacci *et al.*, 2015 con bibliografia) hanno fatto sì che le acque termominerali di Montecatini siano conosciute e utilizzate per scopi terapeutici fin dall'antichità (Mantelli *et al.*, 2012-2013). La comprensione del sistema idrogeologico dell'area e della possibile interferenza che l'utilizzo delle varie sorgenti può generare sulle vicine captazioni, è stato da sempre oggetto di interesse allo scopo di salvaguardare tutte le manifestazioni idrotermali presenti nell'area (Trevisan, 1951, 1954; Raggi & Trevisan, 1973; Chetoni, 2002; Grassi *et al.*, 2011; Mantelli *et al.*, 2012-2013 con bibliografia).

Numerosi sono i contributi bibliografici disponibili, la cui consultazione può fornire un valido aiuto per effettuare una ricostruzione fedele della situazione idrotermale più circoscritta all'abitato di Montecatini Terme. Citiamo qui di seguito i contributi che riteniamo più significativi, concentrandosi sugli aspetti legati alle portate estratte dalle sorgenti, le temperature delle acque e le possibili interferenze verificatesi nel corso degli ultimi decenni.

Canavari (1924) stabilisce una portata generale di tutte le Terme pari ad almeno 38 l/s di cui:

- 24 l/s per le sorgenti Leopoldine;
- 12 l/s per le sorgenti Tettuccio;
- 2 l/s per la sorgente Grocco (trascurando gli apporti delle sorgenti minori).

L'erogazione del campo idrotermale di Montecatini è, secondo lo stesso autore, garantito dai due nuclei calcarei permeabili de Le Panteraie e Monsummano. Canavari anticipa inoltre ciò che nel 1951 sarà confermato dagli studi di Trevisan, nell'imputare la maggiore concentrazione di cloruro di sodio alle acque di Montecatini al fatto che attraversino i depositi evaporitici del Trias e conclude che le acque «dovranno scendere intorno ai 1000 metri per poter affiorare con temperature dell'ordine dei 33-34°C».

La risalita delle acque termali è imputabile, secondo quanto sostenuto da Lotti (1927), alla presenza di una faglia principale localizzata ad est del M. delle Panteraie (Rio Castagnaregola) in direzione del Tettuccio.

Tra le prime ricerche geochimiche sulle acque di Montecatini citiamo quelle pubblicate da Carobbi & Cipriani (1954) che, analizzando i componenti minori (Pb, Ni, Co, Cr) concludono che «le acque di Montecatini siano il prodotto della diluizione delle acque marine fossili con acque vadose circolanti oltre che nei calcari, nei sedimenti clastici (Macigno fratturato, che affiora per vaste aree intorno ai nuclei calcarei sopra menzionati di Montecatini e Monsummano)».

Di fondamentale importanza risulta quindi la comprensione dell'assetto tettonico dell'area, con particolare attenzione ai due nuclei calcarei di Montecatini e Monsummano, appartenenti alla Falda Toscana che, secondo quanto riportato da Bellincioni *et al.* (1956) e da Brandi *et al.* (1967), sono associabili al dorso di una piega rovesciata come il nucleo della Val di Lima, con uno scollamento a livello della formazione evaporitica triassica e un sovrascorrimento su un flysch oligocenico. Il sistema di faglie che favorisce la risalita dei fluidi idrotermali risulta, secondo gli stessi autori, legata ai movimenti distensivi, caratterizzati da faglie dirette, appartenenti ad una fase posteriore alla messa in posto delle unità liguri.

RICOSTRUZIONE DEL SISTEMA IDROTERMALE DI MONTECATINI

Le prime ricostruzioni del sistema idrotermale di Montecatini sono note a seguito delle informazioni ricavate dall'esecuzione di sondaggi e pozzi nell'area di interesse. La Fig. 1 mostra una sezione ottenuta dai dati stratigrafici dei sondaggi: pozzo Spatz, sorgente Leopoldina, sondaggio Viale delle Carrozze e sorgente Regina (Brandi *et al.*, 1967).

I sondaggi realizzati a partire dal 1951 al 1953 hanno intercettato il deposito lacustre con spessori variabili da circa 112 m, nel pozzo Spatz, fino a circa 25 m nella sorgente Regina. Entrando più nello specifico, il sondaggio eseguito in Viale delle Carrozze ha attraversato fino a 27,40 m depositi lacustri, all'interno

dei quali ogni livello ciottoloso risulta caratterizzato da diversa salinità, per poi entrare all'interno dei diaspri fino alla profondità di 42,33 m. All'ingresso nei diaspri è stato verificato un aumento delle portate ma con salinità non confrontabile a quella delle Leopoldine.

Il sondaggio all'interno del Cratere delle Leopoldine è stato realizzato nel 1953 fino a circa 30,6 m e ha intercettato intercalazioni sabbiose e ciottolose acquifere, ma è solo approfondendo il sondaggio all'interno del substrato roccioso caratterizzato dai diaspri che si è registrata una maggiore erogazione con temperature stazionarie e salinità confrontabili con la Leopoldina. La trivellazione ha raggiunto profondità massima di 53,15 m, con portata di circa 60 l/s. Nello stesso anno 1953, il vecchio cratere delle Leopoldine è stato chiuso ed il nuovo pozzo regolato con una cerniera per limitarne l'erogazione a 6 l/s durante la stagione secca e 12 l/s durante la stagione balneare.

Lo schema di circolazione delle acque, che presentano un contenuto salino variabile fino a 20 g/l, spiegato con una diversa diluizione a partire da un'unica acqua madre, così come riportato dal lavoro di Brandi *et al.* (1967), è riassunto in Fig. 2. Esso fu ricostruito osservando le variazioni di portata alle sorgenti Regina, Rinfresco e Leopoldina nell'arco delle variazioni stagionali.

Ad esempio, il manifestarsi delle piogge dell'inverno e della primavera si traduce in un effetto rapido sulle portate della sorgente Rinfresco, determinando, in caso di precipitazioni abbondanti, un aumento della circolazione locale, meno profonda, e il manifestarsi di acque meno salate (acque di circolazione poco profonda in Fig. 2); diversa è la situazione per la sorgente Leopoldina dove, invece, in conseguenza di un aumento della piovosità si registra anche un aumento della salinità delle acque (acqua madre in Fig. 2).

Questo schema spiegherebbe la variabilità della salinità misurata alle varie sorgenti dislocate nel bacino idrotermale, confermando l'origine meteorica delle acque, ma attribuendo le diverse salinità e temperatura al mescolamento delle acque nel sottosuolo, ovvero:

- l'innescarsi di una circolazione locale associata a precipitazioni abbondanti e sorgenti meno salate;
- l'innescarsi di una circolazione regionale nella quale le acque, scorrendo più in profondità, apportano il contributo salino dovuto all'attraversamento delle masse calcaree ed evaporitiche.

Lo schema della circolazione idrica sopra descritto è stato confermato dal lavoro di Malesani & Nolledi (2005) definendo con "termoartesianismo" il fenomeno per cui le acque di circolazione profonda, arricchite dal dilavamento delle formazioni evaporitiche, risalgono verso la superficie e vengono diluite dalla

miscelazione con le acque più superficiali (acque miste di Fig. 2). Gli stessi autori riportano i dati derivanti dal confronto analitico del chimismo delle sorgenti, ricavando le note generali che riportiamo qui di seguito.

Le manifestazioni sono classificate come alcalino terrose per circa l'85%, solfato alcalino terrose per circa il 10% e bicarbonato alcaline terrose per il 5%. Dato che l'acqua della Leopoldina si avvicina di più, per composizione, alla componente profonda, viene considerata come "acqua madre", mentre le altre sorgenti derivano per maggiore diluizione da parte dell'acqua superficiale.

A conferma di ciò sono i risultati delle elaborazioni analitiche analizzate dal 1965 al 2004 che mostrano la componente solfatica come la più variabile nel tempo. Associando la concentrazione di solfato strettamente collegata al diverso grado di diluizione dell'anidrite della serie evaporitica, l'acqua della Leopoldina risulta quella con più basso coefficiente di variazione e maggiore residuo fisso e quindi chimicamente più vicina alla componente profonda.

Malesani & Nolledi (2005) riportano inoltre una sintesi dei dati di portata, estratti dalla consultazione dell'archivio delle terme di Montecatini, tra l'11.03.1932 ed il 31.12.2003. Tali dati, che saranno descritti e commentati più approfonditamente nel capitolo successivo, sono risultati un valido strumento per stilare considerazioni in merito alle possibili interferenze tra gli emungimenti delle diverse sorgenti.

Nello specifico, questi Autori mettono in evidenza i lavori e le manovre eseguite sul pozzo Leopoldina (nel 1953) ed il conseguente risultato. Sembra infatti che a seguito dell'imbrigliamento del pozzo Leopoldina, si sia manifestata una netta diminuzione della portata alla sorgente Rinfresco. Al 2003, gli stessi autori fanno notare come a seguito di portate mantenute controllate, dell'ordine dei 6-8 l/s nella Leopoldina, si siano comunque manifestati forti salti nella portata di Rinfresco. I salti di portata in questo caso sarebbero da imputarsi ai diversi afflussi meteorici.

Allo scopo di capire la reale interferenza tra il pozzo delle Leopoldine e le altre sorgenti, Malesani & Nolledi (2005) concludono il loro studio proponendo di intensificare le indagini idrogeologiche ed idrauliche, sintetizzate nel controllo della portata e delle variazioni di pressione al pozzo Leopoldina e nel contempo verificare gli effetti di tale operazione sulla piezometrica delle altre sorgenti ed anche nella prova di portata al pozzo Giulia, con portate crescenti e controllo dei livelli alla sorgente Rinfresco e alle vicine manifestazioni.

La Tab. 1, tratta da Malesani & Nolledi (2005), sintetizza i principali dati di riferimento delle sorgenti del bacino idrotermale analizzate.

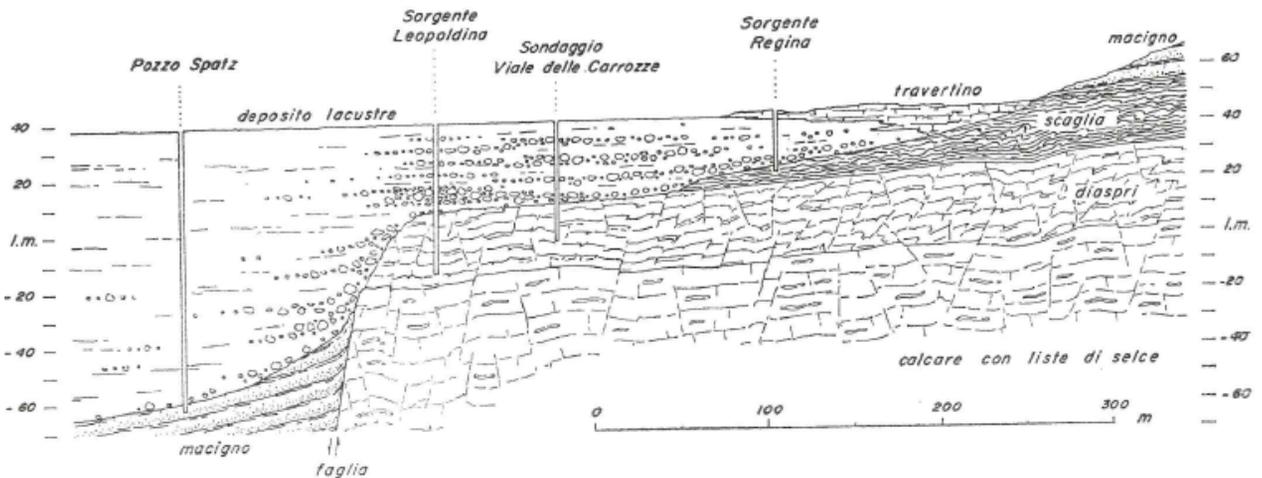


Figura 1. Sezione del campo idrotermale di Montecatini (da Brandi *et al.*, 1967).

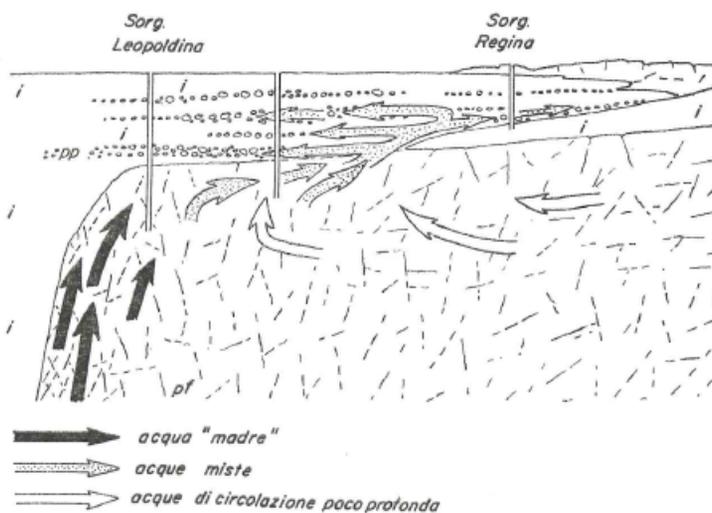


Figura 2. Schema di circolazione delle acque. Pf – rocce permeabili per fessurazione: diaspri e calcari con liste di selce; pp – terreni permeabili per porosità: ciottoli e sabbie grossolane del deposito lacustre del Quaternario; i – terreni impermeabili: scaglia e argilla del deposito lacustre (da Brandi *et al.*, 1967).

Tabella 1. Dati riferiti alle principali sorgenti del bacino idrotermale (da Malesani & Nolledi, 2005).

Sorgenti/Pozzi	Anno	Prof. (m da p.c.)	Quota di riferimento (m slm)	Bocca pozzo (m slm)	Prevalenza (m)	Qmax (l/s)	Note
Leopoldina	1953	-53,15		33,625	25	60	durante le fasi finali dell'esecuzione del foro
						tra 11 e 21	1952-1953
						tra 5 e 7	regolata artificialmente
Tettuccio		-28,3	39,295		4-6	3-3,5	
Regina	1951	-2.212		45,215	15	0,75-0,9	
Savi			41,613			0,8-0,9	
Torretta			45,853			0,1-0,3	
Rinfresco				53,22		6-15	
Giulia		-13		55,45		17-18	
Tamerici		-3,65				0,02	

APPROFONDIMENTO SULLA FONTE TERMALE LEOPOLDINE

La consultazione del “rapporto di esecuzione e completamento” del pozzo Leopoldine 3, redatto da Chiocciara (2010), ha consentito l’approfondimento di dati riguardanti la fonte termale delle Leopoldine.

Il pozzo Leopoldine I, primo tra quelli costruiti in modo idoneo per gli usi termali, è stato realizzato nel 1948. Esso ha raggiunto profondità di 24 m. La portata iniziale ha raggiunto produttività di 50 l/s, per poi stabilizzarsi a portate dell’ordine dei 20 l/s. Il probabile non corretto funzionamento del pozzo Leopoldine I, ne determinò un’eruzione incontrollata a cui seguì la chiusura del pozzo stesso nel 1950. Il pozzo non entrò mai in produzione.

Nel 1952 l’Azienda delle Terme commissionò la bonifica del pozzo, eseguita tramite la realizzazione di un pozzo di sfogo e, a titolo di studio, un sondaggio esplorativo in via delle Carrozze che raggiunse la profondità di 38,5 m. A tale profondità fu rinvenuta acqua termale, ma il pozzo non venne completato a causa di abbassamenti importanti della portata misurati alla sorgente Regina.

La stessa Azienda delle Terme commissionò nel 1953 un nuovo pozzo, Leopoldine 2, allo scopo di depressurizzare il sistema e ripristinare la situazione degenerata a seguito dell’eruzione del primo pozzo con conseguenti fughe di acqua termale. Il pozzo raggiunse profondità di 53,7 m dal p.c. e fu messo in produzione senza constatare nessuna depressurizzazione nel pozzo del 1952, al contrario delle altre sorgenti. Pertanto, il vecchio pozzo venne chiuso con cementazione, decidendo di utilizzare come produttivo il pozzo Leopoldine 2.

Il pozzo Leopoldine 2 è rimasto in esercizio per oltre 50 anni ma, nell’anno 2008 l’Azienda termale decise di realizzare un terzo pozzo, Leopoldine 3, poiché nello stabilimento era stata prevista la costruzione di una piscina e nuova struttura non più compatibili con la presenza del vecchio pozzo. Inoltre, il Leopoldine 2 era stato concepito come pozzo di sfogo e, dopo oltre 50 anni di attività, l’acqua termale aveva esercitato azione corrosiva sui metalli, con reali rischi di perdite.

La perforazione del pozzo Leopoldine 3, che ha raggiunto profondità di 53,15 m, dalla profondità di -36,0 m, ha erogato acqua chiara termale. La successione stratigrafica incontrata durante la realizzazione del pozzo Leopoldine 3, può essere schematizzata come segue:

- da p.c. fino a -11,0 m – terreni eluviali di copertura (limi arrossati con livelli di sabbie e ghiaie del Quaternario Recente);
- da -11,0 m a -19,0 m – terreni limoso argillosi con sottili livelli di sabbie e ghiaie arrotondate con livelli isolati di torbe (ambiente palustre, Quaternario medio-Recente);

- da -19,0 m a -24,0 m – argilla limosa con isolati livelli di lignite (ambiente palustre, Quaternario medio);
- -24,0 m a -28,0 m – terreni eterogenei costituiti da ghiaie di marne grigie, elementi silicei tipo selce e rare ghiaie; presenza di orizzonti acquiferi caratterizzati da elementi grossolani;
- da -28,0 m a fondo foro è stata attraversata la formazione rocciosa dei “Calcari grigi con selce nera” del Malm Inf.; nel dettaglio, da -28,0 m a -36,0 m la roccia è risultata molto friabile con produzione di acqua termale, mentre da -36,0 m a f.f. la roccia è risultata praticamente sbriciolata in ghiaietto eterogeneo e ad elevatissima produttività di acqua termale.

I valori di temperatura e conducibilità elettrica delle acque termali nel pozzo Leopoldine 2 e 3 sono riportati nella Tab. 2.

L’interpretazione idrogeologica che ne deriva evidenzia la struttura anticlinale che affiora sull’asse Maona-Panteraie e prosegue al di sotto delle alluvioni. La struttura anticlinale è tagliata verso valle da una faglia che ribassa il Macigno (termine sommitale della Falda toscana) di oltre 100 m e che si estende dal limite meridionale di Poggio Le Panteraie fino alla zona dello Stabilimento Redi.

Inoltre, all’interno della Falda toscana le Marne a *Posidonia* rappresentano un livello impermeabile che confina in basso con i Calcari selciferi di Limano grigio chiari che poggiano, a loro volta, sul Calcare Massiccio che costituisce la roccia serbatoio principale degli acquiferi che generano le sorgenti. Il Calcare Massiccio viene quindi associato alla roccia serbatoio dell’acqua madre di Montecatini.

L’assetto geologico e le modalità di circolazione delle acque nel sottosuolo determinano le diverse caratteristiche chimiche delle acque termali alle sorgenti:

- le acque a maggiore salinità e temperatura (salinità > 24 g/l e temperatura > 34°C) con origine più profonda;
- le acque con salinità +/- ±0,2 g/l e temperatura di circa +/- 10°C, con origine più superficiale; le acque circolano in prevalenza nella Formazione Macigno;
- acque di assorbimento locale con salinità di circa 0,4 g/l e temperatura di circa 14°C (zona Maona-Panteraie).

Tabella 2. Misure di temperatura e conducibilità realizzate sul pozzo Leopoldine 2 e 3.

Dati	Pozzo Leopoldine 2°		Pozzo Leopoldine 3°	
	temp. (°C)	Cond. Elettrica (µS/cm)	temp. (°C)	Cond. Elettrica (µS/cm)
10.09.09	33,1	26.900	33,3	26.800
21.09.09	33,3	27.200	33,3	27.150
26.10.09	33,4	27.250	33,3	27.200

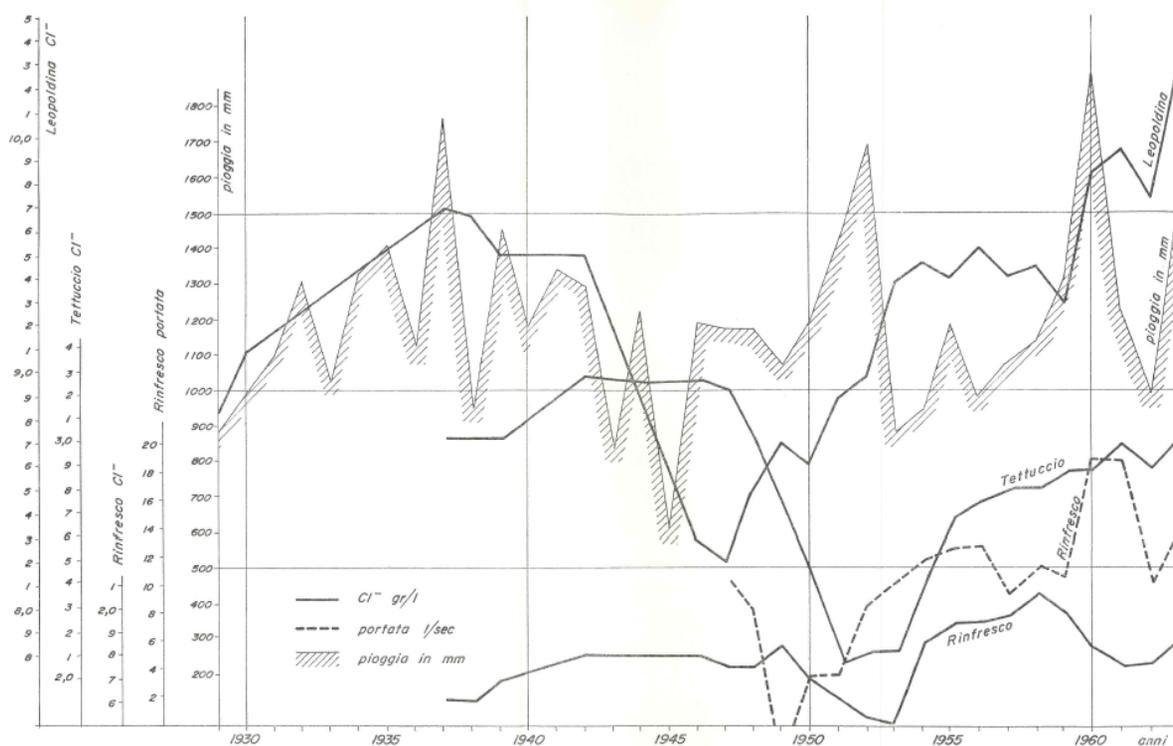


Figura 3. Grafico delle piogge costruito sulle misure della stazione di Montecatini (da Brandi *et al.*, 1967).

ANALISI CLIMATICA E PLUVIOMETRICA

Nel presente paragrafo sono descritti i dati storici climatici e pluviometrici raccolti per l'area di Montecatini Terme. Nel dettaglio, sono stati consultati dati provenienti da:

- il lavoro di Brandi *et al.* (1967) *Idrogeologia delle terme di Montecatini*;
- la consultazione del Settore Idrologico Regionale (S.I.R.) della Regione Toscana;
- l'elaborato delle Terme di Montecatini Spa, fornito dal Comune di Montecatini Terme, *Portate sorgenti dal 1932 al 2003*.

Il lavoro di Brandi *et al.* (1967) riporta il grafico delle piogge sulla base delle misure effettuate alla stazione pluviometrica di Montecatini Terme, per l'intervallo temporale 1930-1960 (Fig. 3).

Gli stessi autori, ipotizzando il nucleo calcareo della Val di Lima come nucleo dell'alimentazione principale della circolazione profonda, hanno ritenuto utile esaminare l'andamento delle piogge nella Val di Lima rispetto all'area di Montecatini, affermando come l'andamento della media annua delle precipitazioni sia perfettamente corrispondente per le due aree.

Dati di precipitazione annua registrati alla stazione di Montecatini Terme, per l'intervallo 1935-2017, sono stati ricavati dalla consultazione del Settore Idrologico Regionale (S.I.R.) della Regione Toscana.

I risultati sono esposti in Fig. 4.

Il dato bibliografico è aggiornato al 7.04.2017, momento di effettuazione del *download* dei dati dal sito regionale, pertanto l'accumulo delle precipitazioni al 2017 non può ancora essere analizzato in modo significativo rispetto al contesto generale, dato che non copre l'intero intervallo annuo ma solo i mesi da gennaio a marzo. A conferma dei risultati ottenuti nel monitoraggio, era stato previsto di eseguire nel 2020 una nuova campagna di prove di emungimento a gradini, con le stesse caratteristiche della prima prova di portata. Purtroppo delle difficoltà logistiche, dovute al contenzioso legale della Società Terme, hanno limitato l'accessibilità all'area termale e la possibilità di ripetere le prove di portata. Non si è quindi ritenuto significativo riportare i dati pluviometrici più recenti.

I valori annuali di precipitazione registrati alla stazione di Montecatini Terme nell'intervallo temporale 1935-2017, sono stati confrontati con i valori di portata misurata alle sorgenti Leopoldina, Rinfresco, Tettuccio, Regina estratti dall'elaborato delle Terme di Montecatini Spa, fornitoci dal Comune di Montecatini Terme *Portate sorgenti dal 1932 al 2003*. Dopo il 2003, fino al 2016 le prove di portata sono state effettuate in modo discontinuo ma sono comunque riportate per evidenziare il loro andamento dal 1935.

Nella Fig. 4 è rappresentato il quadro generale delle portate misurate alle rispettive sorgenti assieme a tutti i dati disponibili ricavati dalle fonti bibliografiche sopra citate.

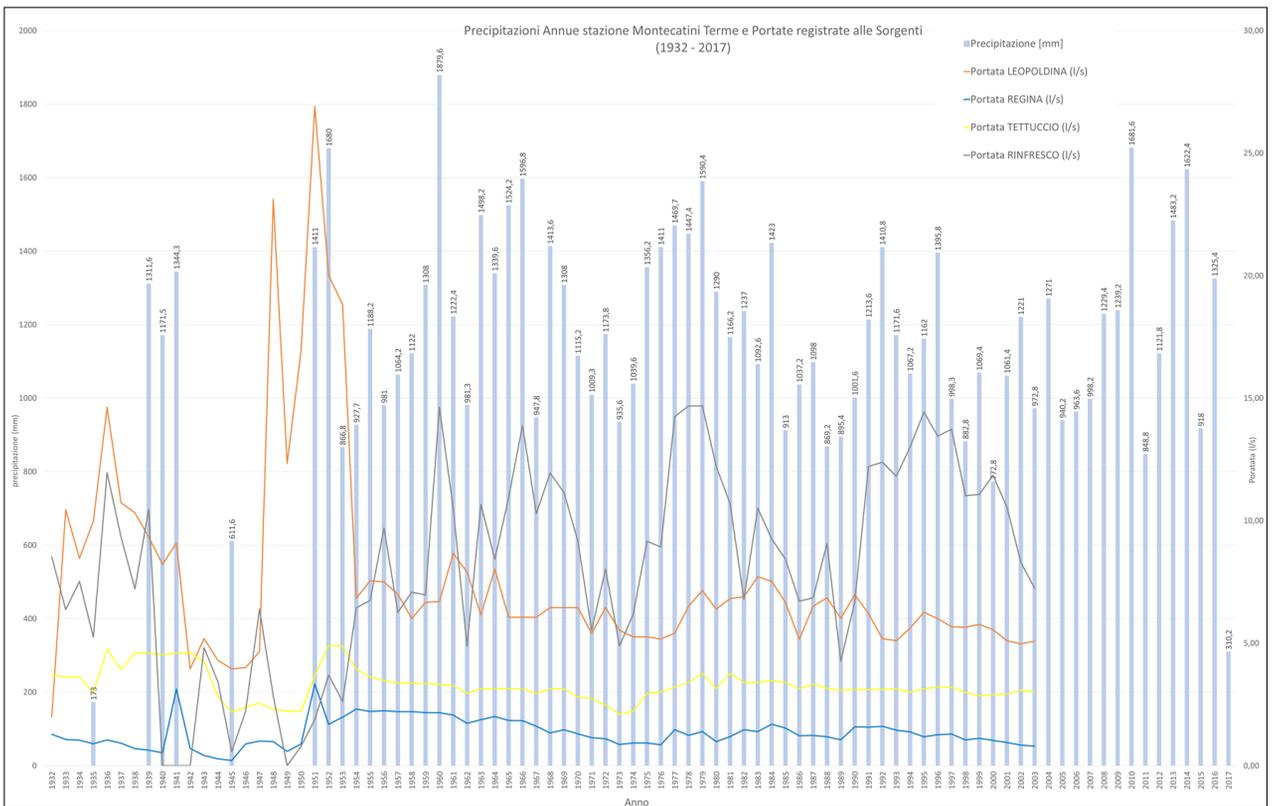


Figura 4. Precipitazioni annue registrate alla stazione di Montecatini Terme (dal 1935 al 2017) e dati di portata (l/s, dal 1932) misurati alle sorgenti Leopoldina (linea arancio), Regina (linea azzurra), Tettuccio (linea gialla) e Rinfresco (linea grigia).

PROVA DI PORTATA EFFETTUATA

Allo scopo di stabilire le portate effettivamente emungibili dai pozzi Leopoldine 2 e Leopoldine 3 e monitorare gli effetti che tali emungimenti possono generare sulle sorgenti vicine, nell'aprile 2016 è iniziata una campagna di analisi, terminata poi nel giugno 2016.

L'importanza di conoscere l'entità di tali portate è dovuta, oltre alla comprensione dei fenomeni di possibile interferenza tra le captazioni all'interno dello stesso bacino idrotermale, alla necessità di dover disporre di un quantitativo di acqua notevole per soddisfare quanto richiesto dalle normative in materia di "piscine termali", sotto il profilo igienico-sanitario.

Ad oggi, la suddetta normativa ha subito un aggiornamento sostanziale che riduce sensibilmente il quantitativo di acque di ricambio giornaliero dalle piscine termali, riducendolo ad almeno il «2% del volume della piscina ogni ora, considerando nelle ventiquattro ore solo l'orario di apertura dello stabilimento termale» (art. 47ter della L.R. 38/2004 così come modificata dalla L.R. 74 del 02.11.2016). Tale aggiornamento risponde ad esigenze di salvaguardia dello sfruttamento della risorsa idrotermale nell'ottica della sua sostenibilità ambientale consentendone il parziale ricircolo nelle stesse piscine termali delle acque emunte o disponibili dal

serbatoio termale. Le suddette operazioni devono però sottostare a precise e specifiche condizioni di natura tecnico-igienico-sanitarie indicate in normativa.

PROPOSTA DI MONITORAGGIO

La proposta di piano operativo di esecuzione e monitoraggio delle prove di portata sui pozzi Leopoldine 3 e Leopoldine 2 finalizzato alla valutazione della portata di esercizio della risorsa era stata pianificata come segue (vedi Tab. 3).

Per pozzi da testare, Leopoldine 2 (realizzato nell'anno 1953 e di recente oggetto di operazioni di manutenzione) e Leopoldine 3 realizzato ex-novo nel 2009, essendo artesiani, non era stata ritenuta necessaria l'utilizzo di una pompa di emungimento, ma era stato ritenuto sufficiente che le due opere fossero attrezzate con misuratori di portata e di pressione direttamente sulla condotta di emungimento e di valvola regolatrice della portata.

La prova di portata di lunga durata, a varie portate costanti, doveva essere eseguita in maniera distinta sui due pozzi, mantenendo una portata di sfioro del pozzo non in prova dell'ordine di circa 10-20 lt/sec. Nello specifico:

Tabella 3. Schema teorico delle prove di portata sui pozzi Leopoldine 3 e 2.

	Pozzo leopoldine III				Pozzo leopoldine II			
	1° Scalino	2° Scalino	3° Scalino	4° Scalino	1° Scalino	2° Scalino	3° Scalino	4° Scalino
GG. Consecutivi	20 lt/sec	40 lt/sec	60 lt/sec	80 lt/sec	20 lt/sec	40 lt/sec	60 lt/sec	80 lt/sec
0-21	■							
21-42		■						
42-63			■					
63-84				■				
84-105					■			
105-126						■		
126-147							■	
147-168								■

Prova sul pozzo Leopoldine 3:

- primo scalino a circa 20 lt/sec – prova a portata costante per circa 21 gg consecutivi con misura della portata e della pressione una volta al giorno (eventuale regolazione della valvola);
- secondo scalino a circa 40 lt/sec – prova a portata costante per circa 21 gg consecutivi con misura della portata e della pressione una volta al giorno (eventuale regolazione della valvola);
- terzo scalino a circa 60 lt/sec – prova a portata costante per circa 21 gg consecutivi con misura della portata e della pressione una volta al giorno (eventuale regolazione della valvola);
- quarto scalino a circa 80 lt/sec – prova a portata costante per circa 21 gg consecutivi con misura della portata e della pressione una volta al giorno (eventuale regolazione della valvola).

Durante la prova dovevano essere tenuti sotto controllo una volta a settimana, con apposite misure di portata, o livello, o pressione i punti di monitoraggio sorgente Rinfresco, sorgente Tettuccio e Regina, da confrontare, in un secondo momento, con le misurazioni effettuate dalla Regione Toscana, tramite utilizzo di sonde di registrazione, in alcuni pozzi perimetrali all'area termale (vedi ubicazione in Fig. 5).

Una volta terminata la prova sul pozzo Leopoldine 3 era stato previsto di procedere al pozzo Leopoldine 2 secondo il seguente piano:

Prova sul pozzo Leopoldine 2:

- primo scalino a circa 20 lt/sec – prova a portata costante per circa 21 gg consecutivi con misura della portata e della pressione una volta al giorno (eventuale regolazione della valvola);
- secondo scalino a circa 40 lt/sec – prova a portata costante per circa 21 gg consecutivi con misura della portata e della pressione una volta al giorno (eventuale regolazione della valvola);

- terzo scalino a circa 60 lt/sec – prova a portata costante per circa 21 gg consecutivi con misura della portata e della pressione una volta al giorno (eventuale regolazione della valvola);
- quarto scalino a circa 80 lt/sec – prova a portata costante per circa 21 gg consecutivi con misura della portata e della pressione una volta al giorno (eventuale regolazione della valvola).

Anche durante queste prove devono essere monitorate una volta a settimana la sorgente Rinfresco, sorgente Tettuccio e Regina, e confrontate poi con i dati ottenuti dalle sonde di registrazione della Regione Toscana. Lo scopo era quello di sollecitare la falda termale per circa 170 gg consecutivi con una portata media di 50 lt/sec (Tab. 3).

ESECUZIONE DELLE PROVE DI PORTATA

A partire dalla pianificazione della prova di portata descritta nel precedente paragrafo, l'esecuzione reale della prova ha subito delle modifiche sostanziali rispetto al programma originario a causa di problemi logistici ed operativi. La prova di portata si è svolta sostanzialmente con la realizzazione di due gradini, secondo quanto descritto qui di seguito.

Allo scopo di comprendere il lavoro svolto, viene precisato che, mentre il pozzo Leopoldine 2 è dotato di unica valvola di uscita, il pozzo Leopoldine 3 è invece caratterizzato da due valvole distinte, una che porta il fluido idrotermale agli stabilimenti ed una valvola unica di uscita esterna.

La prova è iniziata in data 12.04.2016 ed è terminata in data 14.06.2016. Nel dettaglio:

- gradino 1: dal 12.04.2016 al 19.05.2016 la prova è stata eseguita con apertura dell'uscita unica del pozzo Leopoldine 2 e con l'uscita agli stabilimenti del pozzo Leopoldine 3; al contempo, il monitoraggio è stato eseguito alle limitrofe sorgenti Rinfresco, Regina e Tettuccio;

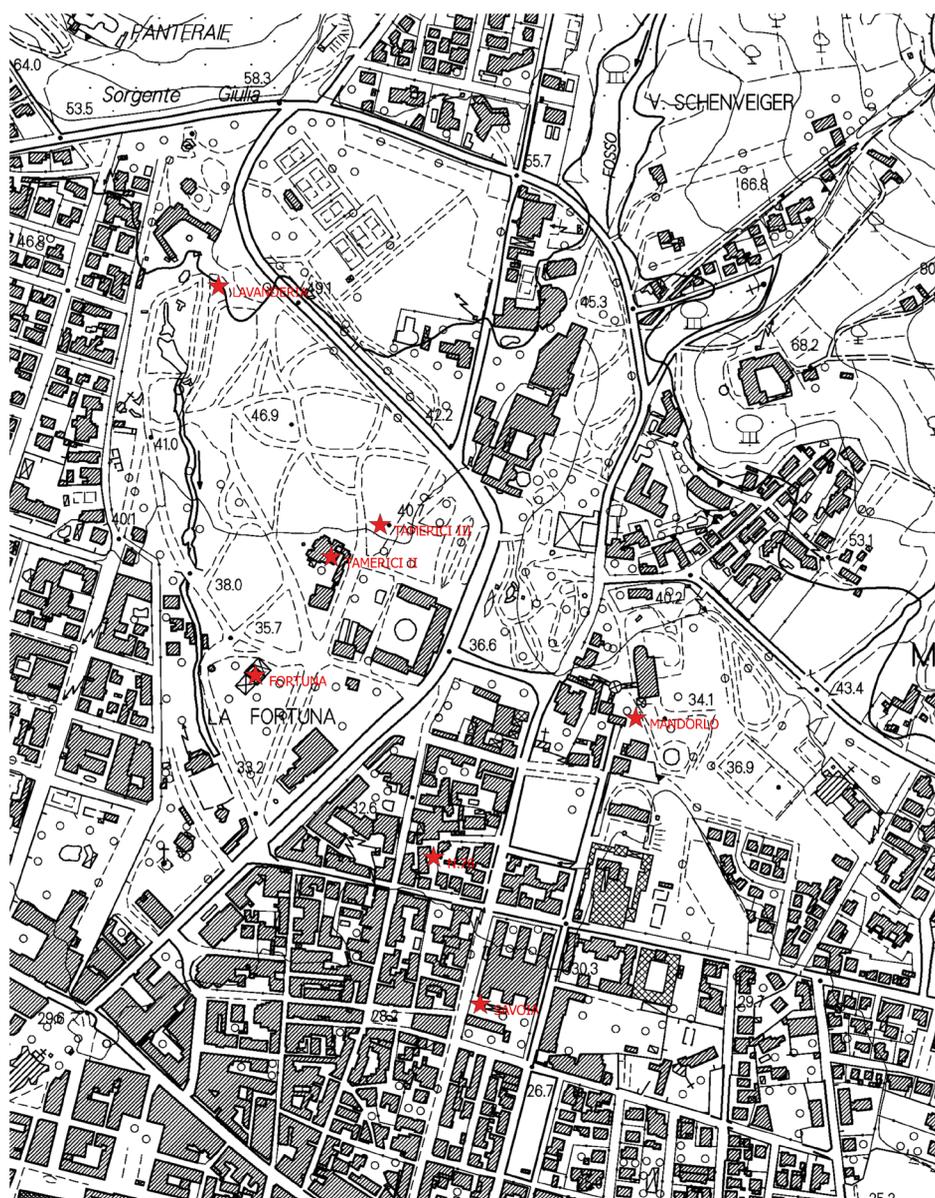


Figura 5. Localizzazione sonde di registrazione installate dalla Regione Toscana (cartografia non in scala del comprensorio termale).

- gradino 2: dal 20.05.2016 al 14.06.2016 la prova è stata eseguita con apertura unica dell'uscita del pozzo Leopoldine 2 e con entrambe le uscite del pozzo Leopoldine 3 (uscita agli stabilimenti e l'uscita esterna); al contempo, il monitoraggio è stato eseguito alle limitrofe sorgenti Rinfresco, Regina e Tettuccio.

I dati misurati in campagna, di pressione e portata, alle sorgenti e ai pozzi interessati, sono riportati nella Tab. 4 e posti su diagramma in modo da avere una visione più immediata di quanto emerso durante la realizzazione della prova di portata (Fig. 6).

I dati ottenuti a seguito dell'esecuzione delle prove di portata hanno messo in evidenza quanto segue:

Gradino 1:

- per pozzo Leopoldine 2 si registrano valori di portata massima di 6,9 l/s (in data 12.04.2016) ed un valore minimo di portata di 6,25 l/s (in data 19.05.2016); i valori di portata media sono dell'ordine dei 6,64 l/s;
- per pozzo Leopoldine 3 si registrano all'uscita agli stabilimenti valori di portata massima di 14 l/s (in data 14.04.2016) ed un valore minimo di portata di 10,88 l/s (in data 19.05.2016); i valori di portata media sono dell'ordine dei 12,65 l/s.
- per la sorgente Rinfresco si registrano valori di portata massima di 10,8 l/s (in data 12.04.2016) ed un valore minimo di portata di 7,97 l/s (in data

Tabella 4. Dati misurati in campagna, di pressione e portata, alle sorgenti e ai pozzi interessati durante la prova di portata.

data	Pozzo Leopoldine 2		Pozzo Leopoldine 3			Sorgente Rinfresco	Sorgente Regina	Sorgente Tettuccio	
	<i>P (bar)</i>	<i>Q (l/s)</i>	<i>P (bar)</i>	<i>Q (l/s)</i>	<i>P (bar)</i>	<i>Q (l/s)</i>	<i>Q (l/s)</i>	<i>Q (l/s)</i>	
	<i>uscita unica</i>		<i>uscita esterna</i>			<i>uscita stabilimenti</i>			
						stramazzo	stramazzo	stramazzo	
12.04.2016	1,81	6,9			1,34	12,5	10,8	1,21	2,5
13.04.2016	1,8	6,85			1,35	13,5	10,5	1,22	2,6
14.04.2016	1,79	6,61			1,38	14	10,2	1,25	2,4
15.04.2016		6,8				13,6	10,3	1,21	2,5
16.04.2016		6,65				13,7	10,3	1,22	2,5
17.04.2016		6,7				13	10,2	1,20	2,6
18.04.2016		6,75				12,9	10,1	1,21	2,51
19.04.2016		6,43				12,16	9,19	1,20	2,32
20.04.2016		6,6				12,5	9,2	1,19	2,3
21.04.2016		6,54				12,16	8,93	1,15	2,2
22.04.2016		6,65				12,8	9,3	1,18	2,3
23.04.2016		6,55				12,7	9,25	1,20	2,32
24.04.2016		6,6				12,8	9,1	1,21	2,3
25.04.2016		6,75				12,6	8,95	1,19	2,3
26.04.2016		6,8				12,65	8,9	1,20	2,25
27.04.2016		6,75				12,7	8,3	1,20	2,3
28.04.2016		6,74				12,5	7,97	1,22	2,23
29.04.2016		6,71				12,55	8,1	1,21	2,25
30.04.2016		6,73				12,5	8,1	1,20	2,3
01.05.2016		6,75				12,45	8,25	1,19	2,27
02.05.2016		6,73				12,5	8,15	1,22	
13.05.2016					1,22	12,16	8,45	0,65	2,33
14.05.2016	1,75	6,54			1,28	12,8	8,48	0,68	2,35
15.05.2016	1,7	6,45			1,25	12,8	8,46	0,65	2,5
16.05.2016	1,72	6,48			1,28	12,85	8,58	0,60	2,45
17.05.2016	1,62	6,43			1,25	13	8,73	0,54	2,4
18.05.2016	1,6	6,46			0,95	11	8,45	0,52	2,4
19.05.2016	1,65	6,25			0,95	10,88	8	0,50	2,38
20.05.2016	1,65	6,15		22,9	0,9	10,8	7,64	0,57	2,15
21.05.2016	1,68	6,2		22,5	0,95	10,6	7,65	0,58	2,2
22.05.2016	1,65	6,23		22,1	0,9	10,7	7,63	0,56	2,25
23.05.2016	1,6	6,25		21,8	0,95	10,57	7,6	0,55	2,36
24.05.2016	1,62	6,3		215,0	0,95	10,58	7,2	0,56	2,33
25.05.2016	1,65	6,35		21,8	0,95	10,6	7,2	0,57	2,35
26.05.2016	1,65	6,3		21,7	0,95	10,65	7,25	0,57	2,33
27.05.2016	1,65	6,35		21,6	0,9	10,7	7,1	0,56	2,34
28.05.2016	1,68	6,3		21,6	0,95	10,6	7	0,58	2,33
29.05.2016	1,65	6,2		21,5	0,95	10,55	7,1	0,56	2,34
30.05.2016	1,6	6,3		21,6	0,95	10,6	6,95	0,57	2,35
31.05.2016	1,65	6,4		21,5	0,95	10,6	6,9	0,58	2,34
01.06.2016	1,6	6,35		21,3	0,9	10,65	6,8	0,57	2,34
02.06.2016	1,65	6,4		21,4	0,95	10,6	6,5	0,56	2,33
03.06.2016	1,65	6,35		21,0	0,9	10,35	6	0,58	2,3
04.06.2016	1,6	6,4		20,9	0,95	10,4	5,8	0,57	2,25
05.06.2016	1,6	6,4		20,5	0,9	10,3	5,5	0,56	2,3
06.06.2016	1,55	6,45		20,3	0,85	10,23	5	0,59	2,17
07.06.2016	1,55	6,25		20,3	0,75	10,23	4,95	0,57	2,27
08.06.2016	1,6	6,3		20,5	0,8	10,2	4,9		
09.06.2016	1,55	6,25		20,3	0,75	10,25	4,88	0,59	2,22
10.06.2016	1,5	6,3		20,4	0,75	10,22	4,7	0,57	2,2
11.06.2016	1,55	6,25		20,4	0,75	10,18	4,3	0,58	2,18
12.06.2016	1,5	6,22		20,5	0,8	10,15	4,1	0,59	2,2
13.06.2016	1,55	6,2		20,5	0,75	10,1	4	0,60	2,18
14.06.2016	1,5	6,19		22,2	0,75	9,82	3,99	0,62	2,17

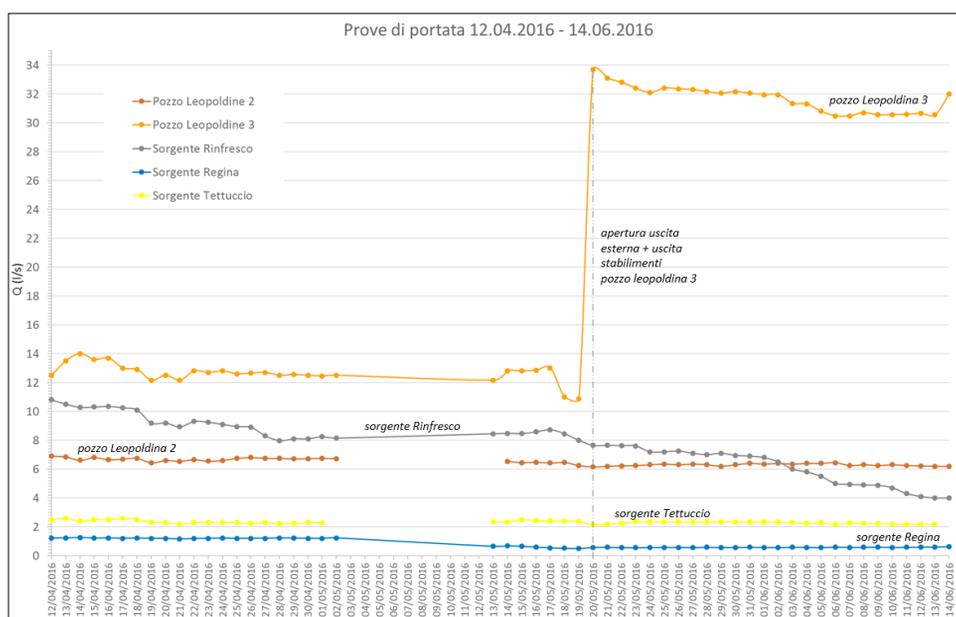


Figura 6. Risultati delle prove di portata ai pozzi Leopoldine 2 e Leopoldine 3.

- per la sorgente Regina si registrano valori di portata massima di 1,25 l/s (in data 14.04.2016) ed un valore minimo di portata di 0,5 l/s (in data 19.05.2016); i valori di portata media sono dell'ordine dei 1,05 l/s;
- per la sorgente Tettuccio si registrano valori di portata massima di 2,6 l/s (in data 13.04.2016) ed un valore minimo di portata di 2,20 l/s (in data 21.04.2016); i valori di portata media sono dell'ordine dei 2,37 l/s.

Gradino 2:

- per pozzo Leopoldine 2 si registrano valori di portata massima di 6,45 l/s (in data 06.06.2016) ed un valore minimo di portata di 6,15 l/s (in data 20.05.2016); i valori di portata media sono dell'ordine dei 6,29 l/s;
- per pozzo Leopoldine 3 si registrano all'uscita agli stabilimenti valori di portata massima di 10,80 l/s (in data 20.05.2016) ed un valore minimo di portata di 9,82 l/s (in data 14.06.2016); i valori di portata media sono dell'ordine dei 10,43 l/s; all'uscita esterna si registrano valori di portata massima di 22,88 l/s (in data 20.05.2016), valore minimo di portata di 20,25 l/s (in data 06-07.06.2016); i valori di portata media sono dell'ordine dei 21,24 l/s;
- per la sorgente Rinfresco si registrano valori di portata massima di 7,65 l/s (in data 21.05.2016) ed un valore minimo di portata di 3,99 l/s (in data 14.06.2016); i valori di portata media sono dell'ordine dei 6,10 l/s;
- per la sorgente Regina si registrano valori di portata massima di 0,62 l/s (in data 14.06.2016) ed un valore minimo di portata di 0,55 l/s (in data 23.05.2016); i valori di portata media sono dell'ordine di 0,57 l/s;
- per la sorgente Tettuccio si registrano valori di portata massima di 2,36 l/s (in data 23.05.2016) ed un valore minimo di portata di 2,17 l/s (in data 06-14.06.2016); i valori di portata media sono dell'ordine dei 2,27 l/s.

La Tab. 5 riassume i dati appena citati.

Analizzando le tendenze generali dei dati rilevati, si osserva che per aumenti progressivi di emungimento dai pozzi Leopoldine 2 e 3 si manifesta una diminuzione progressiva nelle sorgenti vicine, con decrementi più o meno marcati e che hanno determinato, per sicurezza, in data 14.06.2016, l'interruzione della prova di portata senza quindi realizzare i 4 gradini previsti (Fig. 6).

La valutazione qualitativa di tali diminuzioni di portata evidenzia che gli abbassamenti più sostanziali si registrano alle sorgenti Rinfresco e Regina.

Per le tre sorgenti possiamo comunque affermare che la diminuzione della portata non risulta coincidente all'avvio dell'emungimento da entrambe le uscite (esterne e agli stabilimenti) del pozzo Leopoldine 3, iniziato in data 20.05.2016 e, a seguito del quale, sono stati mantenuti emungimenti medi elevati, dell'ordine dei 37,96 l/s (di cui 31,67 l/s al pozzo Leopoldine 3 e 6,29 l/s al pozzo Leopoldine 2) fino al termine della prova (14.06.2016).

La diminuzione di portata assume un andamento più lineare per la sorgente Tettuccio, mentre le sorgenti Rinfresco e Regina mostrano dei salti più bruschi nelle variazioni dei quantitativi d'acqua idrotermale.

Tali valutazioni qualitative sono confermate dalla stima percentuale delle diminuzioni di portata manifestatesi alle opere di captazione interessate (ultima riga di Tab. 5), secondo le quali i maggiori abbassamenti si verificano per le sorgenti Rinfresco e Regina con valori rispettivamente del 26% e del 48% e del 60% e dell'11%, nei due gradini della prova.

Considerando lo stesso intervallo temporale di realizzazione delle prove di portata, ovvero per i mesi da aprile a giugno, sono stati analizzati i risultati delle prove eseguite con le sonde di registrazione installate dalla Regione Toscana in punti di controllo specifici (ex-pozzi e prese d'acqua di falda, Fig. 5). I risultati sono riportati nelle Figg. 7 e 8.

DISCUSSIONE DEI DATI

Allo scopo di stabilire le portate effettivamente emungibili dai pozzi Leopoldine 2 e Leopoldine 3, e monitorare gli effetti che tali emungimenti possono generare sulle sorgenti vicine, sono stati elaborati dati bibliografici e sperimentali disponibili.

Nello specifico, sono stati analizzati:

- dati di precipitazione annua registrati alla stazione pluviometrica di Montecatini Terme, nell'intervallo temporale 1935-2017, disponibili sul portale SIR della Regione Toscana;
- dati bibliografici di portata al pozzo Leopoldine e alle sorgenti (Rinfresco, Tettuccio e Regina) per gli anni dal 1932 al 2003, riportati nel documento delle Terme di Montecatini Spa *Portate sorgenti dal 1932 al 2003*;

- risultati di una prova di portata realizzata dal 12.04.2016 al 14.06.2016 ai pozzi Leopoldina 2 e Leopoldina 3 e relativi dati di monitoraggio alle sorgenti Rinfresco, Regina e Tettuccio.

La disponibilità di una mole piuttosto consistente di dati ha reso possibile la stesura di una serie di considerazioni espone qui di seguito.

L'andamento delle precipitazioni annue registrate alla stazione pluviometrica di Montecatini Terme, per i decenni analizzati, non mostra particolari tendenze. Come visibile nella Fig. 4, l'andamento dei dati mostra valori massimi di precipitazioni di circa 1880 mm nell'anno 1960, e valori minimi di 173 mm per l'anno 1935. Analizzando i dati, possiamo ritenere che tale minimo rappresenti un *outlier* dovuto a possibili lacune nella registrazione dei dati pluviometrici, disponibili solo per alcune mensilità. Eliminando tale dato l'analisi statistica individua infatti un valore minimo di 611,6 mm per l'anno 1945 e valori medi di precipitazione di 1190 mm di pioggia per tutti i decenni analizzati. La suddetta analisi statistica esclude inoltre i dati per l'anno 2017, attualmente in corso di elaborazione, e quindi non rappresentativo per la cumulata annuale.

La stessa Fig. 4 sovrappone ai dati di precipitazione i dati di portata registrati alle sorgenti Rinfresco, Regina e Tettuccio e al pozzo Leopoldina, per i decenni 1932-2003, allo scopo di verificare una correlazione diretta tra i dati delle portate e gli aspetti climatici dell'area. A questo proposito, la sorgente Rinfresco ed il pozzo Leopoldine mostrano una più marcata correlazione tra portate e precipitazioni, con picchi nell'andamento delle portate che sembrano seguire quasi fedelmente i picchi maggiormente piovosi nel ci-

Tabella 5. Valori statistici misurati durante la prova di portata ai pozzi e alle sorgenti (in l/s).

gradino 1						
	Leopoldine II	Leopoldine III		Sorgente Rinfresco	Sorgente Regina	Sorgente Tettuccio
	<i>uscita unica</i>	<i>uscita esterna</i>	<i>uscita stabilimenti</i>			
max	6,45		14,00	10,80	1,25	2,60
min	6,25		10,88	7,97	0,50	2,20
media	6,64		12,65	9,05	1,05	2,37
diminuzione %	9		22	26	60	15
gradino 2						
	Leopoldine II	Leopoldine III		Sorgente Rinfresco	Sorgente Regina	Sorgente Tettuccio
	<i>uscita unica</i>	<i>uscita esterna</i>	<i>uscita stabilimenti</i>			
max	6,45	22,88	10,80	7,65	0,62	2,36
min	6,15	20,25	9,82	3,99	0,55	2,17
media	6,29	21,24	10,43	6,10	0,57	2,27
diminuzione %	5	11	9	48	11	8

clo annuale. Tale correlazione risulta accennata, anche se visibilmente meno marcata per le altre due sorgenti analizzate Regina e Tettuccio.

Dati più dettagliati sono stati ricavati dai risultati della prova di portata svolta nell'intervallo temporale 12.04.2016-14.06.2016 sui pozzi Leopoldine 2 e Leopoldine 3 ed il contemporaneo monitoraggio che ha interessato le sorgenti, più volte citate, Rinfresco, Regina e Tettuccio.

I risultati di tale indagine, riportati nella Fig. 6, mostrano che dai pozzi Leopoldine 2 e Leopoldine 3, a seguito dell'apertura di entrambe le uscite, quella esterna e quella agli stabilimenti (gradino 2), del pozzo Leopoldine 3 iniziata in data 20.05.2016, veniva emunta una quantità media di 37,96 l/s (di cui 31,67 l/s al pozzo Leopoldine 3 e 6,29 l/s al pozzo Leopoldine 2) fino al termine della prova (14.06.2016). Tutto ciò mette in evidenza che per aumenti progressivi di emungimento dai pozzi Leopoldine 2 e 3, si manifesta una diminuzione progressiva nelle sorgenti vicine, con decrementi più o meno marcati e che hanno determinato, in data 14.06.2016, l'interruzione della prova di portata (Fig. 6). Tale diminuzione di portata assume un andamento più lineare per la sorgente Tettuccio, mentre le sorgenti Rinfresco e Regina mostrano dei salti più bruschi nelle variazioni dei quantitativi d'acqua idrotermale (vedi Fig. 6). L'avvio della diminuzione delle portate alle sorgenti non coincide con l'apertura di entrambe le uscite al pozzo Leopoldine 3 (gradino 2), come specificato anche in precedenza, dimostrando quindi una possibile interferenza tra le portate emunte e le portate registrate alle sorgenti già prima dell'inizio dell'estrazione delle portate più significative (apertura uscita esterna pozzo Leopoldine 3 in data 20.05.2016).

Il fatto che la diminuzione delle portate alle sorgenti avvenga precedentemente all'avvio del secondo gradino della prova, con emungimenti maggiori, denota che l'interferenza tra le captazioni avvenga quindi già durante il primo gradino di portata, per valori medi di emungimento di circa 19,29 l/s (Leopoldine 2 e Leopoldine 3) come dai dati riportati in Tab. 5. Non si possono comunque escludere interferenze al contorno che non è stato possibile individuare.

L'ordine di grandezza dei 20-25 l/s corrisponde a quanto era già stato segnalato da Canavari (1924), che stabiliva una portata estraibile di 24 l/s per le sorgenti Leopoldine e spiegherebbe anche la necessità, manifestatasi nel tempo, di dover regolare artificialmente la portata delle Leopoldine a valori ulteriormente inferiori, dell'ordine dei 5-7 l/s (Malesani & Nolledi, 2005).

Considerando lo stesso intervallo temporale di realizzazione delle prove di portata, ovvero per i mesi da aprile a giugno, sono stati analizzati i risultati delle misurazioni eseguite con le sonde di registrazione installate dalla Regione Toscana.

I dati ottenuti da queste ultime Figg. 7 e 8 non mostrano correlazioni evidenti tra le prove di portata realiz-

zate. L'unico elemento di evidenza è un innalzamento dei livelli freatici in corrispondenza dei giorni 25.04 e 14.01.2016, ovvero in corrispondenza (vedi dopo) di due eventi pluviometrici più intensi del periodo, segno evidente che i punti di controllo hanno una correlazione diretta con una falda superficiale non termale.

Data l'influenza delle variazioni climatiche con l'andamento delle portate alle sorgenti riportate in bibliografia, e come visibile dal diagramma di Fig. 10, si è posto il problema di analizzare i dati pluviometrici nell'intervallo temporale di realizzazione della prova di portata, 12.04-14.06.2016, da correlare con l'andamento delle portate registrate durante la stessa prova. I dati di pioggia, espressi in mm, per il tempo di durata del test sono riportati in Tab. 6 e in Fig. 9. L'osservazione non mostra apparentemente correlazioni dirette tra le precipitazioni e l'andamento delle portate registrate nei giorni di durata delle prove.

Un'ulteriore correlazione tra i dati di precipitazione e di portata è stata ricercata sulla base di quanto enunciato da Brandi *et al.*, 1967 secondo cui «in base principalmente ai dati della sorgente Rinfresco, si può osservare che i minimi di portata seguono con uno sfasamento di 3-4 mesi la stagione secca estiva. Per ciò che si riferisce ai massimi di portata è probabile che essi risentano solo in scarsa misura delle piogge autunnali, che hanno principalmente la funzione di saturare la parte superficiale della zona di percolazione. Quando ciò è stato realizzato, le piogge dell'inverno avanzato e della primavera possono avere un effetto estremamente rapido sulla portata, che risente dell'aumento di carico idrostatico nelle zone di alimentazione».

A questo proposito, la consultazione dell'andamento delle precipitazioni negli anni 2015 e 2016 (Fig. 10) ha permesso di intercettare un picco di precipitazione nel febbraio 2016, circa 4 mesi prima della prova di portata.

La diminuzione della portata alla sorgente Rinfresco, non risulta quindi imputabile a mancati apporti pluviometrici nei 3-4 mesi precedenti, dove viene individuato un picco di precipitazioni, che avrebbe eventualmente dovuto contribuire ad un eventuale incremento delle portate alla sorgente. Si conferma pertanto l'influenza degli emungimenti effettuati durante l'esecuzione delle prove.

Stesse considerazioni possono essere enunciate in merito alla sorgente Regina con l'unica differenza che il decremento della portata, dopo un salto piuttosto brusco, tende quasi a stabilizzarsi.

I comportamenti delle due sorgenti sono da imputarsi alla loro diversa quota di affioramento, rispettivamente di circa 53,22 m per la Rinfresco, e di circa 45,21 m per la Regina. La sorgente Rinfresco, trovandosi infatti a quote maggiori, risente in modo più consistente delle diminuzioni delle pressioni, disponendo di minor carico idraulico. Viceversa la sorgente Regina, trovandosi a quote meno elevate, ha una diminuzione inferiore.

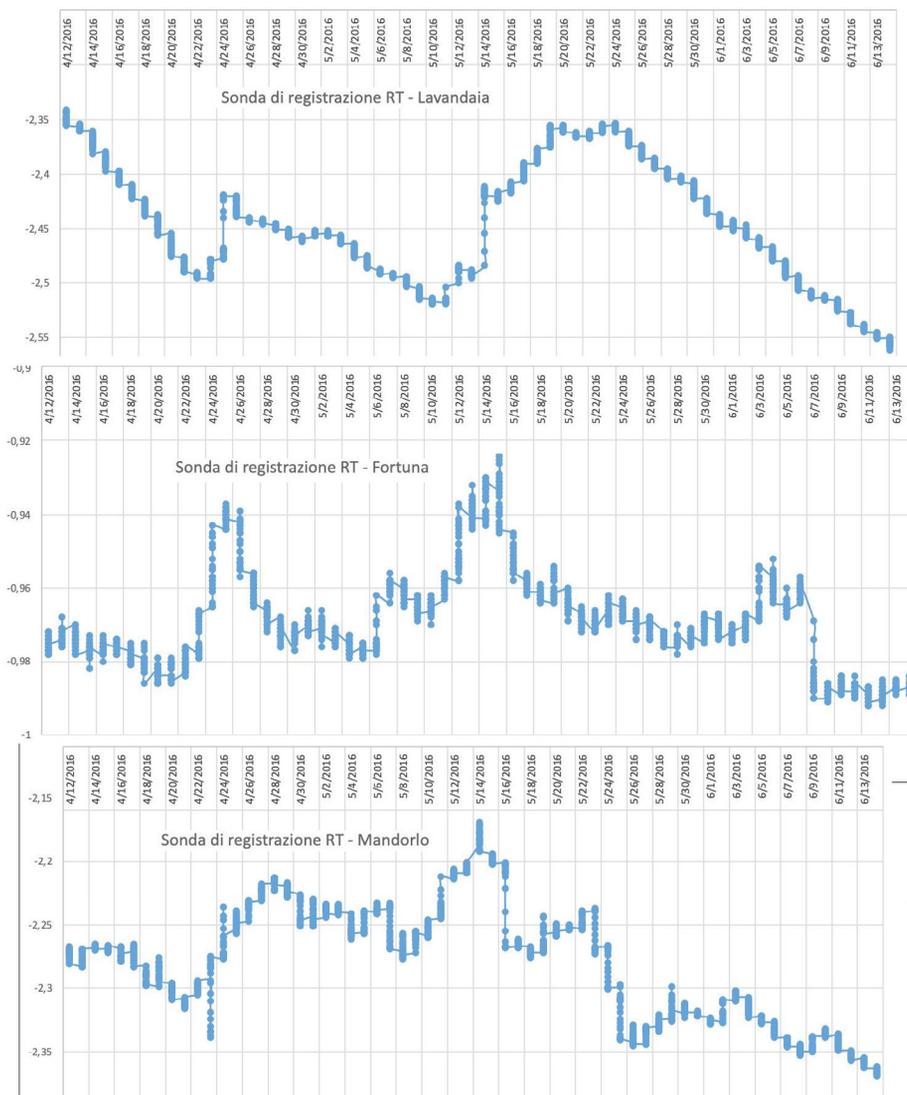


Figura 7. Dati delle sonde di registrazione della Regione Toscana - Lavandaia, Fortuna e Mandorlo.

Tabella 6. Dati di precipitazione nell'intervallo temporale 12.04-14.06.2016 estratti dal portale SIR della Regione Toscana (stazione pluviometrica Montecatini Terme).

data	prec (mm)										
12.04.2016	0	03.05.2016	0,2	24.05.2016	2,2	23.04.2016	6,8	14.05.2016	31,8	04.06.2016	0,8
13.04.2016	0	04.05.2016	4	25.05.2016	0	24.04.2016	29	15.05.2016	0,4	05.06.2016	2,4
14.04.2016	0,2	05.05.2016	0	26.05.2016	0	25.04.2016	31,2	16.05.2016	10	06.06.2016	0
15.04.2016	0	06.05.2016	0	27.05.2016	0	26.04.2016	1	17.05.2016	1,8	07.06.2016	1,4
16.04.2016	0	07.05.2016	0	28.05.2016	0	27.04.2016	1,4	18.05.2016	0	08.06.2016	0
17.04.2016	0	08.05.2016	0	29.05.2016	0,2	28.04.2016	0	19.05.2016	5,6	09.06.2016	0
18.04.2016	0	09.05.2016	0,4	30.05.2016	13,2	29.04.2016	0	20.05.2016	8,2	10.06.2016	3
19.04.2016	0	10.05.2016	0,2	31.05.2016	0	30.04.2016	0	21.05.2016	0	11.06.2016	0
20.04.2016	0	11.05.2016	0,4	01.06.2016	0,2	01.05.2016	9,8	22.05.2016	0	12.06.2016	0
21.04.2016	0	12.05.2016	27,2	02.06.2016	8,4	02.05.2016	1	23.05.2016	6	13.06.2016	2,6
22.04.2016	0	13.05.2016	2,2	03.06.2016	7					14.06.2016	0,4

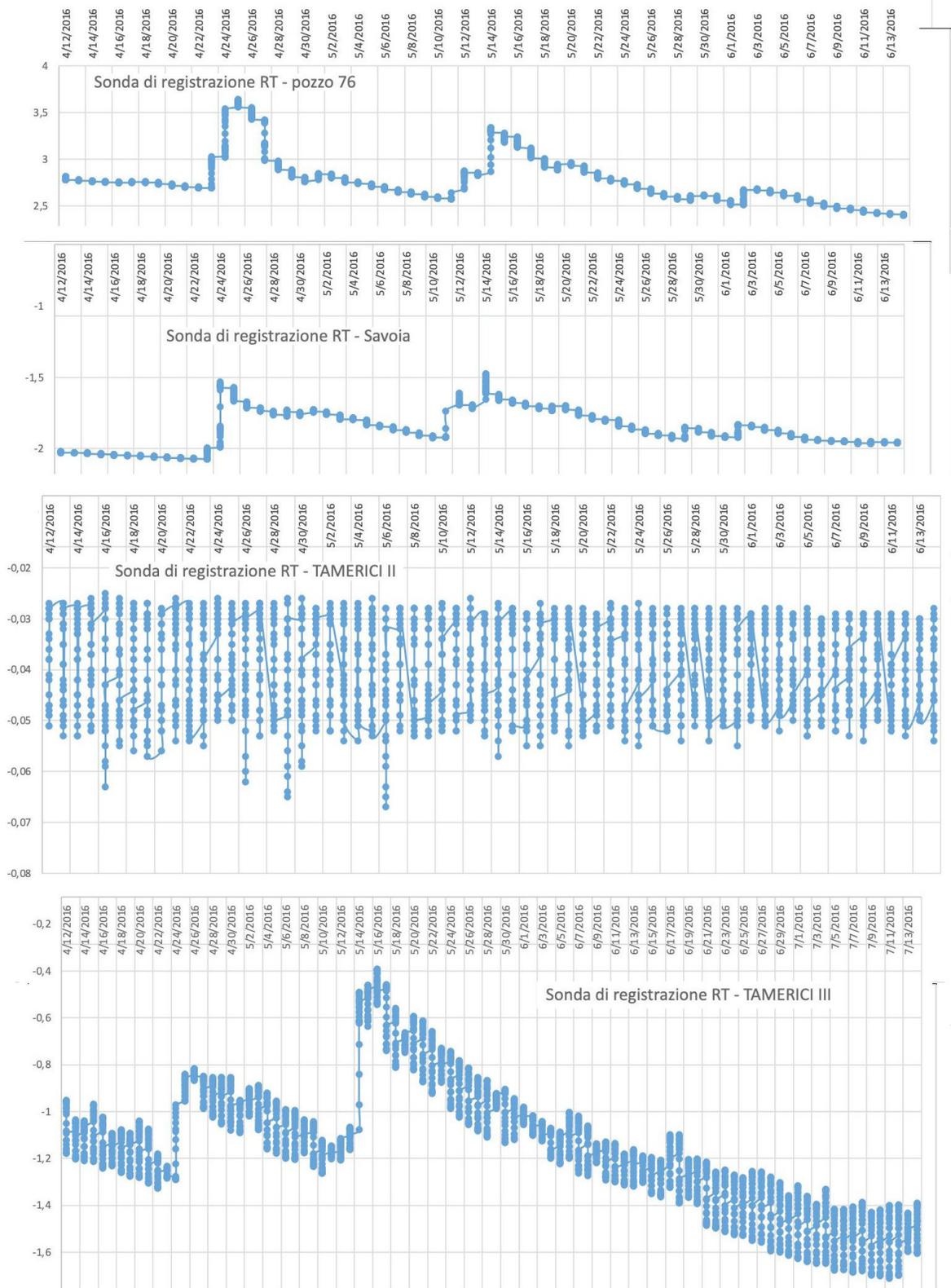


Figura 8. Dati delle sonde di registrazione della Regione Toscana - N. 76, Savoia, Tamerici II e Tamerici III.

dino 2), del pozzo Leopoldine 3 iniziata in data 20.05.2016, veniva emunta una quantità media di 37,96 l/s (di cui 31,67 l/s al pozzo Leopoldine 3 e 6,29 l/s al pozzo Leopoldine 2) fino al termine della prova (14.06.2016). Tutto ciò mette in evidenza che per aumenti progressivi di emungimento dai pozzi Leopoldine 2 e 3, si manifesta una diminuzione progressiva nelle sorgenti vicine, con decrementi più o meno marcati e che hanno determinato, in data 14.06.2016, l'interruzione della prova di portata (Fig. 6). Durante la realizzazione della prova di portata i maggiori abbassamenti si verificano per le sorgenti Rinfresco e Regina con valori rispettivamente del 26% e del 48% e del 60% e dell'11%, nei due gradini della prova (Tab. 5).

- 3) Non si verificano correlazioni tra il ciclo stagionale delle precipitazioni misurate alla stazione pluviometrica di Montecatini Terme e le portate emunte, per tutto il periodo di esecuzione della prova di portata (Fig. 9).
- 4) I pozzi Leopoldina 2 e Leopoldina 3 sono in grado di erogare ingenti quantitativi di acqua idrotermale da bibliografia ben oltre l'ordine medio dei 37,96 l/s misurata durante il gradino 2 delle prove, ma tale emungimento risulta incompatibile con lo sfruttamento in essere delle vicine sorgenti Rinfresco, Regina e Tettuccio. L'avvio della diminuzione delle portate alle sorgenti non coincide con l'apertura di entrambe le uscite al pozzo Leopoldine 3, dimostrando quindi una possibile interferenza tra le portate emunte e le portate registrate alle sorgenti già prima dell'inizio dell'estrazione delle portate più significative (apertura uscita esterna pozzo Leopoldine 3 in data 20.05.2016). L'interferenza tra le captazioni avviene quindi già durante il primo gradino di portata, che ha registrato valori medi di emungimento di circa 19,29 l/s (Leopoldine 2 e Leopoldine 3) come noto dai valori riportati in Tab. 5.
- 5) L'ordine di grandezza dei 20-25 l/s corrisponde a quanto era già stato segnalato da Canavari (1924), che stabiliva una portata estraibile di 24 l/s per le sorgenti Leopoldine e spiegherebbe anche la necessità, manifestatasi nel tempo, di dover regolare artificialmente la portata delle Leopoldine a valori ulteriormente inferiori, dell'ordine dei 5-7 l/s (Malesani & Nolledi, 2005).
- 6) Per la gestione futura della risorsa "Leopoldine" e di tutto il complesso termale è fondamentale comunque attuare una continua politica di monitoraggio della risorsa e delle relative captazioni con nuove prove di portata e misura poiché, vista la complessità del sistema termale di Montecatini Terme (sistema naturale sfruttato antropicamente), l'indagine eseguita potrebbe essere affetta da episodi periodici o condizioni al contorno non individuate in fase operativa che ne potrebbero aver alterato i risultati finali.

RINGRAZIAMENTI

Si ringrazia la Società Terme di Montecatini Terme per avere concesso di rendere pubblici i dati presentati. Si ringrazia inoltre il Dott. Geol. Marco Saulo Nannucci della Regione Toscana per averci fornito i risultati delle prove eseguite con le sonde di registrazione installate dalla Regione Toscana e l'Ing. Gino Lenzi (allora responsabile tecnico di Terme Montecatini Spa) per il supporto tecnico logistico alle operazioni di campionamento e monitoraggio effettuate.

DICHIARAZIONE DI CONFLITTO DI INTERESSE

Gli autori dichiarano di non avere né un conflitto di interessi né conosciuti interessi economici o relazioni personali che potrebbero aver influenzato il lavoro riportato in questo articolo.

BIBLIOGRAFIA

- BELLINCIONI D., FANCELLI E., GHELARDONI R., TREVISAN L., 1956. *Grande piega coricata con nucleo triassico in Val di Lima (Appennino Lucchese, Toscana)*. Atti Società Toscana Scienze Naturali. Memorie. Serie A 63: 71-76.
- BRANDI G.P., FRITZ P., RAGGI G., SQUARCI P., TAFFI L., TONGIORGI E., TREVISAN L., 1967. *Idrogeologia delle Terme di Montecatini*. Collana Scientifica Terme di Montecatini, Pistoia, 39. Edizioni e tipografia Terme di Montecatini (PT), 50 pp.
- CANAVARI M., 1924. *Le sorgenti di Montecatini in Val di Nievole di fronte alla Geologia*. Giornale di Geologia Pratica 18 (1-4): 1-52.
- CAPECCHIACCI F., TASSI F., VASELLI O., BIOCCHI G., CABASSI J., GIANNINI L., NISI B., CHIOCCIORA G., 2015. *A combined geochemical and isotopic study of the fluids discharged from the Montecatini thermal system (NW Tuscany, Italy)*. Applied Geochemistry 59: 33-46.
- CAROBBI G., CIPRIANI C., 1954. *Ricerche geochimiche sulle acque minerali di Montecatini Terme (Pistoia)*. Rendiconti della Società Mineralogica Italiana 10: 226-252.
- CHETONI R., 2002. *Indagine idrogeologica sul campo termale di Montecatini Terme*. Relazione tecnica Terme per Montecatini Spa.
- CHIAPPINI L., 1997. *Indagine geochimica dei fluidi compresi nell'area delimitata dai Fiumi Pescia e Ombrone Pistoiese*, Tesi di Laurea inedita, Università degli studi di Firenze.
- CHIOCCIORA G., 2010. *Pozzo Leopoldine 3 - Rapporto di esecuzione e completamento*. Relazione tecnica Terme per Montecatini Spa.
- CORADOSSI N., MARTINI M., 1965, *Contributo allo studio geochimico delle acque di Montecatini Terme*. Rendiconti della Società Mineralogica Italiana 21: 67-90.
- FAZZUOLI M., MAESTRELLI MANETTI O., 1973. *I nuclei mesozoici di Monsummano, Montecatini Terme e Marliana (Prov. di Pistoia)*. Memorie della Società Geologica Italiana 12: 39-79.
- GRASSI S., DOVERI M., ELLERO A., PALMIERI F., VASELLI L., CALVI E., TRIFIRÒ S., 2011. *Studio dei sistemi termali di Montecatini e Monsummano Terme*. Protocollo d'intesa Regione/CNR Istituto di Geoscienze e Georisorse (IGG) di Pisa per il monitoraggio delle risorse termali (DGR n1007/2207). On-line Final Report, 107 pp.

- LOTTI B., 1927. *Il regime sotterraneo delle acque basse di Montecatini bagni*. Bollettino del Regio Ufficio Geologico d'Italia 52 (10): 1-13.
- MALESANI P., NOLLEDI G., 2005. *Le acque di Montecatini Terme-Portate sorgenti 1932-2003*. Relazione tecnica Terme di Montecatini Spa.
- MANTELLI F., CALÀ P., RONCHI A., 2012-2013. *Le Terme di Montecatini. Dall'impiego terapeutico all'idrogeologia*. Agenzia Regionale per la Protezione Ambientale della Toscana (ARPAT) Dipartimento di Firenze – BEA Bollettino Esperti Ambientali.
- MARTINI M., 1968. *Studio del ciclo annuale della composizione delle acque di Montecatini Terme (Pistoia) e sua interpretazione*. Atti della Accademia Nazionale dei Lincei. Classe di Scienze Fisiche, Matematiche e Naturali. Rendiconti, Serie 8, 44 (6): 783-800.
- PUCCINELLI A., D'AMATO AVANZI G., VERANI M., PERILLI N., 2015. *Note illustrative della Carta geologica d'Italia alla scala 1:50.000 - Foglio 262 - Pistoia*. ISPRA, Servizio Geologico d'Italia, Roma, 161 pp.
- RAGGI G., TREVISAN L., 1973. *Protezione idrogeologica del campo idrotermale di Montecatini: delimitazione di aree di rispetto*. Relazione tecnica per la società Terme di Montecatini.
- TERME DI MONTECATINI S.P.A. – *Portate sorgenti dal 1932 al 2003*. Relazione tecnica Terme di Montecatini Spa
- TREVISAN L., 1951. *Una nuova ipotesi sull'origine della termalità di alcune sorgenti della Toscana*. Industria Mineraria 2: 41-42.
- TREVISAN L., 1954. *La nuova sorgente Leopoldina di Montecatini Terme e le condizioni geologiche del sottosuolo*. Bollettino Ingegneri Firenze 2 (8-9): 226-252.
- TREVISAN L., BRANDI G.P., DALLAN L., NARDI R., RAGGI G., RAU A., SQUARCI P., TAFFI L., TONGIORGI M., 1971. *Note illustrative della Carta Geologica d'Italia alla scala 1:100.000 - Foglio 105 - Lucca*. Servizio Geologico d'Italia, Roma, 52 pp.

SITOGRAFIA

Settore Idrologico Regionale - <http://www.sir.toscana.it/>

(ms. pres. 15 febbraio 2024, ult. bozze 15 dicembre 2024)