



*Direzione Regionale per lo
Sviluppo Economico e le Attività Produttive*



*Dipartimento di Scienze
Ecologiche e Biologiche (DEB)*

Studio su ipotesi operative di utilizzo delle risorse idriche del sistema idrotermale dell'area viterbese e programmazione dei relativi metodi e tecniche di monitoraggio

Viterbo, aprile 2017

Revisione 1.1

Il Rettore
Università degli Studi della Tuscia
Prof. Alessandro Ruggieri

Direttore del Dipartimento di
Scienze Ecologiche e Biologiche
Prof. Giuseppe Nascetti

Responsabile scientifico
Prof. Vincenzo Piscopo

Studio su ipotesi operative di utilizzo delle risorse
idriche del sistema idrotermale dell'area viterbese e
programmazione dei relativi metodi e
tecniche di monitoraggio

Gruppo di Lavoro

Prof. Vincenzo Piscopo (Dipartimento Scienze Ecologiche e Biologiche): responsabile scientifico.

Dott.ssa Antonella Baiocchi (PhD, collaboratrice presso il Dipartimento Scienze Ecologiche e Biologiche): rilevamenti idrogeologici, elaborazione dati e cartografia.

Dott. Michele Dimasi (collaboratore presso il Dipartimento Scienze Ecologiche e Biologiche): rilevamenti idrogeologici, elaborazione dati e simulazioni numeriche.

Dott.ssa Francesca Lotti (PhD, collaboratrice presso il Dipartimento Scienze Ecologiche e Biologiche): simulazioni numeriche.

Dott. Sergio Madonna (Dipartimento di Scienze Agrarie e Forestali): rilevamento geologico.

Dott. Francesco Giuseppe Rossi (dottorando di ricerca presso il Dipartimento di Scienze Agrarie e Forestali): collaborazione al rilevamento geologico.

Indice

1.	Introduzione	pag. 1
2.	Contesto geologico e idrogeologico	pag. 2
3.	Modello idrogeologico concettuale dell'area idrotermale di Viterbo	pag. 4
4.	Modelli matematici dell'area idrotermale di Viterbo	pag. 14
5.	Nuova campagna di misure, andamento della portata delle acque termali nel tempo e prelievi dall'acquifero superficiale	pag. 19
	5.1 Campagna di misure del 2016	pag. 19
	5.2 Andamento della portata delle acque termali nel tempo	pag. 24
	5.3 Stima dei prelievi dall'acquifero superficiale	pag. 28
6.	Nuovo modello di simulazione numerica del flusso	pag. 30
	6.1 Costruzione del modello	pag. 30
	6.2 Calibrazione e risultati del modello	pag. 35
	6.3 Nuova simulazione di prelievo dal TA	pag. 42
7.	Uso sostenibile delle acque sotterranee	pag. 46
	7.1 Valutazione della portata di prelievo sostenibile di acque termali	pag. 48
	7.2 Ulteriori valutazioni sul prelievo sostenibile dell'area idrotermale di Viterbo	pag. 50
8.	Ipotesi operative per l'utilizzo delle risorse idrotermali dell'area di Viterbo	pag. 54
9.	Salvaguardia delle risorse idrotermali del sistema di Viterbo	pag. 59
	9.1 Quadro normativo di riferimento	pag. 59
	9.2 Possibili criteri per le Misure di Tutela delle risorse idrotermali di Viterbo	pag. 62
	9.3 Delimitazione delle zone di salvaguardia e prescrizioni per l'uso delle risorse e del territorio	pag. 65
10.	Sistema di monitoraggio per la tutela ed alla salvaguardia del sistema idrotermale	pag. 69
	10.1 Parametri idrogeologici e idrochimici del SIM	pag. 69
	10.2 Rete di monitoraggio	pag. 71
	10.3 Protocollo di monitoraggio	pag. 74
11.	Conclusioni	pag. 76
	Riferimenti citati	pag. 78

Indice delle Figure

Fig. 1 Carta idrogeologica semplificata del sistema idrogeologico Cimino-Vico con l'ubicazione dell'area idrotermale di Viterbo (da Baiocchi et al. 2012).

Fig. 2 Modello idrogeologico concettuale dell'area idrotermale di Viterbo (da Baiocchi et al. 2013).

Fig. 3 Piezometria dell'acquifero superficiale SA (a) e dell'acquifero termale TA (b) (da Baiocchi et al. 2013).

Fig. 4 Diagramma di Piper delle acque dell'area idrotermale di Viterbo (da Baiocchi et al. 2012).

Fig. 5 Relazione $\delta^{18}\text{O} - \delta^2\text{H}$ per le acque termali (*ts* e *tw*), acque di alcuni pozzi e sorgenti del SA (*w* e *s*), acque di alcuni torrenti (*st*) e del Lago di Vico, confrontata con le rette delle acque meteoriche, globale (GMWL) e dell'Italia centrale (CIMWL) (da Baiocchi et al. 2012).

Fig. 6 Relazione $\delta^{18}\text{O} - \delta^{34}\text{S}$ del solfato per le acque termali (*ts* e *tw*), acque di alcuni pozzi e sorgenti del SA (*w* e *s*) e delle acque di alcuni torrenti (*st*) (da Baiocchi et al. 2012).

Fig. 7 Mappe del rapporto Q_t/Q_i , usando la concentrazione del solfato (a) e dello stronzio (b) (da Baiocchi et al. 2012).

Fig. 8 Andamento dell'abbassamento piezometrico (Δh) e della temperatura delle acque (*T*) in due pozzi del SA W1 (a) e W2 (b) (da Baiocchi et al. 2013).

Fig. 9 Risultati della prova di pompaggio condotta sul pozzo PTT1 (Pozzo Paliano 2): (a) ubicazione dei pozzi monitorati; (b) andamento dell'abbassamento piezometrico nel pozzo di pompaggio ed in due piezometri e della variazione di portata nel Pozzo S. Sisto; (c) andamento della temperatura (*T*) e della conducibilità elettrica delle acque (*CE*) dei pozzi monitorati (da Baiocchi et al. 2012).

Fig. 10 Risultati della prova di pompaggio condotta sul pozzo PTT2 (Pozzo Oasi): andamento dell'abbassamento piezometrico (Δh) e della temperatura delle acque (*T*) nel pozzo di pompaggio del TA e della temperatura (T_{SA}) nel piezometro di osservazione del SA (da Baiocchi et al. 2013).

Fig. 11 Risultati della prova di pompaggio condotta sul pozzo PTT3 (Pozzo Bagnaccio): (a) andamento dell'abbassamento piezometrico nel pozzo di pompaggio e della variazione di portata delle Sorgenti Bagnaccio; (b) andamento della temperatura (*T*) e della conducibilità elettrica delle acque (*CE*) del pozzo di pompaggio (da Baiocchi et al. 2012).

Fig. 12 Schema del secondo e terzo modello di flusso e condizioni al contorno (da Baiocchi et al. 2013).

Fig. 13 Griglia del modello di flusso e di trasporto del calore e condizioni al contorno (da Baiocchi et al. 2013).

Fig. 14 Risultati di diversi scenari di pompaggio dal TA e dal SA ottenuti dal modello di flusso e di trasporto del calore (da Baiocchi et al. 2013).

Fig. 15 Ubicazione delle misure di portata in alveo (con numero identificativo di Tab. 2).

Fig. 16 Confronto tra la portata della Sorgente Bullicame e le precipitazioni mensili della stazione meteorologica di Viterbo, nel periodo 2005-2009.

Fig. 17 Superfici utilizzate per la costruzione del modello e relativo errore standard per il *bottom* del *layer* 1 (a) e il *bottom* del *layer* 2 (b).

Fig. 18 Distribuzione delle zone di ricarica (RCH).

Fig. 19 Distribuzione iniziale delle conducibilità idraulica dei *layer* 1 (a), *layer* 2 (b) e *layer* 3 (c).

Fig. 20 Griglia del modello (a); *boundary condition* e tracce delle sezioni per il *layer* 1 (b), *layer* 2 (c) *layer* 3 (d); Sezione S-N (Colonna 56) (e); Sezione O-E (Riga 213) (f).

Fig. 21 Distribuzione dei *pilot points* nei 3 *layer*.

Fig. 22 Distribuzione della conducibilità idraulica orizzontale e verticale del *layer* 1.

Fig. 23 Distribuzione della conducibilità idraulica orizzontale e verticale del *layer* 2.

Fig. 24 Distribuzione della conducibilità idraulica orizzontale e verticale del *layer* 3.

Fig. 25 Piezometrie simulate per il *layer* 3 nei diversi periodi: SP 1 (a), SP 2 (b), SP 3 (c), SP 4 (d).

Fig. 26 Piezometria simulata per il *layer* 1 relativamente allo SP 4.

Fig. 27 Correlazione tra altezze piezometriche (m s.l.m.) simulate e misurate (**a**) e tra flussi (m^3/s) simulati e misurati (**b**).

Fig. 28 Piezometria del *layer* 1 nello SP 5 (**a**) e del *layer* 3 nello SP 5 (**b**).

Fig. 29 Relazioni tra conducibilità elettrica e temperatura (**a**) e tra conducibilità elettrica e contenuto di solfato (**b**) delle acque sotterranee del sistema di Viterbo (da Regione Lazio 2008-2010).

Fig. 30 *Flow-chart* dei programmi proposti relativamente alla gestione (POU), salvaguardia (MTI) e monitoraggio (SIM) delle acque termali del sistema idrogeologico di Viterbo.

Indice delle Tabelle

Tab. 1 Portata (Q), profondità del livello piezometrico (PI), temperatura (T), conducibilità elettrica (CE) e pH delle venute idrotermali misurate nel periodo marzo-maggio 2016 (nm: non misurabile; * prelievi non continui).

Tab. 2 Portata in alveo (Qa), temperatura (T), conducibilità elettrica (CE) e pH misurate nei torrenti nel periodo marzo-maggio 2016 (nm: non misurabile).

Tab. 3 Confronto delle portate delle venute di acqua termale da sorgenti e pozzi in L/s dagli anni '50 ad oggi.

Tab. 4 Ricarica (RCH) complessiva per *stress period* (SP).

Tab. 5 Valori di conducibilità idraulica orizzontale (Kh) e verticale (Kv) iniziali assegnati al modello.

Tab. 6 Statistiche descrittive degli scarti tra valori simulati e osservati.

Tab. 7 Bilancio del modello per lo SP 4.

Tab. 8 Portate di prelievo dal TA ipotizzate nello SP 5 per i pozzi delle diverse concessioni.

Tab. 9 Portate in uscita dalle emergenze idrotermali simulate nello SP 5.

Tab. 10 Bilancio del modello per lo scenario di prelievo simulato dallo SP 5.

Tab. 11 Ipotesi di prelievo dai pozzi di acque termali del POU.

Tab. 12 Rete di monitoraggio delle acque termali e strumentazione richiesta.

Tab. 13 Set analitico per le analisi trimestrali delle acque termali captate.

Indice delle Tavole fuori testo

TAVOLA 1 Carta delle manifestazioni idrotermali nel contesto idrogeologico del sistema di Viterbo

TAVOLA 2 Carta delle aree di salvaguardia e della rete di monitoraggio

Elenco simboli e abbreviazioni

CE: conducibilità elettrica delle acque
DEM: Modello Digitale del Terreno
D_s: deflusso residuale in uscita dal sistema
D₀: portata naturale in uscita
GHB: *general head boundary*
GIS: Sistema Informativo Territoriale
K_h: conducibilità idraulica orizzontale
K_v: conducibilità idraulica verticale
MTI: Misure di Tutela delle risorse idrotermali
Nf: numero di Fourier
PI: profondità del livello piezometrico dal p.c.
POU: Programma Operativo di Utilizzo delle risorse idrotermali
PP: *pilot points*
Q: portata
Q_a: portata misurata in alveo
Q_i: flusso totale di SA
Q_{ms}: *basin maximum sustainable yield*
Q_{SA}: flussi da TA verso SA
Q_{sus}: portata di prelievo sostenibile
Q_{rs}: portata residua da sorgenti termali
Q_t: componente del flusso di TA in SA
Q_{tr}: uscite sotterranee verso i torrenti
RCH: ricarica
RMSE: radice dell'errore quadratico medio
R₀: ricarica naturale
S: coefficiente di immagazzinamento
s: acque dell'acquifero superficiale
SA: acquifero superficiale
SIM: Sistema di Monitoraggio
SP: *stress period*
st: acque di torrente
T: temperatura dell'acqua
t: tempo del pompaggio
TA: acquifero termale
t_c: costante tempo dell'acquifero
T_r: trasmissività
t_{ms}: tempo per raggiungere lo stato stazionario
ts: acque termali da sorgenti
tw: acque termali da pozzi
w: acque dell'acquifero superficiale
x: distanza dal centro di pompaggio del limite di cattura
ZPI: Zona di Protezione Immediata
ZR: Zona di Rispetto delle acque termali in concessione
ZT: Zona di Tutela assoluta delle sorgenti termali non in concessione
δ: differenza del contenuto isotopico rispetto allo standard, rapportata allo standard
ΔD: variazione delle uscite naturali
Δh: abbassamento piezometrico
ΔR: variazione della ricarica naturale
ΔR_{ms}: variazione della massima quantità di ricarica del bacino
Δt: intervallo di tempo
ΔV: variazione del volume di immagazzinamento
ΔV_{ms}: variazione del *maximum sustenance storage*

1. Introduzione

Questo studio è stato elaborato nell'ambito della Contratto di Ricerca tra la Regione Lazio e l'Università degli Studi della Tuscia – Dipartimento di Scienze Ecologiche e Biologiche (Decreto Rettoriale n. 561/2016 del 17.6.2016).

Obiettivi dello studio sono:

- a) l'elaborazione di ipotesi operative di utilizzo delle risorse idrotermali dell'area di Viterbo, considerando la potenzialità globale del sistema, i delicati equilibri idrogeologici esistenti e gli utilizzatori delle risorse;
- b) la progettazione di un sistema di monitoraggio della quantità e della qualità delle risorse, funzionale alla tutela e salvaguardia del sistema idrogeologico ed al controllo dei prelievi dal sistema idrotermale.

Per raggiungere gli obiettivi sono stati considerati i risultati degli studi pregressi condotti sul tema dal Dipartimento di Scienze Ecologiche e Biologiche (DEB) e di nuove indagini ed analisi. Queste ultime hanno incluso:

- una nuova campagna di misura della portata delle emergenze di acque termali del sistema;
- una nuova campagna di rilievo delle principali caratteristiche chimico-fisiche delle acque termali del sistema;
- una nuova campagna di misura della portata dei torrenti che attraversano l'area idrotermale;
- un nuovo modello matematico del flusso del sistema.

Sulla base delle precedenti conoscenze e dei nuovi aggiornamenti ed approfondimenti, vengono proposti:

- il possibile programma di utilizzo operativo dei prelievi di acque termali dal sistema;
- l'aggiornamento della zonazione delle aree di salvaguardia delle risorse idrotermali;
- il sistema di monitoraggio e controllo del sistema idrogeologico.

I risultati dello studio sono sintetizzati nella presente relazione e nelle due tavole allegate.

2. Contesto geologico e idrogeologico

L'area idrotermale di Viterbo ricade nella regione vulcanica del Cimino e del Vico (Fig. 1), formatasi nel Pleistocene, dopo le fasi distensive post-orogeniche ed i locali processi di subsidenza legati al sollevamento degli Appennini.

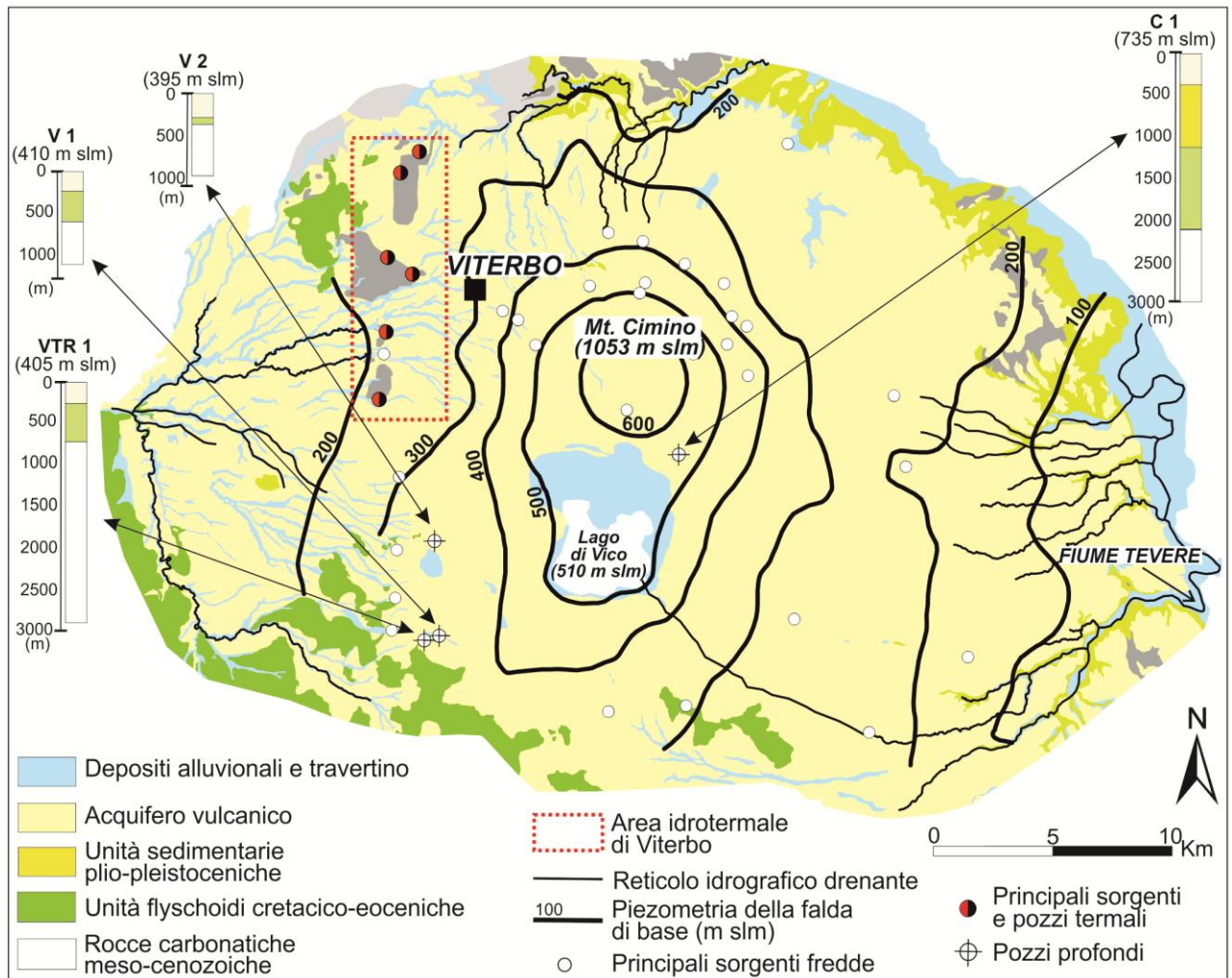


Fig. 1 Carta idrogeologica semplificata del sistema idrogeologico Cimino-Vico con l'ubicazione dell'area idrotermale di Viterbo (da Baiocchi et al. 2012).

Il complesso vulcanico Cimino, attivo tra 1.35 e 0.95 Ma, ha prodotto diversi domi lavici latitici e olivinlatitici e colate piroclastiche riodacitiche da un sistema di fratture orientato NO-SE (Sollevanti 1983; Lardini e Nappi 1987; Cimarelli e De Rita 2006). Il complesso vulcanico di Vico è costituito da uno strato-vulcano con caldera centrale che ospita il Lago di Vico. Questo complesso vulcanico è stato attivo soprattutto tra 419 e 95 ka e si è sviluppato lungo un graben allungato NO-SE, all'intersezione con un sistema di fratture orientate NE-

SO. Lo strato-vulcano ha alternato fasi esplosive ed effusive, dando origine a diversi depositi piroclastici e colate laviche di natura fonolitica, tefritica e trachitica (Locardi 1965; Mattias e Ventriglia 1970; Sollevanti 1983; Bertagnini e Sbrana 1986).

Il substrato delle vulcaniti è composto da sequenze carbonatiche meso-cenozoiche e depositi torbiditici silicoclastici cretacico-eocenici (Fig. 1), interessati da piegamenti e sovrascorrimenti. Sistemi di faglie distensive orientate NO-SE e NE-SO dividono il substrato delle vulcaniti dando luogo a strutture a horst e graben. Depositi marini e continentali neogenici e quaternari riempiono i bassi strutturali delle unità meso-cenozoiche (Baldi et al. 1974; Funicello et al. 1977; La Torre et al. 1981; Buonasorte et al. 1987; Barberi et al. 1994). L'assottigliamento della litosfera ed i relativi processi magmatici che hanno interessato la fascia pre-appenninica hanno caratterizzato la regione vulcanica con un'importante anomalia del flusso di calore che raggiunge valori compresi generalmente tra 200 e 300 mW/m² (Calamai et al. 1976; Mongelli et al. 1989; Cataldi et al. 1995; Della Vedova et al. 2001). L'area vulcanica è interessata inoltre da notevoli emissioni endogene di CO₂ (Marini e Chiodini 1994; Chiodini et al. 1995; Gambardella et al. 2004), che controllano la genesi dei depositi di travertino affioranti estesamente nella zona idrotermale di Viterbo (Minissale e Duchi 1988; Duchi e Minissale 1995; Minissale et al. 2002).

Le vulcaniti del Cimino e del Vico costituiscono un sistema idrogeologico che è delimitato dalle unità sedimentarie plio-pleistoceniche e dalle unità flyschoidi cretacico-eoceniche (Fig. 1). Il sistema comprende un acquifero di base continuo e più acquiferi sospesi discontinui (Boni et al. 1986; Capelli et al. 2005; Baiocchi et al. 2006). I principali recapiti della circolazione idrica sotterranea del sistema sono i corsi d'acqua e le sorgenti; esistono anche flussi verso l'acquifero alluvionale della valle del Fiume Tevere. La resa media in acque sotterranee del sistema è stata stimata tra 5 e 7 m³/s (Baiocchi et al. 2006).

Nel settore nord-occidentale del sistema idrogeologico, ad Ovest di Viterbo, affiorano da sorgenti e sono captate mediante pozzi acque termali (Fig. 1). Le emergenze idrotermali sono ubicate in una fascia allungata secondo la direzione N-S, di circa 20 km di lunghezza e circa 5 km di larghezza, che definisce l'area idrotermale di Viterbo.

3. Modello idrogeologico concettuale dell'area idrotermale di Viterbo

Il modello idrogeologico concettuale dell'area idrotermale di Viterbo è stato oggetto di diverse ricerche. Di seguito si riporta una sintesi delle conoscenze sul tema, facendo riferimento ai principali studi basati su dati sperimentali originali e relativamente più recenti. Una prima ipotesi è stata formulata da Calamai et al. (1976), che spiegava le acque termali di Viterbo come il risultato di una circolazione idrica profonda nel substrato carbonatico delle vulcaniti del Cimino e Vico. Le aree di ricarica della circolazione idrica profonda erano identificate principalmente nei massicci carbonatici degli Appennini ed in secondo luogo negli alti morfologici dei complessi vulcanici del Cimino e Vico. Piscopo et al. (2006) hanno evidenziato la presenza di un sistema acquifero multistrato, con una circolazione idrica sotterranea relativamente poco profonda all'interno delle vulcaniti ed una più profonda nel serbatoio carbonatico, interagenti nella zona ad Ovest di Viterbo essendo il serbatoio carbonatico localmente sollevato (Fig. 1), ridotto lo spessore del semipermeabile, peraltro interessato da fratture e faglie, ed elevato il gradiente geotermico. Sia la circolazione idrica sotterranea relativamente più superficiale che quella responsabile delle acque termali sono state ipotizzate avere la stessa area di ricarica, sulla base dei dati piezometrici e delle analisi isotopiche delle acque.

Una recente revisione del modello concettuale idrogeologico dell'area idrotermale di Viterbo è stato sviluppato utilizzando i risultati di nuove indagini idrogeologiche, idrochimiche e isotopiche condotte nell'ambito dello studio elaborato dall'Università degli Studi della Tuscia per conto della Regione Lazio (2008-2010), successivamente pubblicati da Baiocchi et al. (2012; 2013). Le indagini e le valutazioni condotte nel corso di queste ultime ricerche hanno compreso:

- la ricostruzione idrostratigrafica dell'area idrotermale, mediante l'interpretazione di 62 log stratigrafici;
- misure di portata nei periodi agosto-ottobre 2008, maggio-giugno 2009 e settembre 2010 per 15 sorgenti termali, 9 sorgenti di acque fredde, 7 pozzi termali artesiani e 28 sezioni in alveo;
- misure del livello piezometrico, temperatura e conducibilità elettrica dei pozzi termali nei periodi agosto-ottobre 2008 e maggio-giugno 2009;

- misure del livello piezometrico, temperatura e conducibilità elettrica delle acque in circa 130 pozzi con profondità da 5 a 150 m ricadenti nell'area idrotermale;
- elaborazione dei risultati di 5 prove di emungimento e di 6 prove a gradini di portata su pozzi dell'acquifero vulcanico relativamente più superficiale;
- esecuzione di 2 nuove prove di pompaggio dell'acquifero vulcanico, per monitorare anche la variazione della temperatura e/o conducibilità elettrica dell'acqua emunta;
- esecuzione di 4 prove di pompaggio su pozzi termali, comprendenti anche il monitoraggio delle caratteristiche chimiche delle acque nel corso del pompaggio;
- analisi chimiche delle acque campionate da 52 tra sorgenti e pozzi nel giugno 2009, con determinazione del contenuto dei gas CO₂ e H₂S per 12 acque termali;
- analisi degli isotopi stabili dell'acqua e del solfato disciolto su 24 campioni rappresentativi;
- analisi del contenuto di trizio per 15 campioni rappresentativi;
- stima della potenzialità in acque sotterranee dell'area idrotermale attraverso un approccio integrato idrogeologico e idrochimico.

Dai risultati di questi studi risulta che nell'area idrotermale di Viterbo, nei primi 100-200 m di profondità, è presente un primo acquifero (denominato in seguito SA), ospitato principalmente nelle vulcaniti pleistoceniche che coprono l'area di studio, ed un secondo acquifero, caratterizzato da acque termali (denominato in seguito TA), che è principalmente contenuto nelle vulcaniti al contatto con le unità flyschoidi del substrato o all'interno della porzione superiore delle stesse unità flyschoidi. I due acquiferi sono generalmente separati da uno strato a bassa permeabilità di vulcaniti o flysch, avente uno spessore da pochi metri ad alcune decine di metri. A profondità maggiori, un significativo spessore di unità flyschoidi a bassa permeabilità, ma localmente fratturato e fagliato, separa il TA dal serbatoio carbonatico profondo contenente i fluidi caldi (Fig. 2).

Il SA, libero o semiconfinato, ha uno spessore da pochi metri ad alcune decine di metri ed è caratterizzato da una superficie piezometrica che segue grosso modo la topografia, raccordandosi a quella del sistema idrogeologico vulcanico del Cimino-Vico. Nell'area di studio, il SA è alimentato dall'infiltrazione diretta e lateralmente dai flussi sotterranei del sistema del Cimino-Vico, come osservabile dall'andamento delle linee equipotenziali in Figura 3 e dal confronto con la morfologia piezometrica riportata in Figura 1. Dalla ricostruzione piezometrica del SA (Fig. 3) è anche osservabile una direzione di flusso dall'area di studio verso Ovest. I locali recapiti della circolazione idrica sotterranea del SA

sono i torrenti e qualche sorgente (Fig. 3). La trasmissività dell'acquifero varia tra 10^{-5} a 10^{-2} m^2/s , il coefficiente di immagazzinamento tra 10^{-3} e 10^{-2} (Baiocchi et al. 2012).

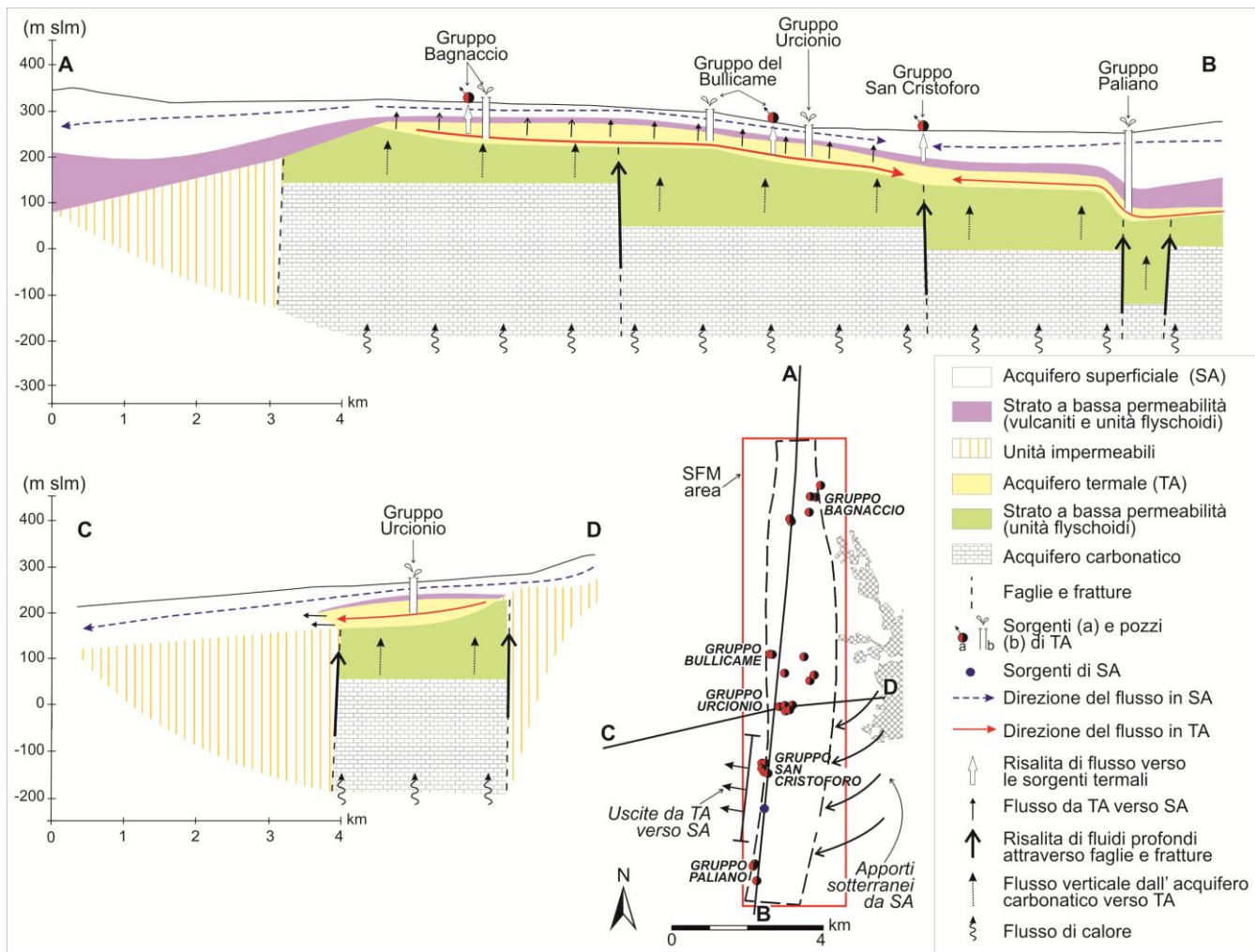


Fig. 2 Modello idrogeologico concettuale dell'area idrotermale di Viterbo (da Baiocchi et al. 2013).

Le acque del SA sono generalmente caratterizzate da basse temperature (meno di 23 °C) e salinità (generalmente inferiore a 800 mg/L), sono del tipo bicarbonato-alcalino-terroso o bicarbonato-alcalino (Fig. 4) e da leggermente acide a leggermente alcaline. Nel SA sono presenti anche acque dovute al mescolamento tra acque fredde, tipiche della circolazione idrica sotterranea nel sistema idrogeologico vulcanico del Cimino-Vico, e le acque termali, in particolare nei settori settentrionale e centrale della area idrotermale (Baiocchi et al. 2012). Il secondo acquifero, il TA, si ritrova fino a 200 m di profondità (Fig. 2) ed è caratterizzato da acque termali. L'acquifero confinato ha uno spessore che varia tra 50 e 80 m ed è caratterizzato da due direzioni principali di flusso che convergono verso Ovest (Fig. 3). I dati disponibili sulle proprietà idrogeologiche indicano valori di trasmissività compresi tra 10^{-2} e 10^{-4} m^2/s e del coefficiente di immagazzinamento dell'ordine di 10^{-4} .

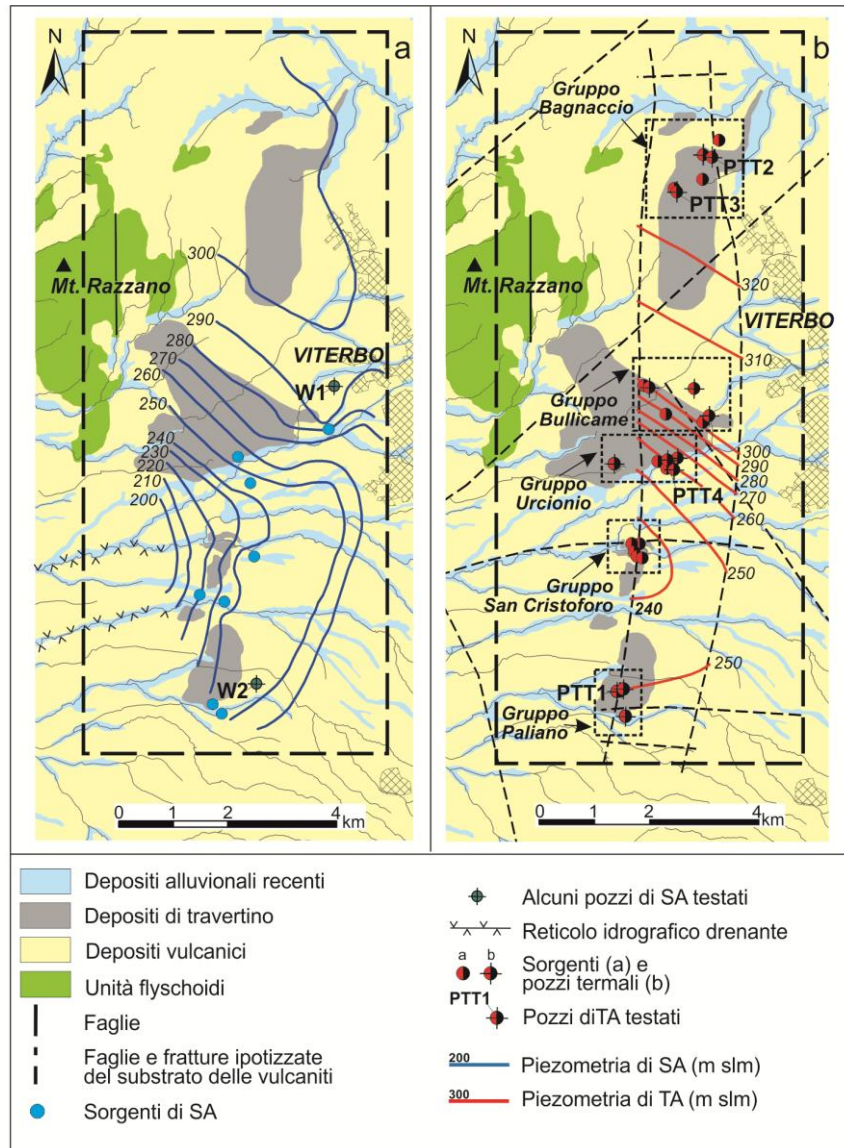


Fig. 3 Piezometria dell'acquifero superficiale SA (a) e dell'acquifero termale TA (b) (da Baiocchi et al. 2013).

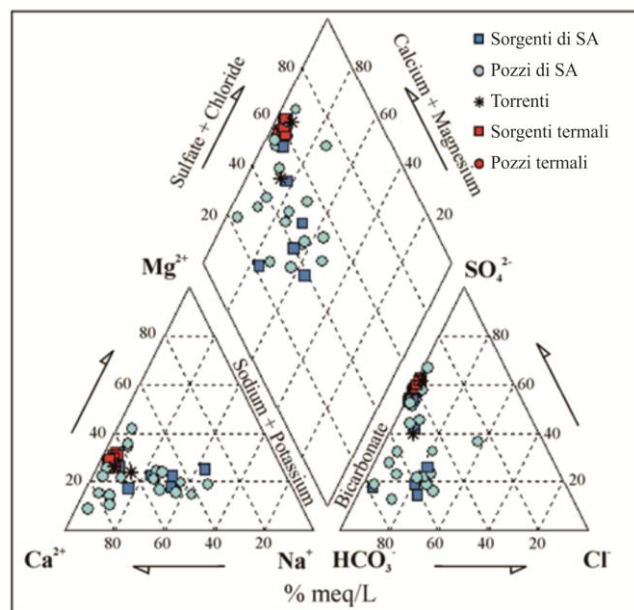


Fig. 4 Diagramma di Piper delle acque dell'area idrotermale di Viterbo (da Baiocchi et al. 2012).

La potenzialità dell'acquifero TA nell'area in esame, stimata utilizzando un approccio integrato idrogeologico e idrochimico, è di almeno 170 L/s. L'acquifero ha recapito principalmente in sorgenti e pozzi termali e secondariamente nel reticolo idrografico. Esistono anche flussi verticali diffusi dal TA verso il SA, attraverso l'aquitard che li separa, in accordo con il gradiente verticale esistente tra i due acquiferi ed i mescolamenti evidenziati dai dati chimici. Esistono inoltre flussi laterali dal TA verso il SA al margine occidentale dell'area idrotermale, se si considerano le caratteristiche idrostratigrafiche, idrochimiche ed idrauliche di quest'ultimo settore (Baiocchi et al. 2012).

Le acque del TA sono leggermente acide, di tipo solfato-calciche (Fig. 4), hanno un elevato contenuto di gas disciolti (CO_2 e H_2S), sono relativamente più saline (da 2000 a 4000 mg/L) ed hanno indici di saturazione positivi rispetto alla calcite, aragonite e dolomite. La temperatura delle acque varia tra 40 e 62 °C (Piscopo et al. 2006; Angelone et al. 2009; Baiocchi et al. 2012). In particolare, il contenuto di gas disciolti misurati in 12 acque termali varia tra 300 e 600 mg/L e 7 e 30 mg/L, rispettivamente per CO_2 e H_2S (Baiocchi et al. 2012). Un recente studio di Cinti et al. (2014) conferma il precedente quadro idrogeochimico, riportando per le acque termali dell'area di interesse una temperatura tra 41 e 63 °C, alti valori della pressione di CO_2 (da 0.1 a 0.5 bar) e la CO_2 quale gas disciolto più abbondante (da 3.4 a 14 mmol/L).

I valori degli isotopi stabili dell'acqua ($\delta^{18}\text{O}$ e $\delta^2\text{H}$), determinati per le acque termali e per un numero significativo di acque del SA, ricadono in un limitato intervallo sulle rette dell'acqua meteorica (Fig. 5), indicando che le aree di ricarica delle acque termali di Viterbo sono le stesse di quelle del SA, individuata nella zona compresa tra la caldera di Vico ed i Monti Cimini (Piscopo et al. 2006; Baiocchi et al. 2012). Alle stesse conclusioni arriva lo studio di Cinti et al. (2014), analizzando gli stessi isotopi stabili dell'acqua.

I risultati delle analisi degli isotopi stabili del solfato disciolto ($\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ e $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$), determinati per le acque termali e per un numero significativo di acque del SA (Fig. 6), indicano per le acque termali interazioni con fluidi circolanti in evaporiti triassiche che costituiscono la base del substrato carbonatico profondo. Dal diagramma di Figura 6, si può vedere che il contenuto isotopico di $\delta^{34}\text{S}_{\text{SO}_4}$ e $\delta^{18}\text{O}_{\text{SO}_4}$ delle acque del SA indica fenomeni di mescolamento con quelle del TA (Baiocchi et al. 2012).

Dalle determinazioni del trizio (12 relative ad acque termali e 3 relative ad acque del SA), risultano concentrazioni dell'isotopo radioattivo che variavano da 2 a 11 UT, riconducibili ad una ricarica avente una componente di acque recenti, cioè post-1952. Le acque termali in

particolare hanno una concentrazione di trizio più bassa (da 2 a 5 UT) rispetto a quelle del SA (da 8 a 11 UT) indicando una differenza nel tempo di transito di circa 10 anni tra le acque del SA e del TA (Baiocchi et al. 2012).

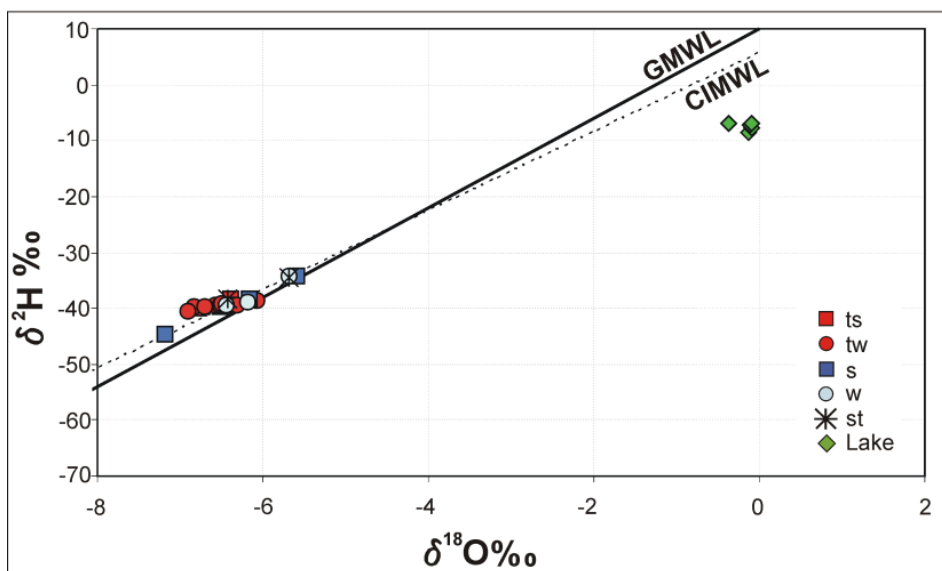


Fig. 5 Relazione $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$ per le acque termali (ts e tw), acque di alcuni pozzi e sorgenti del SA (w e s), acque di alcuni torrenti (st) e del Lago di Vico, confrontata con le rette delle acque meteoriche, globale (GMWL) e dell'Italia centrale (CIMWL) (da Baiocchi et al. 2012).

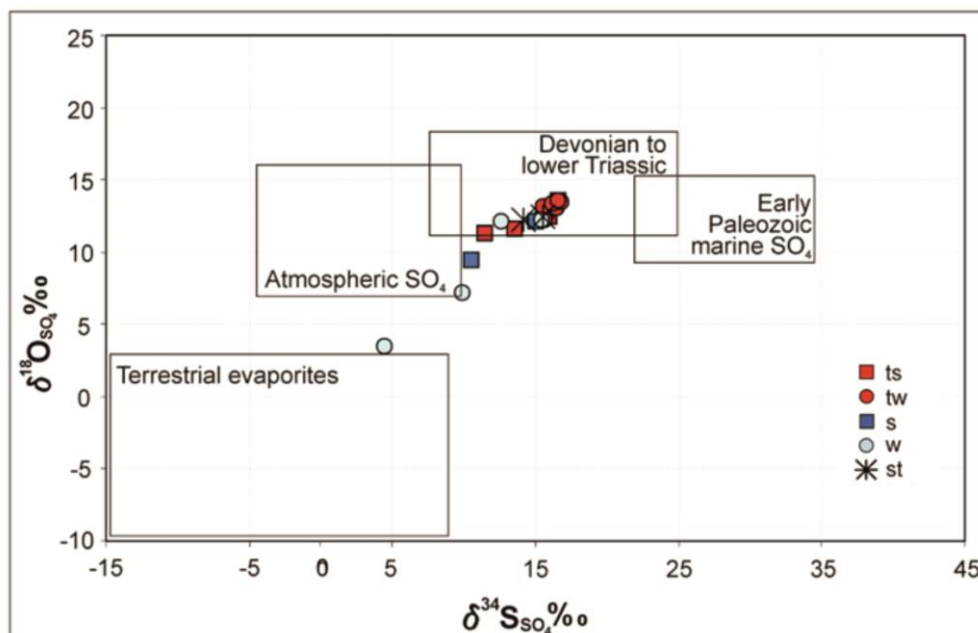


Fig. 6 Relazione $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^{34}\text{S}$ del solfato per le acque termali (ts e tw), acque di alcuni pozzi e sorgenti del SA (w e s) e delle acque di alcuni torrenti (st) (da Baiocchi et al. 2012).

Da queste ultime evidenze e da quanto già noto in bibliografia, a maggiore profondità, le rocce carbonatiche costituiscono l'acquifero confinato profondo separato dal TA da uno strato a bassa permeabilità di unità flyschoidi, di spessore variabile da 80 a 200 m.

L'acquifero carbonatico profondo può essere considerato il principale serbatoio che ricarica il TA attraverso le faglie e le fratture del substrato sedimentario, grazie alle condizioni di carico idraulico e di flusso di calore (Fig. 2).

Lo strato a bassa permeabilità che divide il SA dal TA determina il gradiente verticale ed il flusso tra i due acquiferi sovrapposti relativamente più superficiali, e quindi anche la percentuale di mescolamento tra le acque fredde e termali nel SA. Il profilo geochimico delle acque del SA sembra essere particolarmente significativo per determinare le percentuali di mescolamento tra le acque del SA con quelle termali. I contenuti di solfato e stronzio sono stati usati per determinare la frazione di acqua termale nelle acque del SA utilizzando il rapporto Q_t/Q_i , dove Q_t è la componente del flusso di TA e Q_i è il flusso totale di SA. Come mostrato in Figura 7, il rapporto Q_t/Q_i è compreso tra 0.1 e 0.6 nei settori centrale e settentrionale dell'area idrotermale e nella parte occidentale oltre l'area idrotermale stessa. Il mescolamento dell'acqua del SA con acqua termale è anche confermato dai risultati degli isotopi stabili del solfato disciolto, precedentemente citati (Baiocchi et al. 2012).

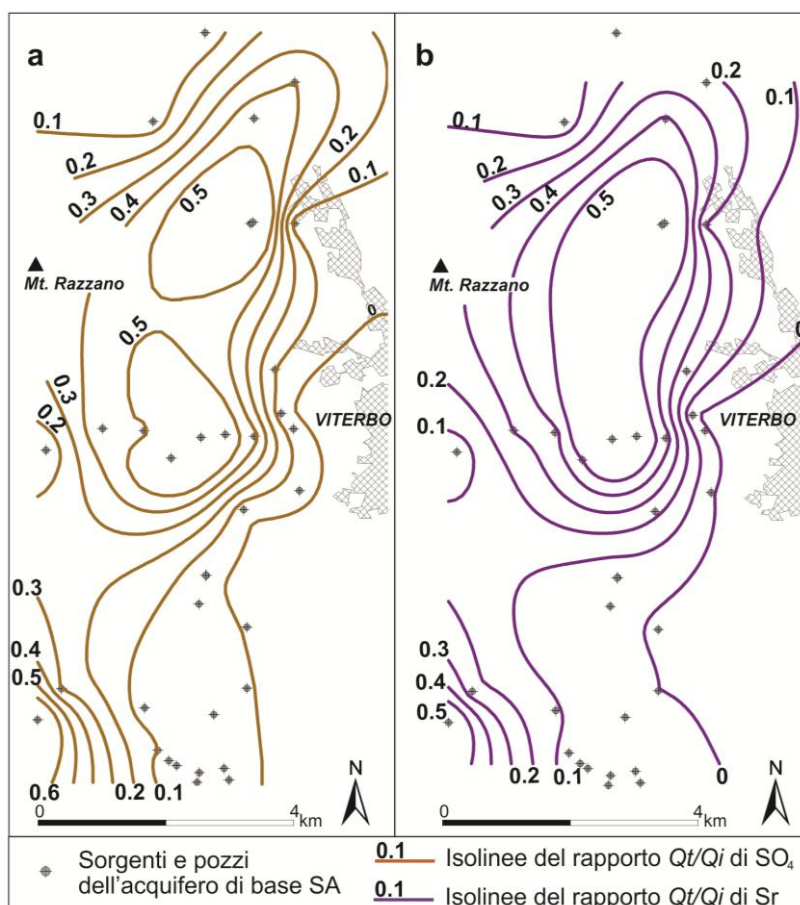


Fig. 7 Mappe del rapporto Q_t/Q_i , usando la concentrazione del solfato (a) e dello stronzio (b) (da Baiocchi et al. 2012).

Altre informazioni sul comportamento dei due acquiferi sovrapposti, SA e TA, sono state ottenute dalle prove di pompaggio condotte nell'area idrotermale (Baiocchi et al. 2012; Baiocchi e Lotti 2012). Ad esempio, due pozzi che interessano soltanto il SA hanno mostrato andamenti diversi della variazione della temperatura delle acque emunte nel corso della prova. Un pozzo ubicato vicino ad una sorgente termale nel settore centrale (W1 in Fig. 3a) ha mostrato un aumento di temperatura dell'acqua di 0.8 °C dopo 25 ore di pompaggio (Fig. 8a). Un altro pozzo del SA ubicato in prossimità di emergenze idrotermali nel settore meridionale (W2 in Fig. 3a) ha mostrato un più basso aumento di temperatura dell'acqua (0.4 °C) dopo 17 giorni di pompaggio (Fig. 8b).

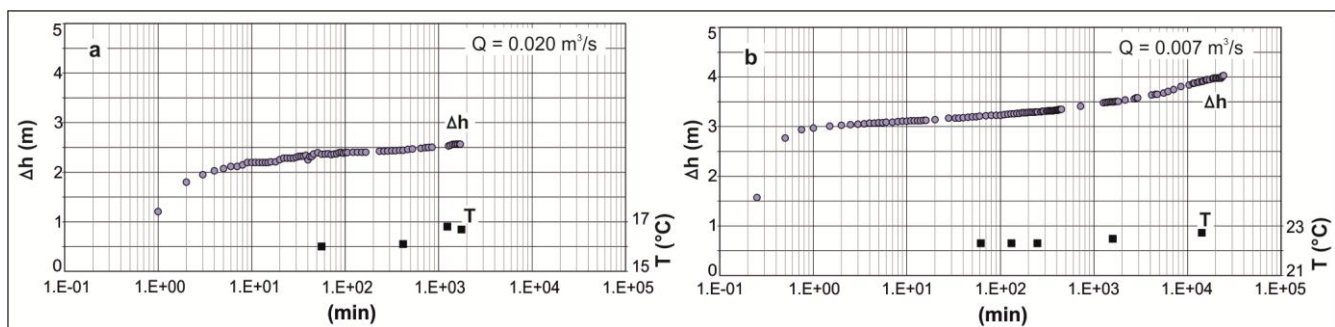


Fig. 8 Andamento dell'abbassamento piezometrico (Δh) e della temperatura delle acque (T) in due pozzi del SA W1 (a) e W2 (b) (da Baiocchi et al. 2013).

Altri riscontri sul modello idrogeologico concettuale precedentemente delineato derivano dalle prove di pompaggio effettuate su pozzi termali (Baiocchi et al. 2012).

Una prima prova, eseguita a portata costante per 68 ore nel settore meridionale (PTT1 in Fig. 3b, Pozzo Paliano 2) su un pozzo di 125 m di profondità, filtrante il flysch fratturato e con monitoraggio dei pozzi e delle sorgenti presenti nell'intorno, ha evidenziato ridotti abbassamenti piezometrici e variazioni di temperatura nel limitrofo piezometro del SA ed il completo annullamento della portata di un pozzo artesiano del TA posto a circa 360 m, il Pozzo S. Sisto (Fig. 9). Una seconda prova condotta a portata variabile in un pozzo di 42 m di profondità nel settore settentrionale, filtrante il flysch fratturato (PTT2 in Fig. 3b, Pozzo Oasi) e con monitoraggio anche in un piezometro del SA, ha evidenziato una diminuzione di circa 3 °C della temperatura dell'acqua nel piezometro del SA (Fig. 10). Una terza prova condotta nel settore settentrionale (PTT3 in Fig. 3b, Pozzo Bagnaccio,) a portata costante per 48 ore, misurando la pressione del pozzo artesiano, ha evidenziato il recupero immediato del valore iniziale della pressione alla chiusura del pozzo e la significativa variazione della portata delle sorgenti termali poste a 78 m dal pozzo (Fig. 11). Una quarta prova eseguita nella zona

centrale (PTT4 in Fig. 3b, Pozzi Pozzetto-Uliveto), chiudendo il pozzo artesiano Pozzetto, funzionante normalmente sei giorni a settimana a portata costante, ha evidenziato l'erogazione di acqua termale dal secondo pozzo, il Pozzo Uliveto, posto a 129 m di distanza, avente normalmente il livello idrico a qualche metro dal piano campagna; entrambi i pozzi catturano le acque termali dai depositi piroclastici e dai travertini.

Questi risultati, oltre ad aver permesso la determinazione dei parametri idrogeologici del TA, evidenziano la continuità del TA, almeno alla scala delle centinaia di metri, e le differenze di interazione lungo la verticale dei due acquiferi sovrapposti nel settore meridionale rispetto a quello settentrionale.

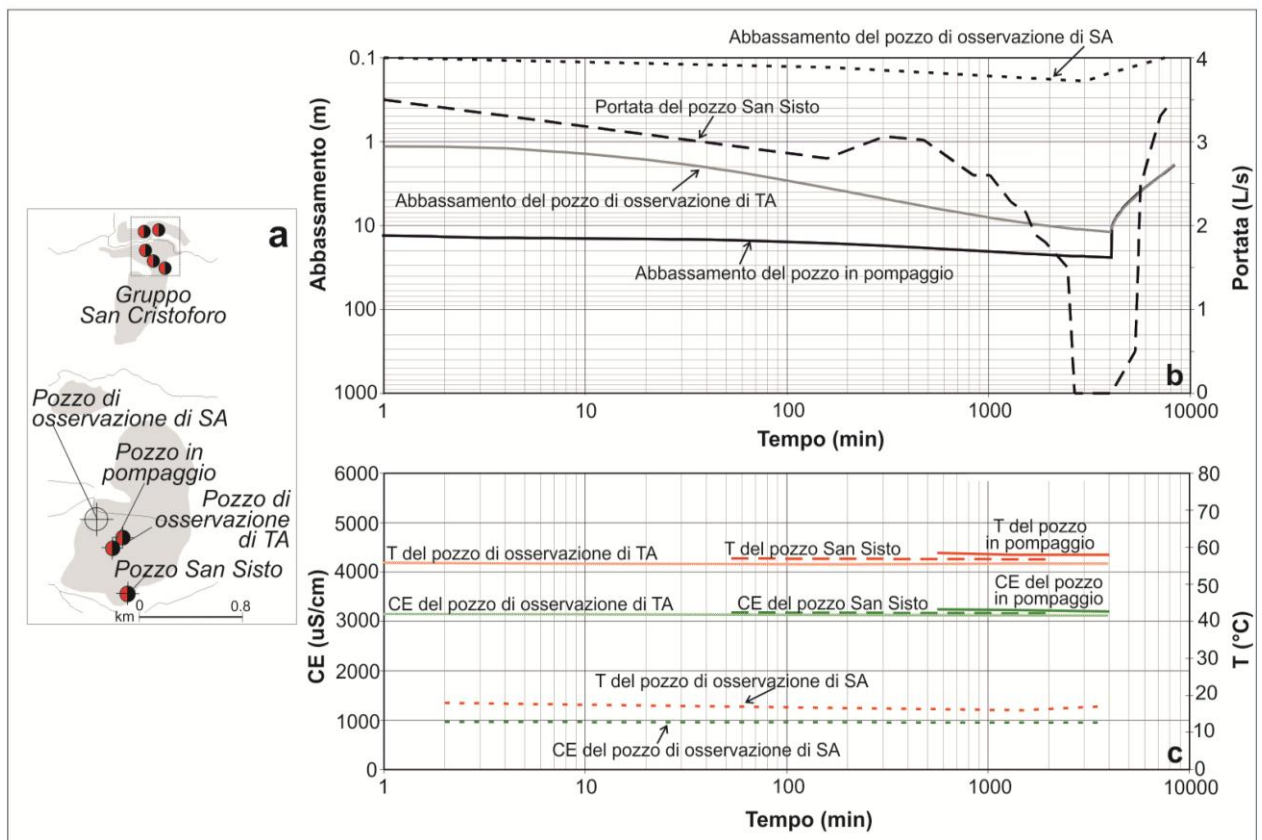


Fig. 9 Risultati della prova di pompaggio condotta sul pozzo PTT1 (Pozzo Paliano 2): (a) ubicazione dei pozzi monitorati; (b) andamento dell'abbassamento piezometrico nel pozzo di pompaggio ed in due piezometri e della variazione di portata nel Pozzo S. Sisto; (c) andamento della temperatura (T) e della conducibilità elettrica delle acque (CE) dei pozzi monitorati (da Baiocchi et al. 2012).

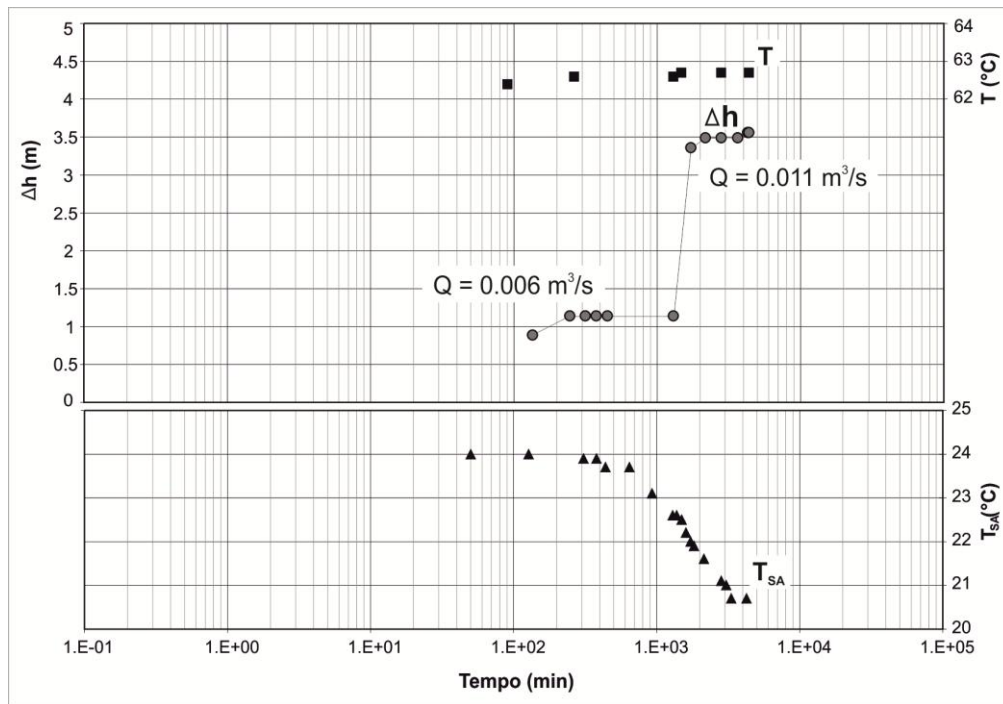


Fig. 10 Risultati della prova di pompaggio condotta sul pozzo PTT2 (Pozzo Oasi): andamento dell'abbassamento piezometrico (Δh) e della temperatura delle acque (T) nel pozzo di pompaggio del TA e della temperatura (T_{SA}) nel piezometro di osservazione del SA (da Baiocchi et al. 2013).

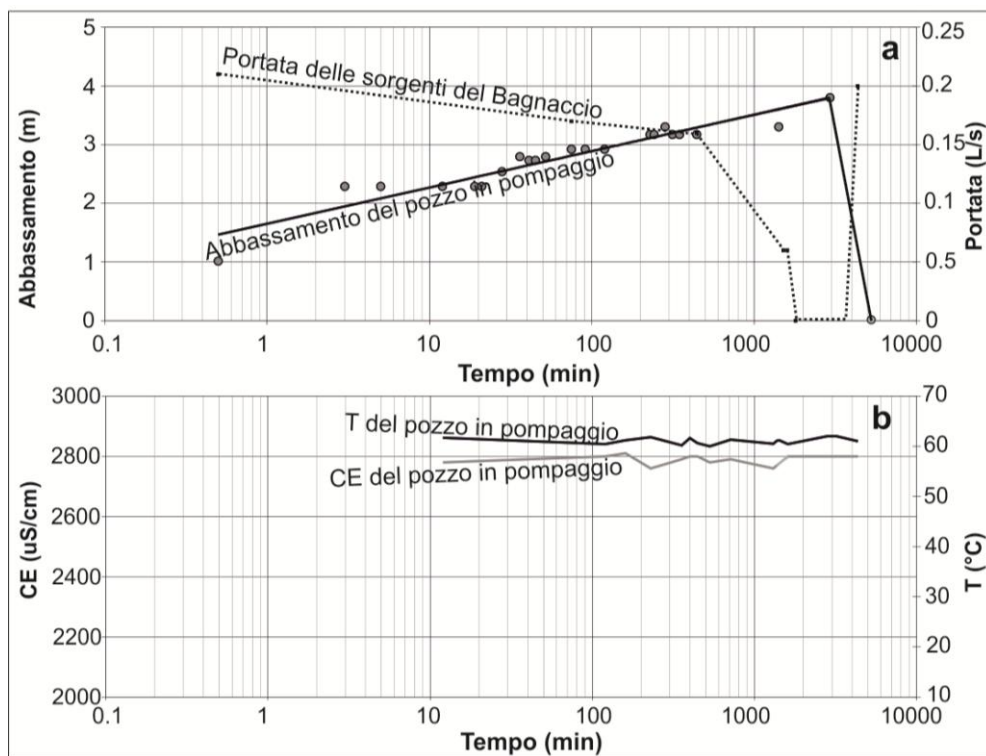


Fig. 11 Risultati della prova di pompaggio condotta sul pozzo PTT3 (Pozzo Bagnaccio): (a) andamento dell'abbassamento piezometrico nel pozzo di pompaggio e della variazione di portata delle Sorgenti Bagnaccio; (b) andamento della temperatura (T) e della conducibilità elettrica delle acque (CE) del pozzo di pompaggio (da Baiocchi et al. 2012).

4. Modelli numerici dell'area idrotermale di Viterbo

L'area idrotermale di Viterbo è stata oggetto di modellazione numerica, sia nel corso delle ricerche condotte dall'Università degli Studi della Tuscia per la Regione Lazio (2008-2010) sia successivamente (Baiocchi et al. 2013). Una sintesi dei risultati di queste modellazioni è riportata di seguito.

I primi due modelli di flusso dell'area idrotermale sono stati implementati al fine di ottenere maggiori informazioni sullo schema di circolazione idrica sotterranea dell'area, con particolare riferimento all'acquifero utilizzato per le concessioni di acque termali, per verificarne la sua potenzialità e per simulare possibili scenari futuri di gestione delle acque termali (Regione Lazio 2008-2010). Partendo dal modello idrogeologico concettuale dell'area idrotermale di Viterbo, sono state condotte simulazioni numeriche in regime stazionario, semplificando lo schema di circolazione idrica sotterranea. Questi modelli sono stati implementati alle differenze finite utilizzando il codice MODFLOW (McDonald e Harbaugh 1988), attraverso l'interfaccia grafica Processing Modflow 5.3 (Chiang e Kinzelbach 2001).

In particolare, il secondo modello elaborato per la Regione Lazio (2008-2010) ha riguardato un'area di circa 35 km², attraverso una griglia costituita da 33 colonne e 135 righe con maglie di diverse dimensioni, infittita in corrispondenza dei punti d'acqua termale (50×50 m o 50×100 m), più grandi altrove (100×100 m). Per la discretizzazione verticale è stato considerato un modello composto da due *layer*, il primo corrispondente con il SA libero ed il secondo con il TA confinato. Per semplificare la geometria verticale, i due strati sono stati simulati con uno spessore medio derivante da quelli risultanti dalle sezioni idrostratigrafiche. Lo schema di circolazione idrica sotterranea riproduce la ricarica dal basso del TA, il flusso al suo interno, il flusso all'interno del SA, gli scambi idrici tra i due acquiferi sovrapposti e le uscite dal TA attraverso pozzi e sorgenti (Fig. 12).

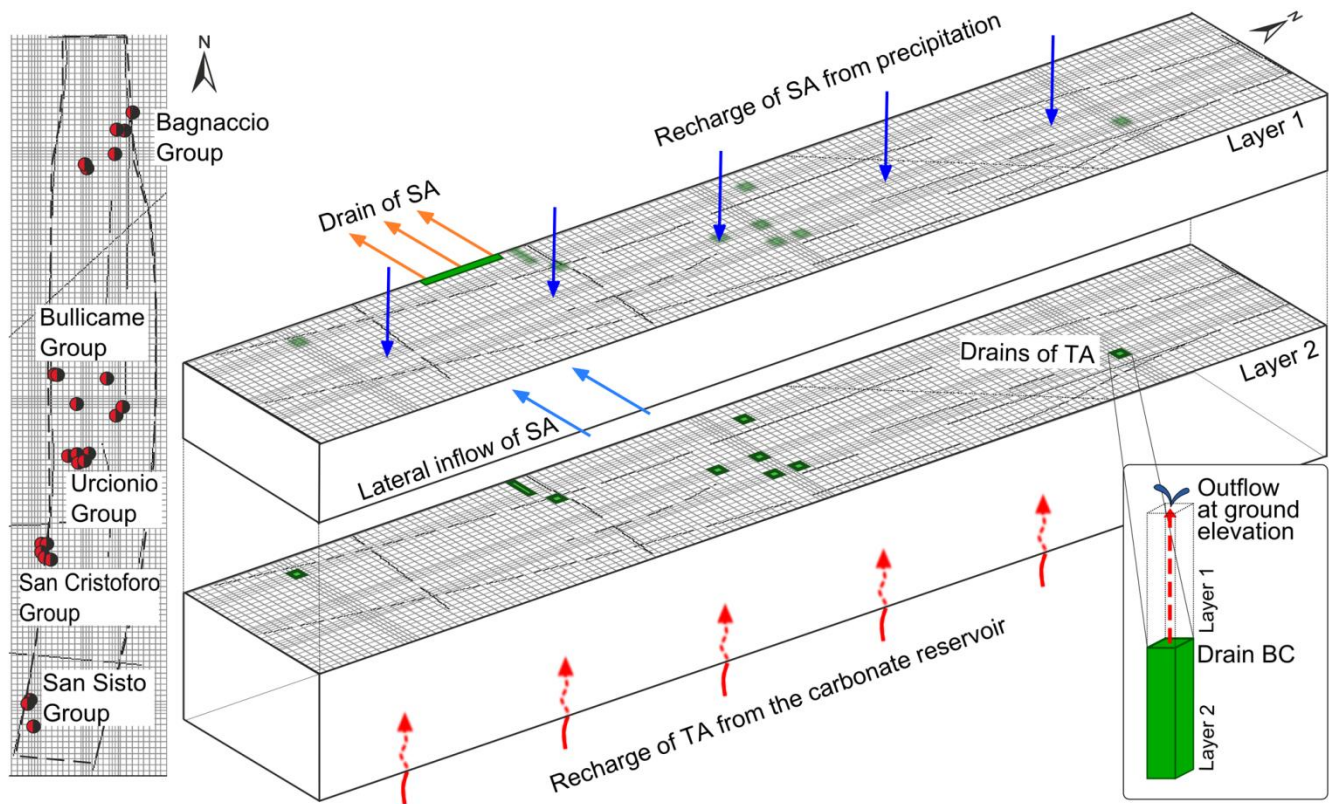


Fig. 12 Schema del secondo e terzo modello di flusso e condizioni al contorno (da Baiocchi et al. 2013).

Per le condizioni al contorno, sono state adottate condizioni di flusso nullo per i confini laterali dei due *layer*, tranne che nel settore meridionale, dove per il primo *layer* è presente un flusso laterale in ingresso e in uscita. All'interno delle celle rappresentanti le aree di emergenza delle acque termali, è stata adottata la condizione *drain*, condizione definita dalla quota del dreno e dalla sua conduttanza idraulica. La condizione *drain* è stata utilizzata anche per rappresentare i flussi in uscita dal sistema verso il SA nel settore occidentale (Fig. 12). La ricarica complessiva del SA di 360 L/s è stata distribuita uniformemente sul primo *layer*, considerando 260 L/s per infiltrazione efficace e 100 L/s per l'alimentazione laterale. Per quanto riguarda l'acquifero termale, la ricarica dal basso è stata simulata assegnando flussi in entrata per un totale di circa 150 L/s, uniformemente distribuiti alla base del secondo *layer*.

I valori dei carichi idraulici inseriti nel modello e della conducibilità idraulica iniziale sono stati ricavati dalle misure piezometriche e dai valori di trasmissività ricavati dalle prove di emungimento, questi ultimi sono stati variati in fase di calibrazione. La valutazione dei flussi verticali di scambio tra TA e SA è stata condotta in fase di calibrazione, attraverso la funzione *leakance*. La calibrazione del modello effettuata con il metodo *trial and error* è stata basata sulla piezometria e sulla portata misurate per i due acquiferi.

La calibrazione del modello ha portato a stimare valori di conducibilità idraulica verticale e orizzontale, rispettivamente, di 1×10^{-5} e 2×10^{-4} m/s per il SA e valori di 1×10^{-5} e 3×10^{-6} - 1×10^{-5} m/s per il TA. I risultati del modello calibrato in termini di bilancio indicano per il SA una ricarica da infiltrazione diretta e laterale di 344 L/s, una ricarica dal TA di 111 L/s ed una uscita complessiva di 455 L/s; per il TA, la ricarica dal basso risulta di 176 L/s e le uscite dalle emergenze idrotermali (pozzi e sorgenti) di 65 L/s.

Il terzo modello di flusso (Baiocchi et al. 2013) è stato elaborato partendo dal precedente, considerando le stesse caratteristiche geometriche per la discretizzazione orizzontale e verticale e le stesse condizioni al contorno (Fig. 12). È stata invece ridotta rispetto al precedente la ricarica del SA sulla base di nuove valutazioni del bilancio idrologico (Baiocchi et al. 2012), attribuendo una ricarica per infiltrazione diretta di 220 L/s incrementata di 100 L/s nel settore meridionale per simulare i flussi in entrata lateralmente.

Questo modello è stato calibrato sia con il metodo *trial and error* sia con il codice PEST (Doherty et al. 1994) variando, come nel precedente, i valori della conducibilità idraulica, la *leakance*, la conduttanza dei *drain* e la ricarica. In questo caso, per la calibrazione del modello, oltre a considerare le portate ed i carichi idraulici misurati, sono state utilizzate per controllo anche le percentuali di mescolamento tra acque del TA con quelle del SA ricavate dalle analisi chimiche (cfr. par. 3), al fine di distinguere le aree con differente valore del flusso verticale tra i due acquiferi sovrapposti.

Una soddisfacente calibrazione è avvenuta per valori della conducibilità idraulica compresa tra 3×10^{-5} – 2×10^{-4} m/s per il SA e tra 6×10^{-6} – 8×10^{-5} m/s per il TA e valori della *leakance* verticale tra 0 e 2.5×10^{-10} 1/s. In termini di bilancio, per il sistema modellato, è risultata una ricarica di SA di 300 L/s e di TA di 199 L/s. Le uscite dal sistema sono risultate di 74 L/s verso le sorgenti e pozzi termali, di 30 L/s verso i torrenti e di 399 L/s verso l'esterno del sistema (flussi questi ultimi concentrati soprattutto al limite occidentale del sistema). I flussi dal TA verso il SA sono risultati di 89 L/s e per il 75 % concentrati nei settori centrale e settentrionale del sistema.

Un quarto modello in stazionario del flusso e del trasporto di calore è stato elaborato per una zona rappresentativa del settore settentrionale dell'area idrotermale (Baiocchi et al. 2013), cioè quello che dal precedente modello risultava più interessante per i rapporti di scambio idrico tra i due acquiferi sovrapposti (Fig. 13). Questo modello è stato elaborato agli elementi finiti con il codice FEFLOW (Diersch 2002), che permette di simulare il flusso accoppiato al trasporto di calore (Diersch e Kolditz 1998). È stato trascurato il trasporto

chimico e l'influenza dei gas, è stata invece considerata la dipendenza del flusso dalla viscosità e dalla densità del fluido. Il modello ha riguardato una zona di circa 5 km² per 120 m di profondità, includendo 9 layer rappresentanti il SA (layer 1-4), il TA (layer 6-9) e l'aquitard tra essi (layer 5). La griglia formata da 22310 nodi e 38592 elementi è stata raffinata in corrispondenza del pozzo termale di produzione del TA presente nella zona modellata (Fig. 13).

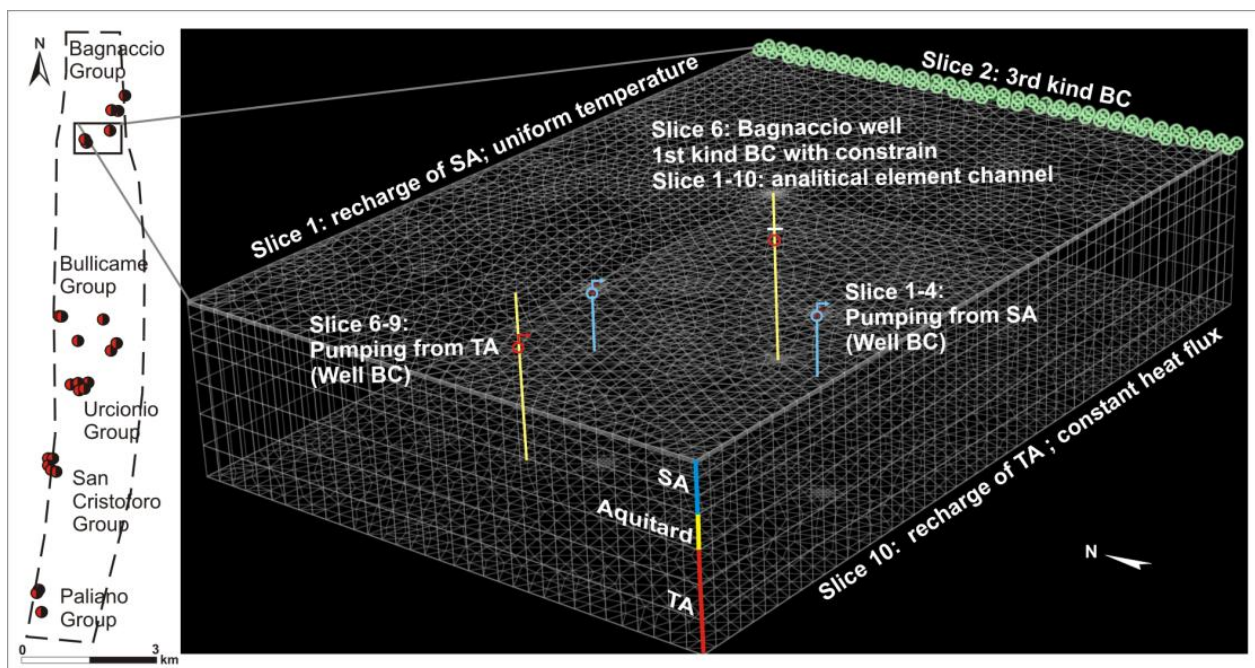


Fig. 13 Griglia del modello di flusso e di trasporto del calore e condizioni al contorno (da Baiocchi et al. 2013).

Per la ricarica del SA è stata considerata l'infiltrazione diretta e quella dal TA attraverso l'aquitard, per le uscite dal SA sono stati considerati i locali flussi verso Est, trascurati alla scala delle precedenti modellazioni. Per la ricarica del TA sono stati considerati flussi dal basso, per le uscite i flussi verso il SA e verso il pozzo termale presente nella zona modellata. Ogni unità idrostratigrafica (SA, TA e aquitard) è stata considerata omogenea per le proprietà fisiche, idrauliche e termiche, ricavate sulla base di dati sito-specifici e di letteratura (Baiocchi et al. 2013). La temperatura dell'acqua assegnata al top del sistema è stata di 18 °C, il flusso di calore costante alla base del sistema è stato assegnato su base bibliografica (Calamai et al. 1976; Cataldi et al. 1995).

La calibrazione del modello è stata effettuata in stazionario in base ai valori di carico idraulico e di temperatura nei SA e TA e della percentuale di mescolamento delle acque del SA con quelle del TA. Con questo modello sono state condotte due simulazioni. Una prima simulazione relativa all'assenza del pozzo termale ed una seconda con produzione dal pozzo

termale alla portata di 40 L/s, quella cioè testata nel corso della prova di pompaggio condotta nella zona (cfr. par. 3).

Il modello è stato successivamente utilizzato per simulare diversi scenari di pompaggio dai due acquiferi. I risultati più significativi, riportati in Figura 14, sono i seguenti (Baiocchi et al. 2013):

- a) un incremento del pompaggio dal TA ha evidenziato il decremento della portata dal pozzo termale esistente, dei flussi dal TA verso il SA e della temperatura delle acque del TA;
- b) un incremento del pompaggio dal SA ha evidenziato una riduzione della portata dal pozzo termale esistente e un incremento dei flussi dal TA verso il SA.

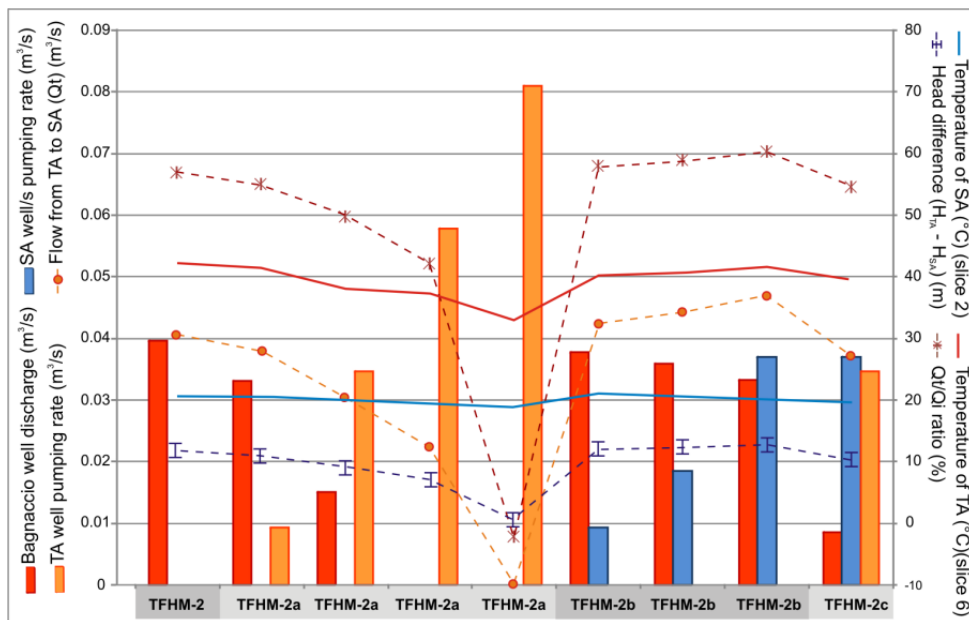


Fig. 14 Risultati di diversi scenari di pompaggio dal TA e dal SA ottenuti dal modello di flusso e di trasporto del calore (da Baiocchi et al. 2013).

5. Nuova campagna di misure, andamento della portata delle acque termali nel tempo e prelievi dall'acquifero superficiale

Nel corso del presente studio sono state effettuate nuove misure di portata delle emergenze di acque termali e delle loro principali caratteristiche chimico-fisiche. I nuovi rilievi, condotti nel periodo marzo-giugno 2016, hanno compreso anche la misura del livello piezometrico di alcuni dei principali pozzi termali e della portata in alcune sezioni d'alveo, significative dei rapporti acque sotterranee – acque superficiali. Sono stati inoltre acquisiti, presso il Settore VIII della Provincia di Viterbo, i dati disponibili relativi ai pozzi ricadenti nell'area in esame e nel suo immediato intorno.

Sulla base dei nuovi dati e di quelli già disponibili nel *data base* del DEB, è stato possibile rivisitare ed aggiornare il quadro di riferimento relativo ai flussi di acque termali, naturali e prelevate, nell'area di Viterbo. Di seguito sono riportati i risultati delle nuove indagini, dettagliando dapprima i risultati delle nuove misure, sintetizzando poi l'evoluzione storica delle portate di acque termali ed esaminando infine i prelievi idrici dall'acquifero superficiale (SA). La sintesi dei risultati sull'aggiornamento del censimento dei punti d'acqua dell'area di interesse è riportata nella Tavola 1.

5.1 Campagna di misure del 2016

Le nuove misure di portata sono state effettuate con le stesse tecniche (recipienti tarati e mulinello idrometrico a guado) e cercando, laddove possibile, di utilizzare le stesse sezioni dei precedenti rilievi (Regione Lazio 2008-2010). In alcuni casi, i punti o le modalità di emergenza delle acque termali sono variati rispetto alla situazione dei precedenti rilievi, a causa di nuovi condizionamenti dei pozzi termali o a causa di interventi locali. In particolare:

- il Pozzo Paliano 1 ed il Pozzetto delle Terme dei Papi, che erogano spontaneamente, sono stati attrezzati con misuratore di portata;
- la Sorgente Zitelle è scomparsa nel 2013 dal sito originario di affioramento ed è affiorata in un limitrofo terreno privato con la stessa portata e le stesse caratteristiche chimico-fisiche delle acque;
- la Sorgente Bullicame ha modificato il suo regime in seguito a lavori condotti nel novembre 2014 nel Pozzo S. Valentino, che hanno significativamente aumentato la portata di quest'ultimo a discapito del Bullicame;

- il Pozzo Bagnaccio eroga attualmente 2 L/s;
- è stato realizzato nel 2014 un nuovo pozzo in località Bacucco.

Nel corso di questi indagini è stato anche possibile rilevare ulteriori venute di acque termali, non riportate nel precedente censimento (Regione Lazio 2008-2010).

L'ubicazione dei punti di misura è riportata nella Tavola 1. Nella Tabella 1 sono riportate le portate e i parametri chimico-fisici (temperatura, conducibilità elettrica e pH) misurati per le venute idrotermali localizzate, cioè quelle da sorgenti e da pozzi artesiani. In qualche caso, sono riportati i valori della profondità del livello piezometrico, come per esempio per i pozzi Bacucco, Uliveto, Gigliola, S. Albino e Paliano 2, trattandosi di pozzi non artesiani.

Il totale delle portate da sorgenti e da pozzi artesiani termali, misurato nel periodo marzo-maggio 2016, è di circa 65 L/s (escludendo dalla somma i prelievi occasionali dalla Sorgente S. Caterina, dichiarati dal gestore, ed il Pozzo Mercatone, non misurabile ma attivo). Nel 2015, alla stazione meteorologica di Viterbo (ubicata a 340 m s.l.m.) sono stati misurati di 675 mm di precipitazioni ed una temperatura media dell'aria di 15.9 °C.

Nello stesso periodo del 2016 sono state rilevate le portate in alveo, considerando sezioni del reticolo idrografico poste a monte ed a valle dell'area idrotermale. Nella Figura 15 sono indicate le sezioni misurate, in Tabella 2 sono riportati i valori misurati di portata e, nei casi ritenuti significativi, dei parametri chimico-fisici (temperatura, conducibilità elettrica e pH) delle acque superficiali. Tutte le misure sono state effettuate in periodo non piovoso.

Nel settore settentrionale, il Torrente M. Razzano non presentando deflussi superficiali nel periodo di misura (sezione 11 in Fig. 15 e Tab. 2), può essere ritenuto privo di incrementi di portata in alveo. I limitati deflussi misurati nelle sezioni del Torrente delle Pantane (alcuni litri al secondo) sono da attribuire agli scarichi delle sorgenti termali e dei laghetti presenti nella zona, riconducibili questi ultimi ad affioramenti della falda del SA (sezioni 3-6 in Fig. 15 e Tab. 2). L'unico corso d'acqua con significativi deflussi in questo settore è il Torrente Valle dell'Umeda (sezioni 10-13 in Fig. 15 e Tab. 2), tuttavia la sua portata nella sezione di monte è da ricondurre a quella del gruppo sorgivo delle Zitelle, come peraltro evidenziano anche i valori di conducibilità elettrica e temperatura (sezione 13 in Fig. 15 e Tab. 2). Nell'ultimo tratto, invece, risultano incrementi di portata per circa 17 L/s, riconducibili presumibilmente ad apporti dal SA (tra le sezioni 12 e 13 in Fig. 15 e Tab. 2).

Tab. 1 Portata (*Q*), profondità del livello piezometrico (*PI*), temperatura (*T*), conducibilità elettrica (*CE*) e *pH* delle venute idrotermali misurate nel periodo marzo-maggio 2016 (nm: non misurabile; * prelievi non continui).

ID	Gruppo di sorgenti o pozzi	<i>Q</i> (L/s)	<i>PI</i> (m dal pc)	<i>T</i> (°C)	<i>CE</i> (μS/cm)	<i>pH</i>	Data
1	<u>Gruppo Cassia Nord-Martana</u>						
2	Pozzo Bacucco	0	3.22	41.8			07.05.2016
3	Pozzo Mercatone						nm
4	Pozzo Danti	0.63		52.0	4670	6.8	21.03.2016
5	Pozzetto Sondaggio Sismico I	0.10		47.7	4400	6.7	21.03.2016
	Pozzo Oasi	0.30		59.0	5270	6.7	21.03.2016
6	<u>Gruppo Bagnaccio</u>						
7	Laghetto Bagnaccio	2.12		30.1	3100	6.6	08.04.2016
8-9-10	Sorgenti Pantano	0.20			3000		04.04.2016
11	Sorgenti Bagnaccio	0.59		60.8	4960	6.4	21.03.2016
	Pozzo Bagnaccio	2.05		60.9	5200	6.6	21.03.2016
12	Sorgenti Casale Montarozzo	2.00		59.0	5270	6.7	21.03.2016
13	<u>Gruppo Zitelle</u>						
14	Sorgente Casale Bussete	0.50		62.1	4600	6.9	20.05.2016
15	Sorgente Bussete	0.30		57.9	4800	7.4	20.05.2016
16-17	Sorgente Piscinella Polidori	0.30		27.4	2670	7.6	20.05.2016
	Sorgente Zitelle-Pozzo Zitelle	13.92		61.0	5360	6.8	05.04.2016
18	<u>Gruppo Bullicame</u>						
19-20	Pozzo S. Albino	0	2.08	32.5			05.04.2016
21	Sorgenti Piazza d'Arme						nm
22	Pozzo S. Valentino	9.10		57.6	4580	6.6	05.04.2016
23	Sorgente Piscine Carletti	2.17		54.5	4530	6.7	21.03.2016
	Sorgente Bullicame	2.40		57.5	4400	6.8	05.04.2016
24	<u>Gruppo Valle dell'Urcionio</u>						
25	Pozzo Uliveto	0	1.76	45.0			05.04.2016
26	Pozzo Gigliola	0	1.90	53.5			22.09.2016
27	Pozzo Pozzetto	17.9		52.8	4460	6.7	05.04.2016
28	Sorgente S. Caterina	5.0*		30.7	2250	7.5	05.04.2016
29	Sorgente Bagno del Papa	<0.01		34.5	3190	7.0	05.04.2016
30	Sorgente Magnesiacca	0					05.04.2016
	Pozzo Cacciabella	0					nm
31-32	<u>Gruppo Asinello</u>						
33-34	Sorgenti dell'Asinello	0.20		53.2	5400	6.4	30.03.2016
	Sorgenti S. Cristoforo	0.40		50.4	5150	6.3	30.03.2016
35	<u>Gruppo Bagnarello-Palano</u>						
36	Pozzo Palano 1	8.70		58.4	5560	6.7	04.04.2016
37	Pozzo Palano 2	0	5.72				04.04.2016
	Pozzo S. Sisto	1.03		57.9	5600	7.2	02.05.2016

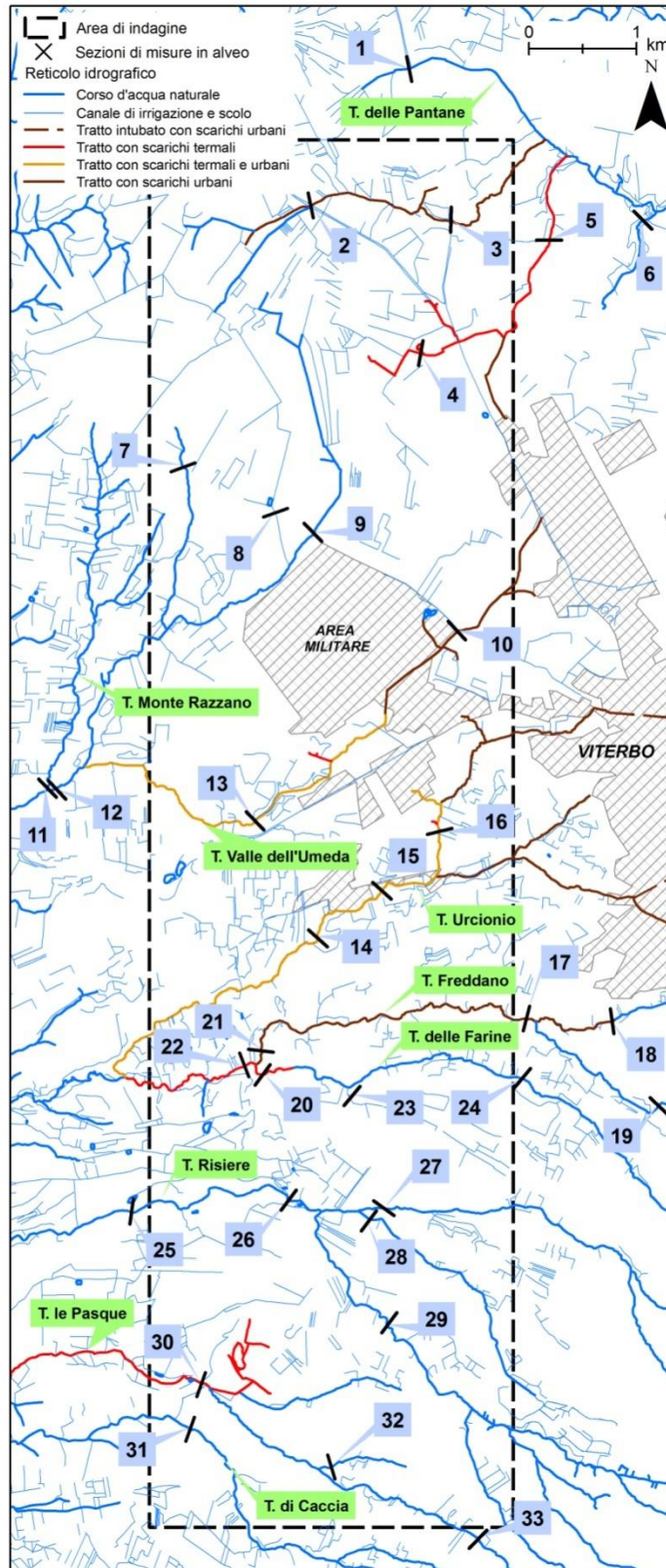


Fig. 15 Ubicazione delle misure di portata in alveo (con numero identificativo di Tab. 2).

Tab. 2 Portata in alveo (Qa), temperatura (T), conducibilità elettrica (CE) e pH misurate nei torrenti nel periodo marzo-maggio 2016 (nm: non misurabile).

ID	Nome	Qa (L/s)	Data	T (°C)	CE ($\mu S/cm$)	pH
1	Torrente delle Pantane	secco	04.04.2016	nm		
2	Torrente Valle Castellane	secco	04.04.2016	nm		
3	Torrente Valle Castellane	2.5	04.04.2016	nm		
4	Canale del Laghetto del Bagnaccio	5.3	08.04.2016	nm		
5	Torrente del Bagnaccio	3	04.04.2016	nm		
6	Torrente del Paradiso	2 - 2.5	04.04.2016	14.4	790	5.1
7	Torrente della Guardiola	secco	05.04.2016	nm		
8	Torrente tributario del T. Valore	1.6	05.04.2016	20.9	1685	8.6
9	Torrente tributario del T. Valore	secco	05.04.2016	nm		
10	Torrente Valle Umeda	0.4	05.04.2016	19.4	1235	8.8
11	Torrente Monte Razzano	secco	20.04.2016	nm		
12	Torrente Valle Umeda + Torrente Valore	38.2	20.04.2016	15.0	960	8.5
13	Torrente Valle Umeda	20.5	11.04.2016	25.3	2190	8.6
14	Torrente Urcionio	280	23.06.2016	nm		
15	Torrente Urcionio	354	23.06.2016	nm		
16	Torrente Madonna degli Occhi Bianchi	5.5	10.04.2016	32.1	2910	7.9
17	Torrente dell'Olmo	9.8	11.04.2016	11.0	284	8.6
18	Torrente dell'Elce	1.5	20.04.2016	nm		
19	Torrente dell'Olmo	<0.5	20.04.2016	nm		
20	Torrente delle Farine	21.5	30.03.2016	22.0	2200	7.8
21	Torrente Freddano	71.3	20.04.2016	17.0	690	8.6
22	Torrente Freddano + Torrente Farine	88.7	20.04.2016	17.1	760	8.5
23	Torrente delle Farine	3	13.04.2016	15.2	380	8.9
24	Torrente delle Farine	<1	13.04.2016	nm		
25	Torrente Risiere	70	20.04.2016	nm		
26	Torrente Risiere	40.7	27.05.2016	18.3	294	8.7
27	Torrente Sambuchete	<0.2	20.04.2016	nm		
28	Torrente Ponte dei Cetti	secco	20.04.2016	nm		
29	Torrente del Merdaiolo	secco	02.05.2016	nm		
30	Torrente le Pasque	<10	02.05.2016	nm		
31	Torrente Caccia	5	02.05.2016	nm		
32	Torrente tributario del Caccialepre	secco	02.05.2016	nm		
33	Torrente Caccialepre	secco	02.05.2016	nm		

Nel settore centrale, il Torrente Urcionio, nel tratto di monte (Torrente Madonna degli Occhi Bianchi), riceve lo scarico delle acque termali del gruppo del Bullicame (sezione 16 in Fig. 15 e Tab. 2). Proseguendo verso valle, il Torrente Urcionio, misurato a monte delle ex Terme INPS (quindi, a valle del depuratore di Viterbo; sezione 15 in Fig. 15 e Tab. 2) ed a valle delle Terme dei Papi (sezione 14 in Fig. 15 e Tab. 2), ha evidenziato un decremento di portata che, considerando gli errori di misura insiti nel metodo utilizzato (mulinello idrometrico, ma con argano da ponte), indicano insignificanti rapporti tra le acque superficiali e sotterranee.

Nel settore centrale, il Torrente Freddano mostra un significativo incremento di portata (circa 60 L/s) nell'attraversare l'area idrotermale (sezioni 17 e 21 in Fig. 15 e Tab. 2); inoltre, temperatura e conducibilità elettrica delle acque superficiali passano da 11 °C e 284 $\mu S/cm$,

nella sezione di monte (sezione 17 in Fig. 15 e Tab. 2), a 17 °C e 690 $\mu\text{S}/\text{cm}$, nella sezione di valle (sezione 21 in Fig. 15 e Tab. 2). Anche il Torrente delle Farine, che confluisce poi nel Torrente Freddano, evidenzia incrementi di portata in alveo nell'attraversare l'area idrotermale, per circa 19 L/s; inoltre, a monte ed a valle del gruppo sorgivo Asinello e San Cristoforo, temperatura e conducibilità elettrica delle acque superficiali passano da 15 °C e 380 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (sezione 23 in Fig. 15 e Tab. 2) a 22 °C e 2020 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (sezione 20 in Fig. 15 e Tab. 2). Questi elementi fanno presupporre che gli incrementi di portata in alveo dei torrenti Freddano e Farine siano in parte riconducibili ad acque termali, come peraltro verificato in precedenza (Regione Lazio 2008-2010; Baiocchi et al. 2012).

Nel settore meridionale, i torrenti Le Pasque e Caccia hanno presentato scarsi deflussi superficiali nel periodo di misura (sezioni 30 e 31 in Fig. 15 e Tab. 2), in parte riconducibili agli scarichi delle sorgenti del SA e del TA della zona Bagnarello - S. Sisto. Il Torrente Risiere, che scorre parallelamente a Sud dei torrenti Freddano e Farine, evidenzia i più alti incrementi di portata in alveo di tutta l'area idrotermale. A monte sono state misurate portate trascurabili, mentre al margine occidentale la portata incrementa improvvisamente a 41 L/s (sezione 26 in Fig. 15 e Tab. 2) e poi dopo circa 3.7 km diventa 70 L/s (sezione 25 in Fig. 15 e Tab. 2). Considerati i bassi valori di temperatura e conducibilità elettrica delle acque e le quote piezometriche del SA, questi incrementi di portata sono da attribuire principalmente a flussi dal SA diffusi e concentrati essendo presenti nell'area alcune sorgenti del SA (Tavola 1).

In Tavola 1, sulla base di queste misure sono riportati i tratti di alveo alimentati dalle acque del SA e quelli dove si ha anche un contributo non trascurabile di acque termali.

5.2 Andamento delle portate delle acque termali nel tempo

Tutti i dati disponibili nel *data base* del DEB e quelli recentemente misurati sono stati esaminati per analizzare l'andamento storico della portata delle manifestazioni idrotermali. L'obiettivo è stato quello di esaminare la variazione degli efflussi termali nel tempo, relazionarla alla variazione della ricarica meteorica ed agli effetti indotti dalla realizzazione dei pozzi che via via nel tempo hanno captato le acque termali.

Le venute termali considerate sono quelle con temperatura superiore a 30 °C e affioranti da sorgenti e captate da pozzi. I dati di riferimento sono quelli reperiti da documenti editi ed inediti a partire dal 1900 (Regione Lazio 2008-2010). Per i dati precedenti al 1990, si è fatto riferimento ai dati di sintesi riportati in Camponeschi e Nolasco (1984). Una sintesi significativa dei dati storici è stata condotta da Pagano (2004), riportando tutte le

informazioni disponibili sulla portata delle sorgenti e dei pozzi dell'area idrotermale, con particolare riferimento al settore compreso tra la Valle dell'Urcionio ed il Bagnaccio. I dati più recenti sono quelli riportati in Regione Lazio (2008-2010), Baiocchi et al. (2012; 2013) e quelli appositamente misurati nel corso del presente studio. L'analisi ha tenuto conto anche dei dati forniti dal Direttore di Miniera del Bullicame-Bagnaccio per la Sorgente Bullicame dal 2005 al 2009 e dei pochi dati riportati dall'ENEL (1987). Come già sottolineato in Regione Lazio (2008-2010), l'informazione sulla portata delle manifestazioni termali non è completa per ogni singolo punto e non riguarda tutte le manifestazioni presenti nel periodo di misura. Ciò è dovuto, in parte, alle difficoltà tecniche di misura su punti d'acqua non attrezzati ed, in parte, alla variazione dei punti di emergenza nel tempo a causa dell'incremento del numero di perforazioni intercettanti risorse idrotermali. È da segnalare inoltre che sono state adottate differenti tecniche di misura nel tempo (mulinello idrometrico, vasche tarate, tempo di riempimento di piscine, ecc.); per le misure precedenti gli anni '80, non sempre si dispone di informazioni sui metodi utilizzati.

Considerate le lacune presenti, il confronto è stato condotto tra periodi definiti in funzione dei principali eventi che hanno avuto un potenziale o sicuro impatto sulla portata delle sorgenti naturali. Questi eventi sono:

- a) la realizzazione delle perforazioni eseguite negli anni '50 per ricerca geotermica (pozzi San Sisto, Zitelle e Bagnaccio);
- b) la realizzazione delle perforazioni eseguite negli anni '60 per la captazione di acque termali nel settore centrale (pozzi Gigliola e Uliveto dell'INPS e Pozzetto delle Terme dei Papi);
- c) i lavori per la costruzione della SS675 eseguiti nella Valle dell'Urcionio e l'approfondimento del Pozzetto, avvenuti tra il 1982 ed il 1993.

In funzione di questi eventi e dei dati disponibili sono stati considerati i seguenti periodi: pre-1952, 1953-1993, 1994-2006, 2007-2016. Per questi periodi sono stati considerati il valore o il valore medio delle portate dello stesso punto d'acqua o del gruppo di punti d'acqua ricadenti in un ambito relativamente circoscritto; in qualche caso si è proceduto alla ricostruzione del dato mancante (Tab. 3).

Tab. 3 Confronto delle portate delle venute di acqua termale da sorgenti e pozzi in L/s dagli anni '50 ad oggi.

Gruppo di sorgenti o pozzi	Pre-1952	1953-1993	1994-2006	2007-2016
<u>Gruppo Cassia Nord-Martana</u>	<u>5.10</u>	<u>5.99</u>	<u>1.30</u>	<u>1.87</u>
Sorgente-Pozzo Oasi	0.20	0.09	0	0.24
Pozzo Danti-Sondaggio Sismico I	0	1.00	1.00	1.13
Pozzo Mercatone	0.10	0.10	0.30	0.50
Bacucco-Vicenzale	1.80	1.80	0	0
Antica Cassia	3.00	3.00	0	0
<u>Gruppo Bagnaccio</u>	<u>18.40</u>	<u>18.13</u>	<u>8.00</u>	<u>7.63</u>
Laghetto Bagnaccio	4.80	4.53	4.00	2.47
Pantano	1.00	1.00	1.00	0.65
Sorgenti Bagnaccio	2.00	2.00	1.00	0.51
Pozzo Bagnaccio	0	0	0	2.00
Casale Montarozzo	2.20	2.20	2.00	2.00
Contrada Bagnaccio	0.50	0.50	0	0
La Ruzzola	1.00	1.00	0	0
Gallinei	2.00	2.00	0	0
Quartaccio	1.00	1.00	0	0
Piscina del Bacucchetto	2.00	2.00	0	0
Piano di Viterbo	0.90	0.90	0	0
Capanna Goletti	1.00	1.00	0	0
<u>Gruppo Zitelle</u>	<u>8.40</u>	<u>22.87</u>	<u>11.80</u>	<u>12.78</u>
Zitelle-Pozzo Zitelle	2.00	14.70	9.80	11.78
Ara dello Zio	1.10	1.10	0	0
Casale Polidori	3.00	3.00	0	0
Piscinella Polidori	1.00	1.00	0.50	0.20
Bussete	0.80	2.33	1.00	0.50
Casale Bussete	0.50	0.74	0.50	0.30
<u>Gruppo Bullicame</u>	<u>38.43</u>	<u>23.74</u>	<u>16.70</u>	<u>18.25</u>
Bullicame	28.33	15.64	9.80	7.51
Piscine Carletti	4.60	3.30	1.40	2.69
S. Valentino-Pozzo S. Valentino	2.00	2.50	4.00	6.05
Piazza d'Arme	0.50	0.50	0.50	0.50
S. Albino-Pozzo S. Albino	3.00	1.80	1.00	1.50
<u>Gruppo Valle dell'Urcionio</u>	<u>16.25</u>	<u>32.18</u>	<u>26.85</u>	<u>26.40</u>
Magnesiaca	0.18	0.92	0.15	0.03
Bagno del Papa	0.50	1.09	0.20	0.06
S. Caterina	12.0	6.25	8.00	6.00
Milza	0.64	0.48	0	0
Torretta-Vesparo	2.50	1.50	0	0
Crociata	0.43	1.00	0	0
Pozzo Pozzetto	0	5.30	18.50	20.31
Pozzo Gigliola	0	7.70	0	0
Pozzo Uliveto	0	7.94	0	0
<u>Gruppo Asinello</u>	<u>>0.80</u>	<u>3.69</u>	<u>1.80</u>	<u>1.55</u>
S. Cristoforo	0	1.72	1.00	0.75
Gruppo dell'Asinello	0.80	1.97	0.80	0.80
<u>Gruppo Bagnarello-Paliano</u>	<u>8.00</u>	<u>7.43</u>	<u>5.95</u>	<u>12.37</u>
Pozzo S. Sisto	0	5.33	5.95	2.66
Bagnarello	3.00	0	0	0
Sulfurea del Masso	5.00	2.10	0	0
Pozzo Paliano 1	0	0	0	9.71
Totale	95.38	114.03	72.40	80.85

È da sottolineare che per i periodi 1994-2006 e 2007-2016 le stime sono relativamente più affidabili, avendo informazioni più complete sui diversi punti d'acqua ed essendo specificati i metodi di misura delle portate. Per i periodi precedenti (pre-1952 e 1953-1993), le stime sono nettamente meno affidabili, avendo informazioni incomplete, anzi in alcuni casi le portate sono state stimate senza specificare il metodo di misura o addirittura esse sono state ricostruite.

Se si confrontano i dati dei periodi relativamente più affidabili (1994-2006 e 2007-2016), non si riscontrano significative variazioni della portata totale, tenendo conto della relativa recente attivazione del Pozzo Paliano 1 nel 2009. Valori di portata totale più elevati si riscontrano per i due periodi precedenti, ma in questo caso bisogna tener conto della minore affidabilità dei dati di base, oltre che delle possibili variazioni della ricarica. In merito a quest'ultimo aspetto, si può considerare la dipendenza della ricarica dalle precipitazioni e dalla temperatura dell'aria, osservando, a titolo di esempio, che per la stazione meteorologica di Viterbo in media le precipitazioni e la temperatura dell'aria sono state di 871 mm e 14.8 °C nel periodo 1924-1952, 839 mm e 14.1 °C nel periodo 1953-1993, 746 mm e 15.4 °C nel periodo 1994-2006 e 829 mm e 15.4 °C nel periodo 2007-2015. Confrontando questi dati per il periodo precedente al 1993, risulta una più alta precipitazione ed una più bassa temperatura dell'aria che potrebbero far pensare ad una ricarica relativamente più elevata rispetto ai periodi successivi. Ciò potrebbe giustificare la più alta portata pre-1993, ammettendo la confrontabilità dei dati di portata pre- e post-1993. La dipendenza della portata delle venute di acque termali dalla ricarica sembrerebbe ancora più evidente se si considera che nel periodo marzo-maggio 2016 è stata misurata la più bassa portata totale (circa 65 L/s) coerentemente con la più bassa precipitazione dell'anno precedente (675 mm) ed i più alti valori di temperatura media dell'aria (15.9 °C), rispetto agli altri periodi considerati (cfr. par. 5.1).

In merito alla risposta delle venute idrotermali alla ricarica, un ulteriore esempio deriva dall'andamento della portata della Sorgente Bullicame nel periodo 2005-2009, l'unica sorgente di cui si dispone di una serie di dati più lunga. Anche se la ricarica non dipende esclusivamente dalle precipitazioni, in Figura 16 è evidente un andamento coerente tra la media mobile della portata sorgiva e delle precipitazioni mensili della stazione meteorologica di Viterbo.

Bisogna infine considerare che in Tabella 3 sono riportate solo le emergenze idrotermali localizzate, mentre, come già noto (Regione Lazio 2008-2010; Baiocchi et al. 2012; 2013) e

verificato nel corso delle nuove misure (cfr. par. 5.1), esistono anche incrementi di portata in alveo, almeno in parte attribuibili a flussi da acque termali.

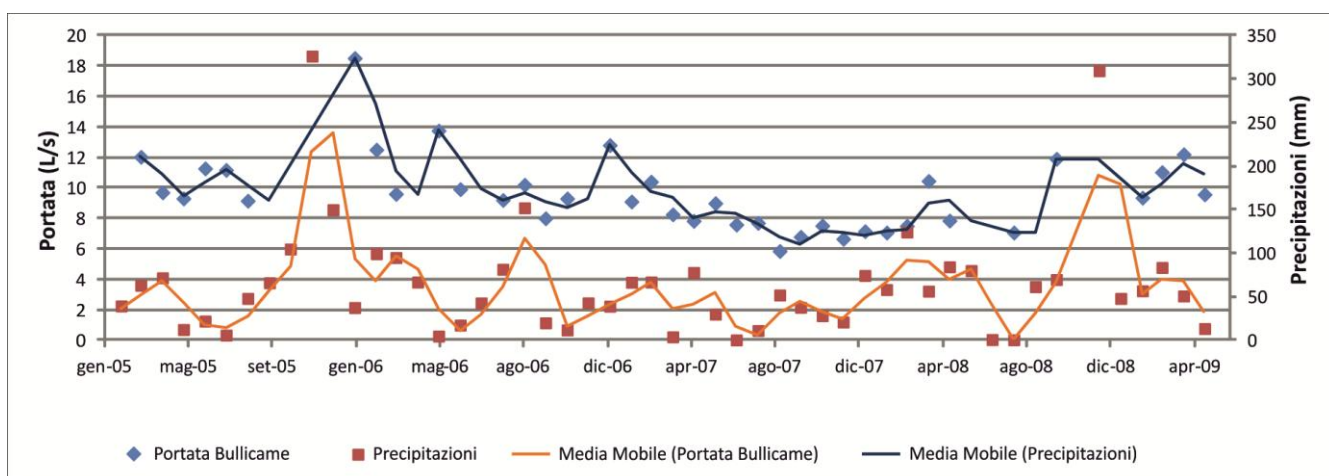


Fig. 16 Confronto tra la portata della Sorgente Bullicame e le precipitazioni mensili della stazione meteorologica di Viterbo, nel periodo 2005-2009.

5.3 Stima dei prelievi dall'acquifero superficiale

Per esaminare l'entità dei prelievi idrici dall'acquifero superficiale (SA) sono stati considerati i dati acquisiti presso il Settore VIII della Provincia di Viterbo. I dati si riferiscono a tre archivi, uno è relativo alle concessioni di prelievi idrici dell'ex-Genio Civile, un secondo riguarda le denunce dei pozzi presso la Provincia di Viterbo (ai sensi dei R.D. 1775/1933, D.Lgs.152/1999 e D.Lgs. 258/2000) ed un terzo si riferisce alla Legge Regionale 30/2000. I dati forniti comprendono l'ubicazione dei pozzi (per alcuni espressa in coordinate geografiche, per altre riferita alle particelle catastali), l'uso previsto e l'entità dei prelievi idrici, quest'ultima a volte espressa come portata ed a volte come volumi annui. Dall'analisi dei dati risulta che nell'area dove ricadono le sorgenti termali, precisamente su un'area di circa 19.379 km², sono presenti 7 derivazioni da sorgenti e torrenti, 127 pozzi per uso irriguo e 31 pozzi per altri usi (domestico, igienico-sanitario, verde pubblico, impianti sportivi, ecc.). Per i pozzi sono dichiarate portate comprese tra 0.25 e 15 L/s e volumi di prelievo annuo dal singolo pozzo tra 3.6 e 15000 m³. Dall'archivio delle denunce dei pozzi della Provincia di Viterbo risulta che nessun pozzo è dotato di strumento di misura dei prelievi.

La disomogeneità dei dati di prelievo dai pozzi, in alcuni casi la portata ma senza riferimento al periodo di funzionamento, in altri i volumi annui, rende i dati non utilizzabili per una valutazione dei prelievi dall'acquifero superficiale nell'area in esame, come peraltro ritenuto anche dalla stessa Provincia di Viterbo (2008).

Una stima indiretta è stata effettuata considerando le superfici agricole presenti nell'area dove ricadono le sorgenti termali (l'anzidetta area di 19.379 km²), considerando l'uso del suolo (ISPRA 2012). Risulta che circa 17.068 km² sono destinati ad aree agricole ed oliveti. Adottando un volume medio irriguo annuo di 1350 m³/anno per ettaro, valore questo stimato per il bacino idrogeologico del Lago di Bolsena (Provincia di Viterbo 2008), risulterebbe una portata media annua di prelievo di circa 73 L/s. Una seconda stima indiretta dei prelievi irrigui nell'area idrotermale, riportata in Baiocchi et al. (2012) e basata sulla differenza tra evapotraspirazione potenziale e reale media annua per le aree irrigue, indica una portata media annua di circa 100 L/s. A questi prelievi si dovrebbero aggiungere quelli per uso domestico che, in genere, sono nettamente inferiori a quelli irrigui e sono stati stimati essere circa il 10 % di quelli irrigui nel bacino idrogeologico del Lago di Bolsena (Provincia, 2008).

Quindi in definitiva i prelievi dall'acquifero superficiale attraverso pozzi nell'area idrotermale, nell'intorno delle sorgenti e dei pozzi termali, possono essere stimati tra 80 e 110 L/s come valore medio annuo, escludendo le opere di captazione ad uso potabile. Per quest'ultimo tipo di uso della risorsa idrica dai dati dell'ATO1 Lazio Nord Viterbo, risulta nell'area di interesse solo la Sorgente Pidocchio, con una portata derivata continuamente di 10 L/s.

Nella Tavola 1, è riportata l'ubicazione delle sorgenti dell'acquifero superficiale (SA), compresa quella captata per uso potabile (Sorgente Pidocchio), oltre che i pozzi del SA, censiti direttamente in sito nel corso delle indagini condotte in passato (Regione Lazio 2008-2010) e durante i rilievi di questo studio. I pozzi del SA riportati in Tavola 1, sicuramente in numero inferiore a quelli effettivamente presenti nell'area, in parte corrispondono con quelli dell'archivio della Provincia di Viterbo.

6. Nuovo modello di simulazione numerica del flusso

Un nuovo modello numerico del flusso è stato implementato, al fine di approfondire il comportamento del TA in relazione ad un nuovo possibile scenario di prelievo di acque termali dal sistema idrotermale di Viterbo. L'attenzione è stata quindi focalizzata sul TA, cioè sull'acquifero captato dalle concessioni minerarie.

Il nuovo modello alle differenze finite è stato costruito sulla base del modello idrogeologico concettuale descritto in precedenza (cfr. par. 3), delle nuove analisi circa l'andamento nel tempo delle portate delle manifestazioni idrotermali (cfr. par. 5.2) e dei risultati della nuova campagna di misure idrogeologiche (cfr. par. 5.1). Il codice utilizzato è stato MODFLOW (McDonald e Harbaugh 1988) per la costruzione del modello e PEST (Doherty 2010) per la calibrazione, attraverso l'interfaccia grafica Groundwater Vistas 6 (Rumbaugh e Rumbaugh 2011).

Di seguito sono riportati i principali elementi relativi alla costruzione del nuovo modello, la calibrazione ed i risultati da esso ottenuti, ed i risultati della nuova simulazione.

6.1 Costruzione del modello

Il modello copre un'area di 43.6 km² discretizzata orizzontalmente da una griglia di 81144 celle, 98 colonne e 276 righe, con dimensione delle celle variabile da 25x18.75 m a 126.5x115.6 m. La superficie topografica dell'area del modello è stata ricostruita tramite digitalizzazione delle isoipse e dei punti quotati della Cartografia Tecnica Regionale in scala 1: 5000. I punti ottenuti dalla trasformazione delle informazioni sono stati interpolati tramite *Kriging* e convertiti in un DEM, con maglia 10x10 m.

La discretizzazione verticale è stata elaborata sulla base del modello idrogeologico concettuale ed è costituita da 3 *layer* rappresentanti, dall'alto verso il basso:

- *layer* 1: acquifero vulcanico, SA;
- *layer* 2: aquitard;
- *layer* 3: acquifero termale, TA.

Per la ricostruzione delle superfici del *bottom* dei *layer* 1 e 2 (rappresentati il limite superiore e inferiore dell'aquitard) sono stati utilizzati i log stratigrafici disponibili (Regione Lazio 2008-2010) e la geologia di superficie (cfr. par. 2), interpolando i punti considerati in ambiente GIS tramite *Ordinary Kriging* con log-trasformazione dei dati. I risultati della cross-validazione

hanno restituito un RMSE degli scarti, tra valori della quota del substrato osservati e stimati dalla superficie ricostruita tramite *Kriging*, rispettivamente di 20.28 m per il *bottom* del *layer* 1 e di 23.98 m per il *bottom* del *layer* 2, in media sull'area del modello. Tale valore si riduce in corrispondenza dei punti utilizzati per la costruzione delle superfici. Queste ultime sono riportate in Figura 17 insieme alla distribuzione areale dell'errore associato alla stima dell'interpolatore. Il *layer* 3 è stato assunto di spessore costante pari a 80 m.

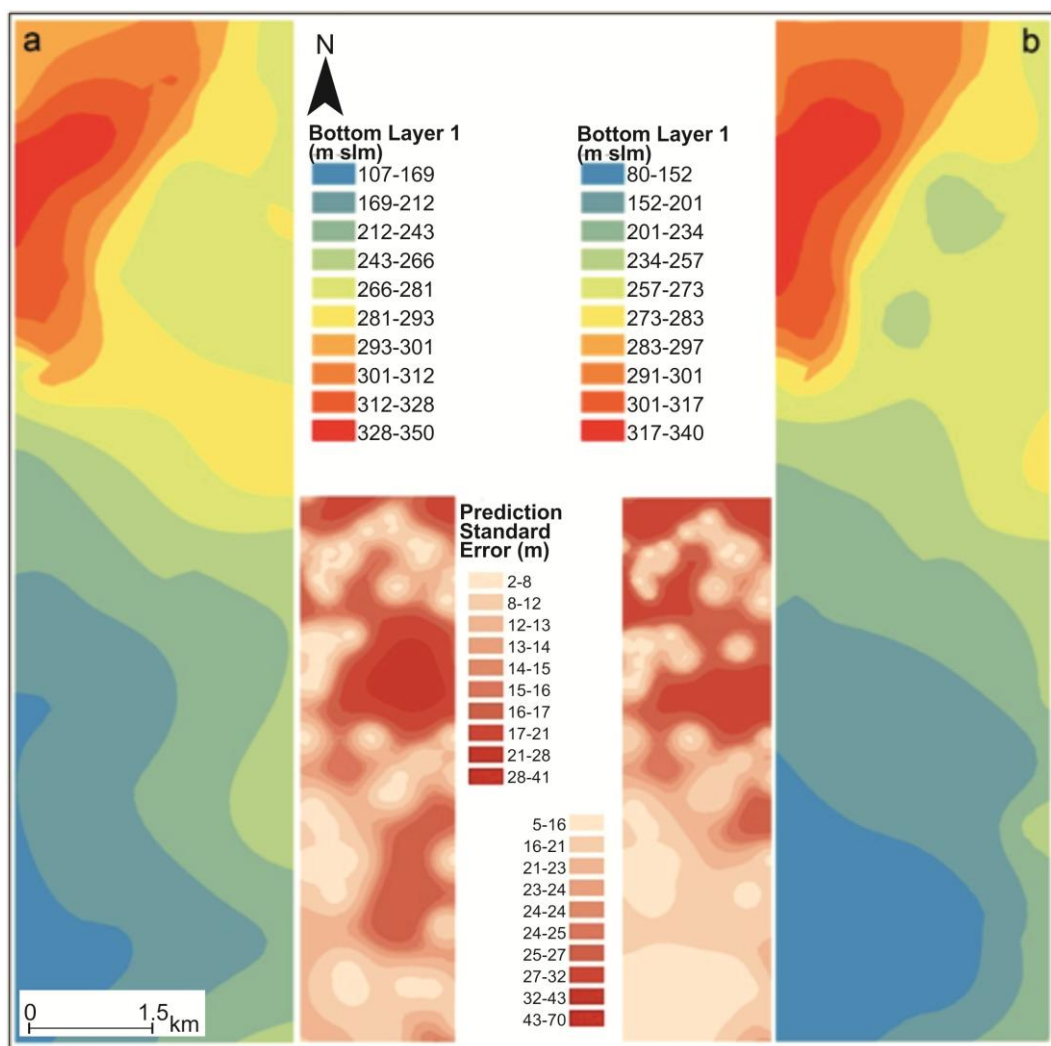


Fig. 17 Superfici utilizzate per la costruzione del modello e relativo errore standard per il *bottom* del *layer* 1 (a) e il *bottom* del *layer* 2 (b).

Il tempo della simulazione è stato suddiviso nei 4 intervalli per i quali sono note le portate delle manifestazioni idrotermali (cfr. par. 5.2). Data la lunghezza di ogni intervallo, *stress period* (in seguito SP), si assume che il sistema raggiunga per ognuno uno stato di equilibrio. I quattro SP sono stati quindi impostati come stazionari posti in sequenza.

Ai fini della stima della ricarica meteorica sull'area modellata sono stati considerati i dati della stazione pluvio-termometrica di Viterbo dal 1953 al 2015 (cfr. par. 5.1 e 5.2),

suddividendo le medie dei dati di precipitazione e temperatura dell'aria negli stessi intervalli di tempo in cui sono stati suddivisi i dati di portata delle emergenze idrotermali. Il parametro ricarica diretta è stato stimato dalla differenza tra precipitazione ed evapotraspirazione reale, calcolata quest'ultima secondo il metodo di Turc. Alla ricarica media sull'area è stata applicata una ricarica aggiuntiva proveniente dai rilievi a NO e SE, come mostrato in Figura 18, in accordo con lo schema idrogeologico. In Tabella 4 sono rappresentati i valori di ricarica (RCH) complessiva applicati per i diversi SP.

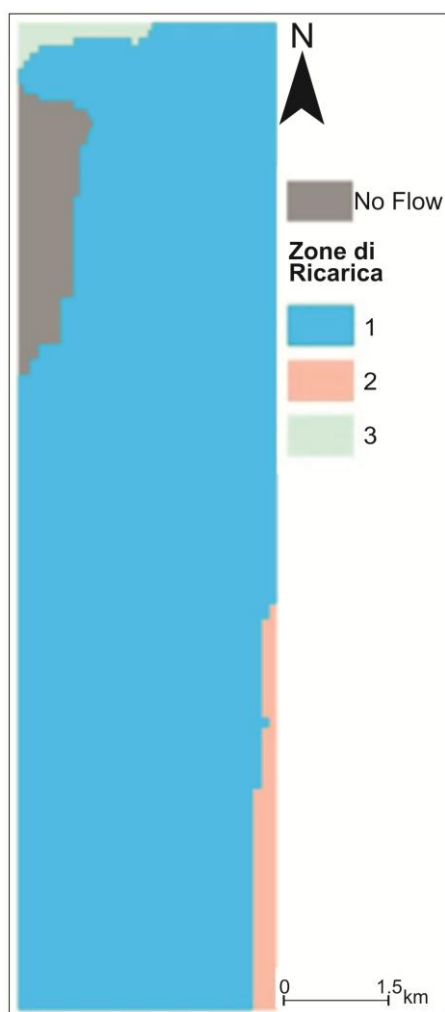


Fig. 18 Distribuzione delle zone di ricarica (RCH).

Tab. 4 Ricarica (RCH) complessiva per *stress period* (SP).

Periodo	SP	RCH (m ³ /s)
1900-1952	1	0.241
1953-1993	2	0.204
1994-2006	3	0.128
2007-2015	4	0.159

Nell'impostazione iniziale del modello, il parametro conducibilità idraulica è stato assegnato secondo zone a valore uniforme. La geometria e i valori iniziali sono riportati in Figura 19 ed in Tabella 5.

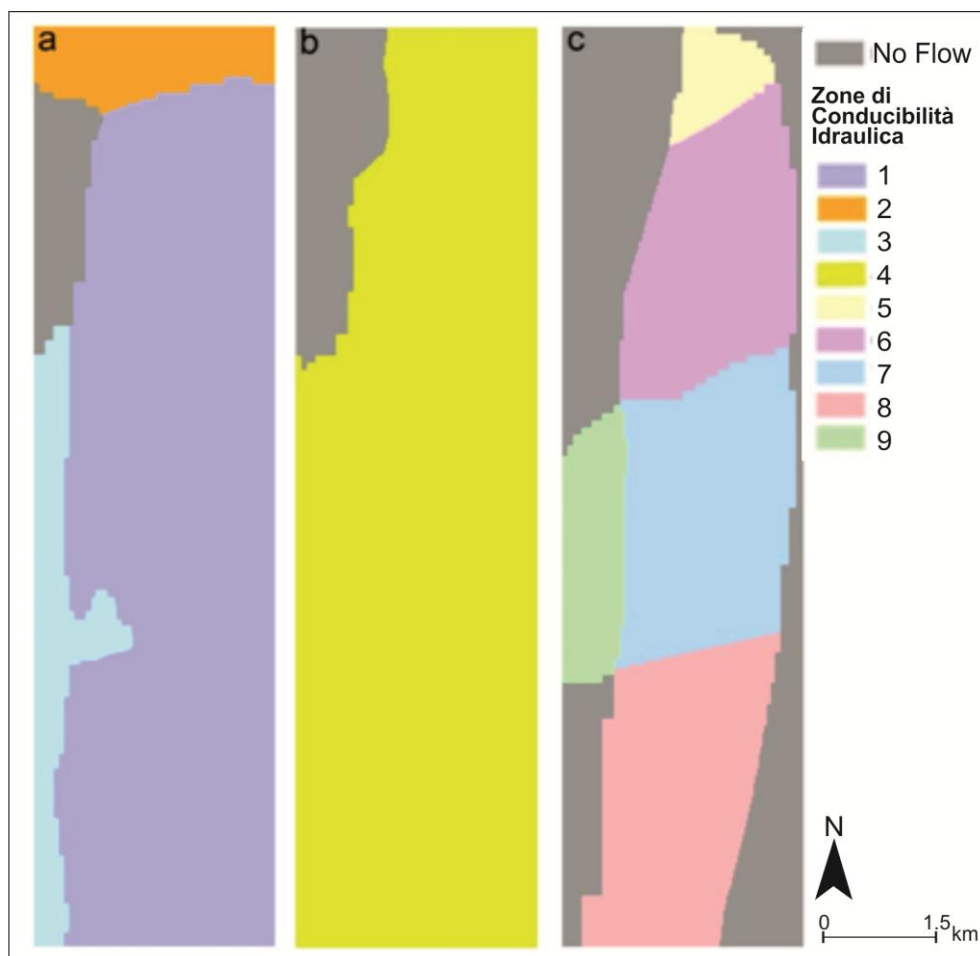


Fig. 19 Distribuzione iniziale delle conducibilità idraulica dei layer 1 (a), layer 2 (b) e layer 3 (c).

Tab. 5 Valori di conducibilità idraulica orizzontale (K_h) e verticale (K_v) iniziali assegnati al modello.

Zona	Layer	K_h (m/s)	K_v (m/s)
1	1	4.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}
2	1	1.0×10^{-5}	1.0×10^{-5}
3	1	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-6}
4	3	5.0×10^{-6}	5.0×10^{-6}
5	2	1.0×10^{-7}	1.0×10^{-8}
6	3	1.0×10^{-6}	1.0×10^{-7}
7	3	5.0×10^{-6}	5.0×10^{-7}
8	3	5.0×10^{-6}	5.0×10^{-7}
9	3	1.0×10^{-7}	1.0×10^{-7}

Le *initial head* sono state ricavate dalle piezometrie disponibili per il periodo 2008-2010 (Regione Lazio 2008-2010; Baiocchi et al. 2012; 2013).

Nell'impostazione iniziale del modello sono state assegnate delle *boundary condition*, ossia delle condizioni al contorno che permettono ingressi e uscite dal sistema modellato. Nello specifico sono state considerate le seguenti condizioni (Harbaugh e McDonald 1996):

- *general head boundary* (GHB): questa condizione è stata utilizzata per simulare flussi in entrata e uscita dal sistema che siano carico-dipendenti (il flusso è proporzionale alla differenza di carico tra la condizione al contorno e l'interno del sistema);
- *no flow boundary*: rappresentano zone all'interno del modello caratterizzate da flusso nullo;
- *drain boundary*: come la GHB è una condizione di flusso carico-dipendente; a differenza della GHB, la *drain boundary* consente esclusivamente il flusso in uscita dal sistema e si disattiva quando il carico idraulico scende sotto la soglia del dreno;
- *well boundary*: è una condizione di flusso imposto, in uscita dal sistema se negativo ed equivalente ad una ricarica se positivo.

In base alle anzidette *boundary condition*, i confini del modello sono stati definiti per i diversi *layer* (Fig. 20).

Nel *layer 1* a NE, O e SO è stata imposta una condizione di GHB. Non avendo a disposizione misure nell'area interessata dalla condizione, il carico idraulico è stato desunto prolungando il locale gradiente idraulico calcolato in base ai punti di misura disponibili. Nella porzione a NO è stata inserita la condizione *no flow* relativa all'affioramento delle unità flyschoidi di M. Razzano. La condizione di *drain*, con soglia pari alla quota di piano campagna, è stata assegnata in corrispondenza dei tratti drenanti dei torrenti; stessa condizione al contorno è stata assegnata alle sorgenti del SA (Fig. 20).

Nel *layer 2* è stata imposta la condizione di *no flow* a rappresentare la continuazione in profondità delle unità flyschoidi di M. Razzano (Fig. 20).

Nel *layer 3* nelle porzioni a N, O e E è stata assegnata la condizione di *no flow* a delimitazione dell'area termale. In corrispondenza delle sorgenti e dei pozzi termali è stata assegnata la condizione di *drain*. L'alimentazione del *layer* dal basso è stata simulata tramite la condizione *well* con portata positiva. L'entità di tale ricarica è stata inizialmente impostata per complessivi 190 L/s, secondo le stime indirette condotte negli studi precedenti (Baiocchi et al. 2012; 2013). È stato assunto che questo *layer* non abbia rapporti laterali con l'esterno del modello (Fig. 20).

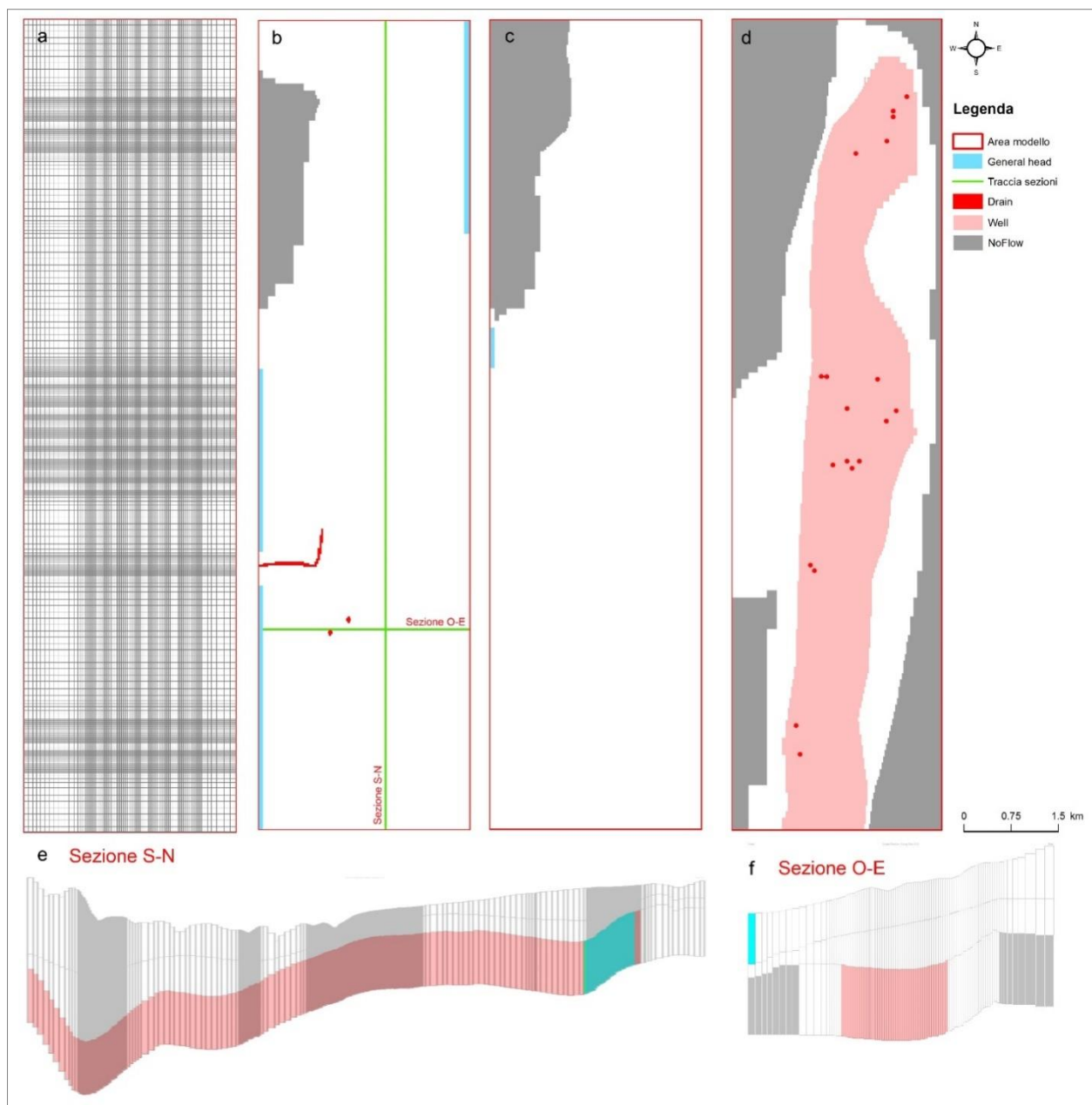


Fig. 20 Griglia del modello (a); *boundary condition* e tracce delle sezioni per il *layer 1* (b), *layer 2* (c) *layer 3* (d); Sezione S-N (Colonna 56) (e); Sezione O-E (Riga 213) (f).

6.2 Calibrazione e risultati del modello

La calibrazione del modello si è basata sui carichi idraulici dell'acquifero vulcanico e sui carichi idraulici e portate in uscita da pozzi e sorgenti di acqua termale. I dati utilizzati sono stati accorpate nei 4 SP considerati (cfr. par. 5.2 e 6.1). Riguardo ai carichi idraulici dell'acquifero vulcanico si dispone di un'unica misura completa effettuata durante la campagna del 2008-2009 (Regione Lazio 2008-2010; Baiocchi et al. 2012). I dati sono comunque stati assunti validi ai fini di rappresentare le condizioni medie del SP 4 (2007-

2015). Nel complesso sono stati considerate 52 osservazioni sui carichi idraulici del *layer* 1, 2 osservazioni dei carichi idraulici del *layer* 3 e 17 osservazioni di portata del *layer* 3.

Il processo di calibrazione ha seguito un approccio a complessità crescente, partendo da una prima stima dei parametri distribuiti secondo zone uniformi attraverso il codice PEST 12.3 (Doherty 2010). Successivamente si è passati alla calibrazione tramite *pilot points* (Certes e de Marsily 1991; Doherty et al. 2010), che consente di variare spazialmente il parametro stimato secondo tecniche geostatistiche.

La calibrazione a zone ha portato ad un risultato che per quanto riguarda i *target head* si attesta con un RMSE pari a 12.17 m, mentre per i *target flux* l'RMSE è pari a 0.01 m³/s. È stata verificata l'entità dei flussi in ingresso e in uscita dal sistema. La percentuale di scarto tra entrate e uscite rappresenta una misura indiretta della stabilità numerica del modello, che convenzionalmente si considera stabile per errori percentuali inferiori a 1. Questa calibrazione preliminare del modello ha presentato un errore pari a 0.64 %.

Successivamente, partendo dalla calibrazione a zone, si è passati ad una calibrazione tramite *pilot points* (PP), ossia punti di variazione del parametro conducibilità idraulica. La variazione dei parametri ha riguardato la conducibilità idraulica orizzontale (K_h) dei *layer* 1 e 3, e la conducibilità idraulica verticale (K_v) dei *layer* 2 e 3. Per il primo *layer* si è assunta una K_v pari a 1.0×10^{-5} m/s e per il *layer* 2 una K_h pari a 1.0×10^{-7} m/s. I risultati ottenuti dalla calibrazione si attestano su valori di RMSE rispettivamente di 18.17 m per i *target head* e di 0.002 m³/s per i *target flux*. Questa ulteriore fase di calibrazione del modello ha presentato un errore pari a 0.30 % tra entrate ed uscite dei flussi.

La terza ed ultima fase della calibrazione ha preso in considerazione 922 PP così distribuiti:

- 201 PP di K_h e 129 PP di K_v nel *layer* 1;
- 125 PP di K_h e 156 PP di K_v nel *layer* 2;
- 141 PP di K_h e 170 PP di K_v nel *layer* 3.

In Figura 21 sono riportate le posizioni dei PP nei tre *layer*.

Le distribuzioni di conducibilità idraulica che minimizzano l'errore tra valori delle portate in uscita da pozzi e sorgenti di acque termali simulate e osservate sono riportati nelle Figure 22, 23 e 24.

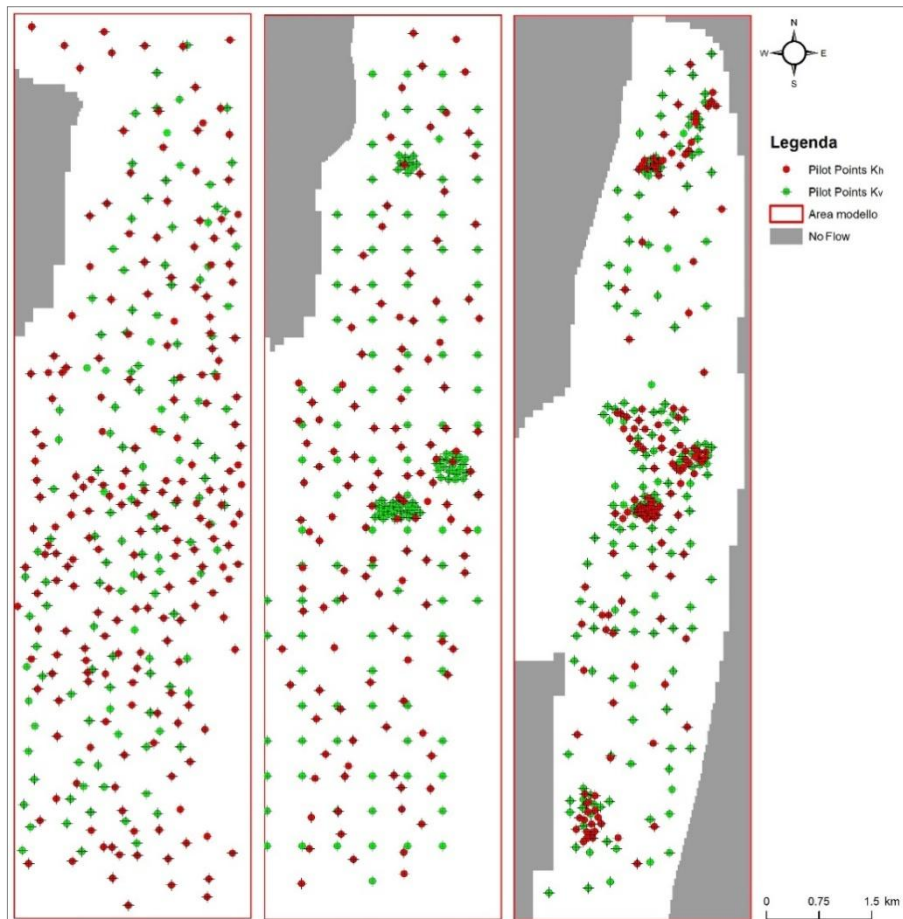


Fig. 21 Distribuzione dei *pilot points* nei 3 layer.

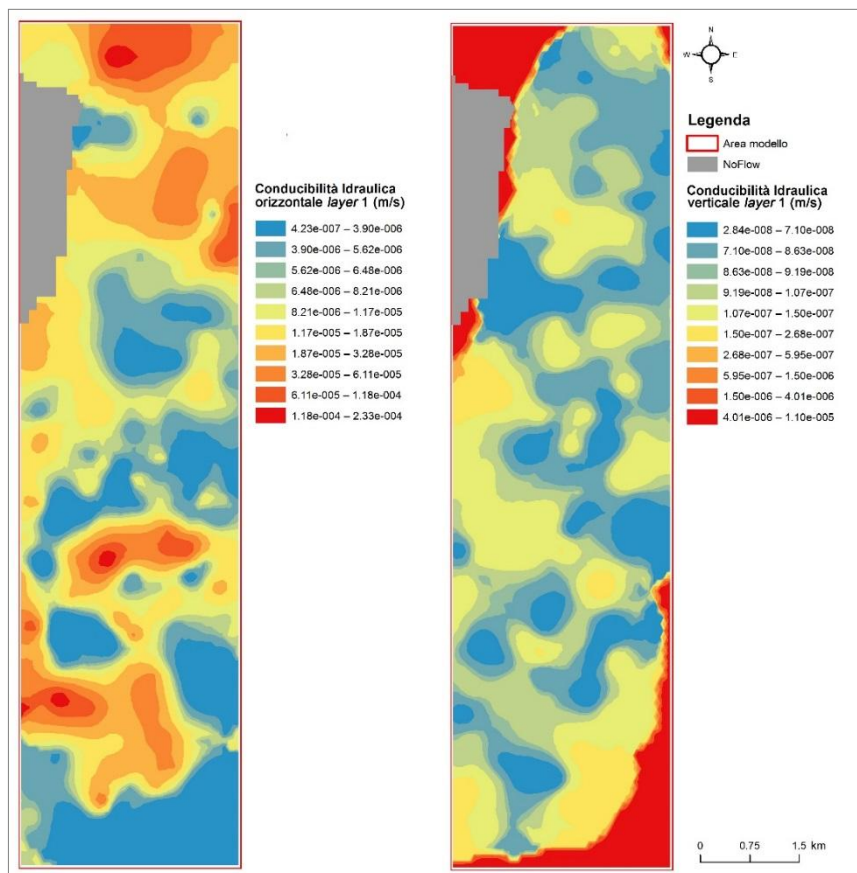


Fig. 22 Distribuzione della conducibilità idraulica orizzontale e verticale del *layer 1*.

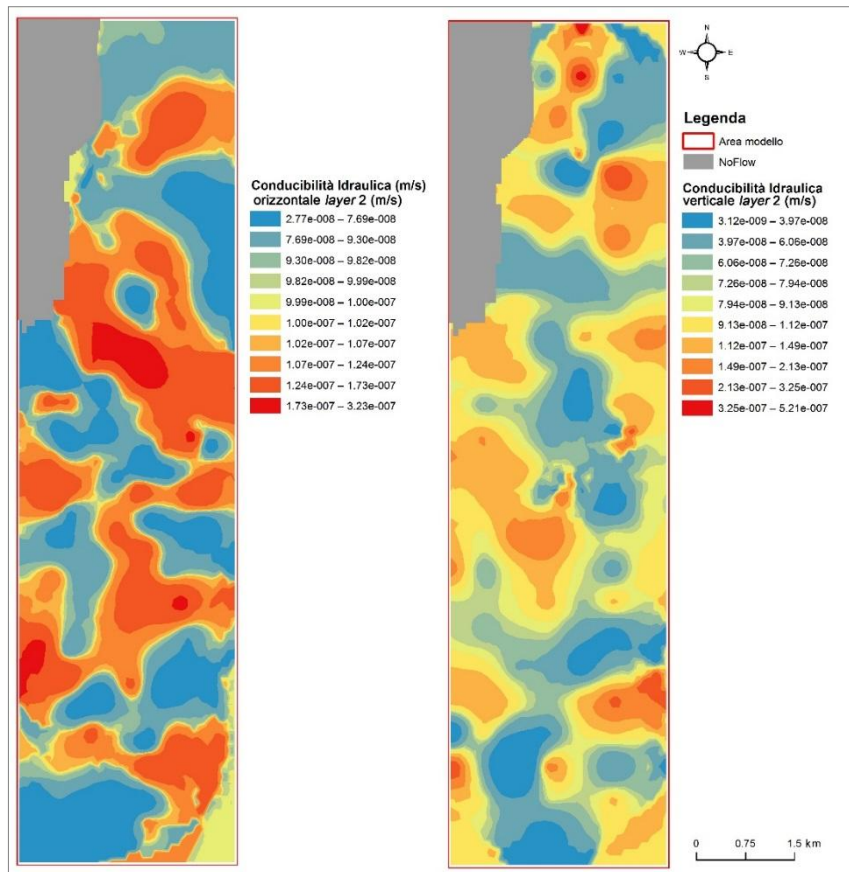


Fig. 23 Distribuzione della conducibilità idraulica orizzontale e verticale del layer 2.

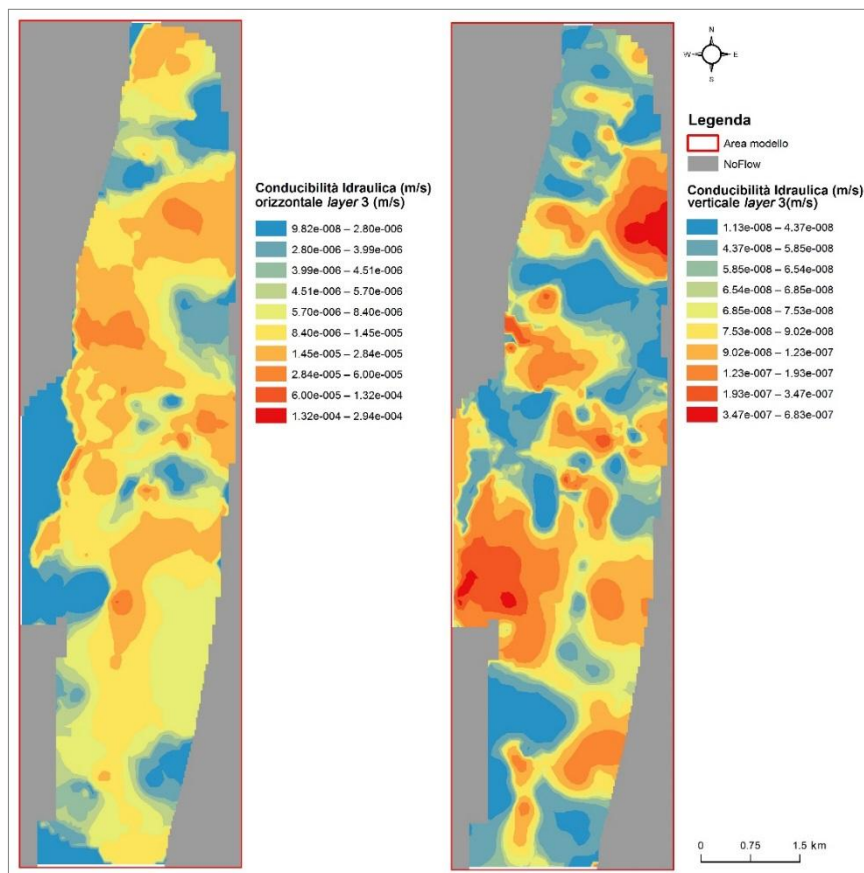


Fig. 24 Distribuzione della conducibilità idraulica orizzontale e verticale del layer 3.

I risultati della modellazione con quest'ultima fase di calibrazione sono stati rappresentati mediante piezometrie e *scatter plot*.

La morfologia piezometrica simulata del *layer 3* (Fig. 25), il TA, per i diversi SP segue l'andamento generale ricostruito nel modello concettuale. Anche la morfologia piezometrica del *layer 1* (Fig. 26), il SA, per lo SP 4 ha un andamento generale confrontabile con quello del modello concettuale.

Lo *scatter plot* di Figura 27, che mette a confronto i valori dei carichi idraulici e delle portate misurate nella campagna 2008-2009 con i valori simulati dal modello calibrato, mostra un buon accordo in entrambi i casi. Le statistiche descrittive degli scarti mostrano per i flussi un errore medio prossimo a zero, ad indicare l'assenza di sovrastime o sottostime sistematiche (Tab. 6). L'errore medio dei carichi idraulici del SA è invece pari a -4.7 m, indicando una sovrastima rispetto all'osservato (in particolare nel settore settentrionale). Tale incongruenza fa supporre che le *boundary condition* impostate, in particolare le GHB e i torrenti drenanti, non siano sufficienti a consentire il necessario deflusso in uscita dal SA.

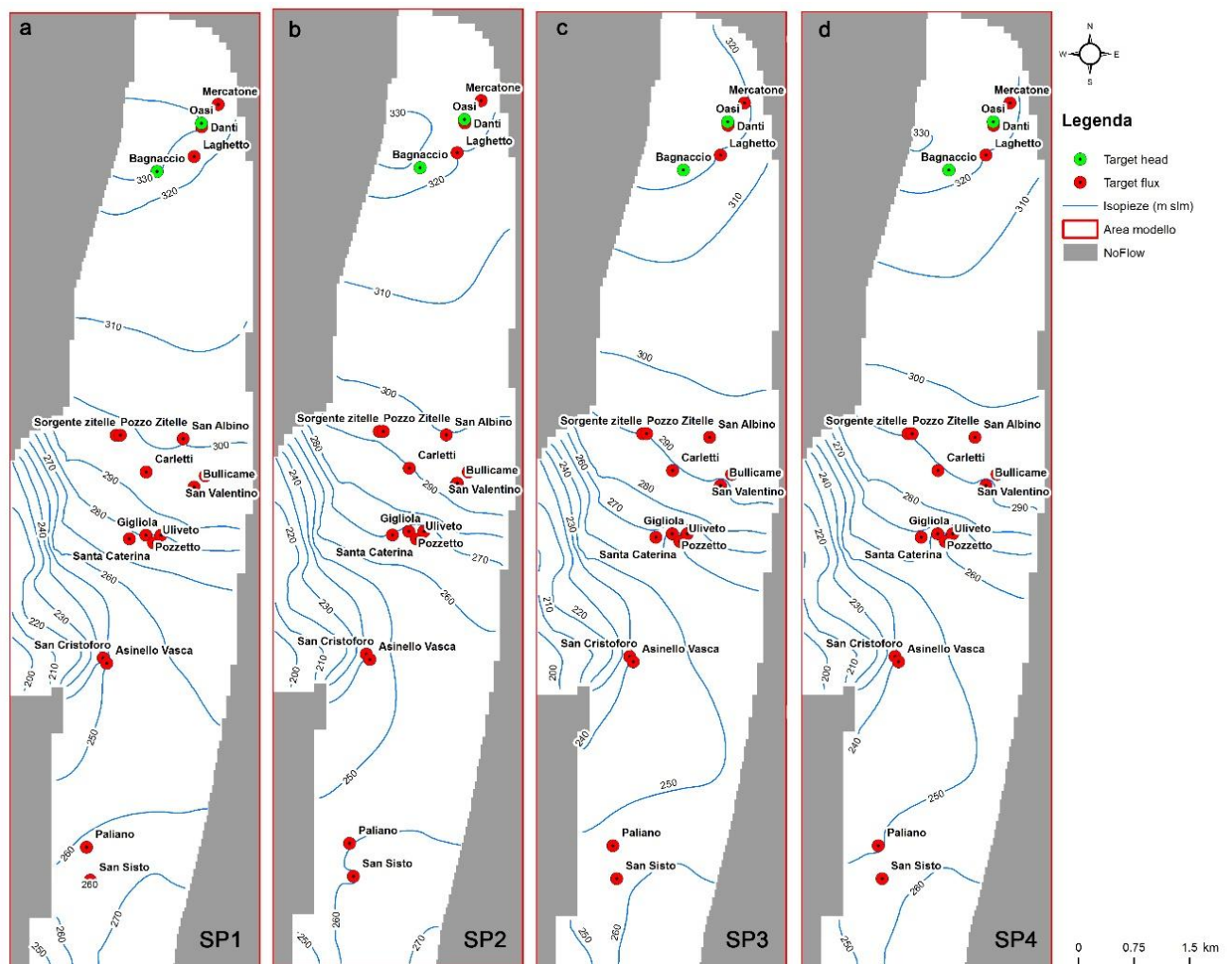


Fig. 25 Piezometrie simulate per il *layer 3* nei diversi periodi: SP 1 (a), SP 2 (b), SP 3 (c), SP 4 (d).

Tab. 6 Statistiche descrittive degli scarti tra valori simulati e osservati.

Statistiche descrittive	<i>target flux</i> (m ³ /s)	<i>target head</i> (m)
Errore medio	-0.000057	-4.69
Errore assoluto medio	0.000861	5.39
RMSE	0.001377	7.50
Errore minimo	-0.004872	-20.61
Errore massimo	0.004284	2.24
Range delle osservazioni	0.002833	140.60
Numero di osservazioni	58	54

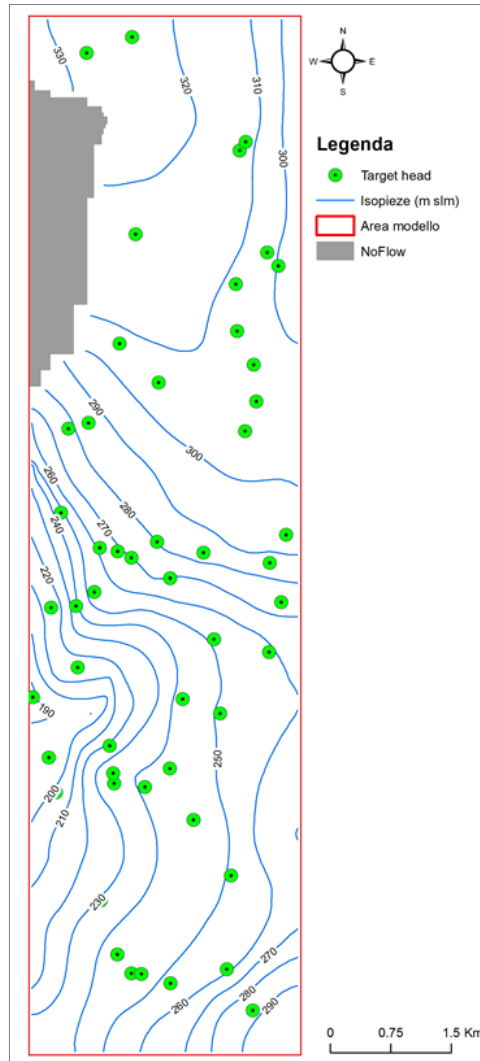


Fig. 26 Piezometria simulata per il *layer* 1 relativamente allo SP 4.

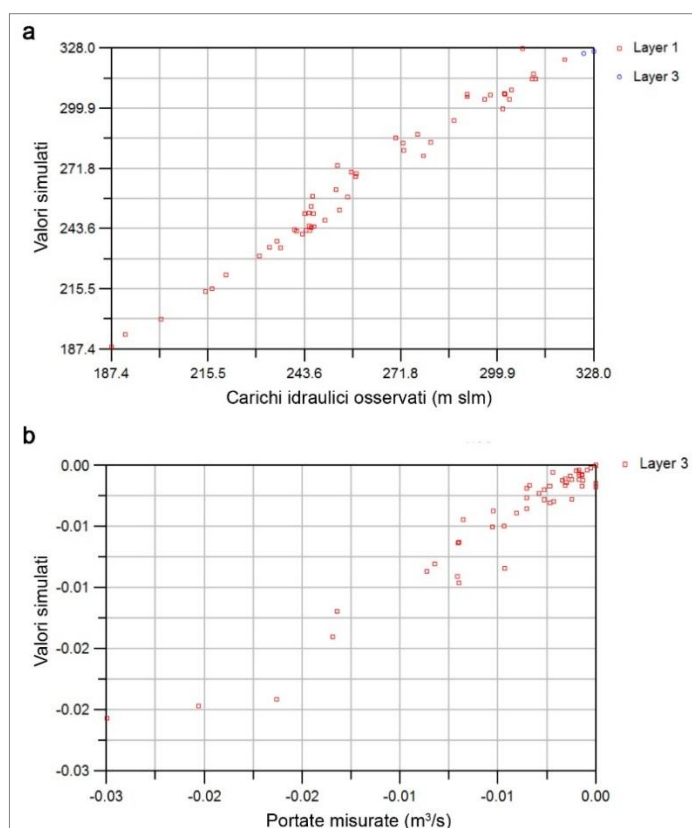


Fig. 27 Correlazione tra altezze piezometriche (m s.l.m.) simulate e misurate (a) e tra flussi (m³/s) simulati e misurati (b).

L'entità dei flussi in ingresso e in uscita dal sistema è stata analizzata per lo SP 4, periodo per cui si dispone della maggiore quantità di dati. Le voci del bilancio sono state calcolate sia per il sistema nel suo complesso che per i singoli *layer* (Tab. 7). Il confronto con il modello concettuale evidenzia un generale accordo dei risultati della simulazione, in particolare con la minima potenzialità del TA stimata essere di almeno 170 L/s (cfr. par. 3). In particolare, la calibrazione simultanea dei 4 diversi SP ha raggiunto la convergenza con una quantità di ricarica dal basso superiore del 30 % rispetto a tale minimo. Altra stima che è possibile analizzare attraverso la modellazione è l'entità dei flussi verticali attraverso l'aquitard. Come atteso dal modello concettuale, il flusso verticale prevalente è dal TA verso il SA. Risulterebbe però anche un minimo flusso in direzione opposta, limitato al margine SE del modello, che meriterebbe ulteriori approfondimenti, in relazione al numero molto limitato di dati che caratterizza il settore meridionale.

La simulazione del bilancio complessivo dello SP 4 del modello presenta una discrepanza pari a 0.78 %. Questo risultato rende il modello calibrato accettabile, se si considera che percentuali di scarto tra entrate e uscite inferiori a 1 rappresentano uno degli indici della stabilità numerica di un modello.

Tab. 7 Bilancio del modello per lo SP 4.

Voci del bilancio	Layer 1		Layer 3		Modello	
	Entrate (m ³ /s)	Uscite (m ³ /s)	Entrate (m ³ /s)	Uscite (m ³ /s)	Entrate (m ³ /s)	Uscite (m ³ /s)
RCH	0.159				0.159	
Flussi attraverso il <i>layer 2</i>	0.173	0.030	0.018	0.172		
<i>Drain</i>		0.106		0.070		0.175
<i>Well</i>				0.003		0.003
GHB	0.005	0.198			0.005	0.209
Ricarica dal basso			0.227		0.227	
TOTALE	0.337	0.334	0.245	0.245	0.391	0.388
Discrepanza						0.78 %

6.3 Nuova simulazione di prelievo dal TA

I risultati dell'ultima versione del modello calibrata sono stati utilizzati per simulare un ulteriore possibile scenario di utilizzo della risorsa idrotermale, rispetto a quelli simulati in precedenza (Regione Lazio 2008-2010). La simulazione ha previsto un ulteriore *stress period* (SP 5) in stato stazionario, dove rispetto al precedente SP 4 è stato variato lo schema dei prelievi dal TA, a parità di altre condizioni. Lo schema dei prelievi imposti è riportato in Tabella 8.

Tab. 8 Portate di prelievo dal TA ipotizzate nello SP 5 per i pozzi delle diverse concessioni.

Concessione	Portata assegnata (L/s)	Tipo di prelievo
Pozzo Bacucco	4	Pompaggio
Pozzo Sant'Albino	6	Pompaggio
Pozzo Gigliola	10	Pompaggio
Pozzi Paliano	15	Pompaggio
Pozzo Oasi	8	Pompaggio
Pozzo Bagnaccio	2	Erogazione
Pozzetto Terme dei Papi	cfr. Tab.9	Erogazione

La deformazione piezometrica indotta dallo schema applicato mostra una situazione sostanzialmente invariata per il *layer 1*, cioè il SA; mentre per il *layer 3*, cioè il TA, si riscontrano variazioni significative della morfologia piezometrica (Fig. 28), in particolare nel settore N e S, se confrontata con la piezometria dello SP 4 (Fig. 25d).

Gli effetti della ipotesi di prelievo dal TA sulle portate in uscita dalle emergenze idrotermali, cioè sorgenti e Pozzetto in erogazione spontanea, sono riassunti in Tabella 9. Questi risultati si riferiscono alle ipotesi di chiusura dei pozzi Danti, Zitelle e S. Valentino.

Tab. 9 Portate in uscita dalle emergenze idrotermali simulate nello SP 5.

Emergenza termale	Portata (L/s)	Tipo di uscita
Pozzo Mercatone	0	Portata residua
Pozzo Danti	0	Chiuso
Laghetto Bagnaccio	1.8	Portata residua
Sorgente Zitelle	6	Portata residua
Pozzo Zitelle	0	Chiuso
Sorgente Carletti	1.8	Portata residua
San Valentino	0	Chiuso
Sorgente Bullicame	8.8	Portata residua
Sorgente S. Caterina	1.6	Portata residua
Pozzetto Terme dei Papi	24	Portata residua
Pozzo Uliveto	0	Portata residua
Sorgente San Cristoforo	0.7	Portata residua
Sorgenti Gruppo Asinello	1.2	Portata residua
Pozzo San Sisto	2	Portata residua

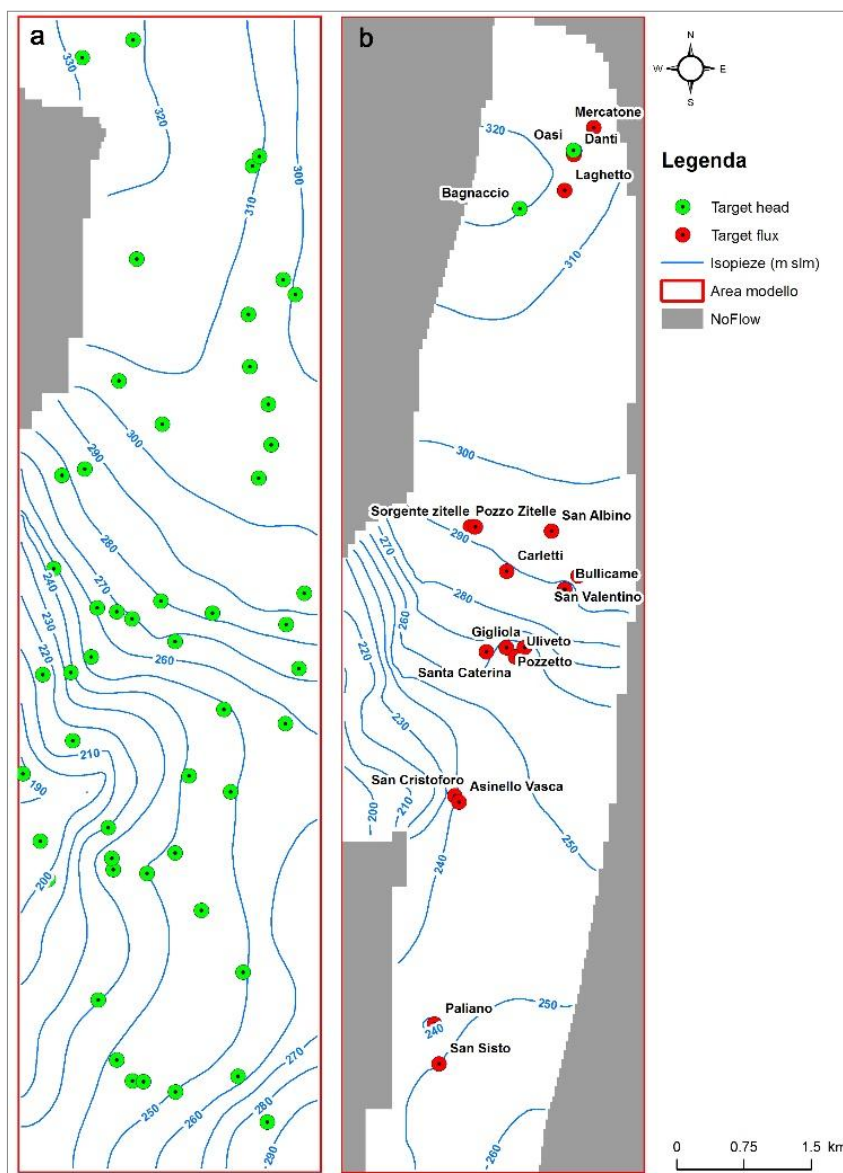


Fig. 28 Piezometria del layer 1 nello SP 5 (a) e del layer 3 nello SP 5 (b).

Come per lo SP 4, anche per lo SP 5 è stata verificata l'entità dei flussi in ingresso e in uscita dal sistema. La simulazione del bilancio complessivo presenta un errore pari a 0.72 % e le voci del bilancio che intervengono sono schematizzate in Tabella 10.

Tab. 10 Bilancio del modello per lo scenario di prelievo simulato dallo SP 5.

Voci del bilancio	Layer 1		Layer 3		Modello	
	Entrate (m ³ /s)	Uscite (m ³ /s)	Entrate (m ³ /s)	Uscite (m ³ /s)	Entrate (m ³ /s)	Uscite (m ³ /s)
RCH	0.159				0.159	
Flussi attraverso il layer 2	0.154	0.032	0.020	0.153		
<i>Drain</i>		0.101		0.051		0.152
<i>Well</i>				0.043		0.043
GHB	0.006	0.182			0.006	0.193
Ricarica dal basso			0.227		0.227	
TOTALE	0.319	0.316	0.247	0.247	0.392	0.389
Discrepanza						0.72 %

Dal confronto del bilancio relativo allo SP 5 con quello dello SP4 (cfr. Tab. 7 e 10), risulta una diminuzione del flusso dal TA verso il SA attraverso l'aquitard (di circa l'11 %) e delle uscite laterali dal SA (di circa l'8 %) in risposta dell'incremento delle uscite da pozzi e sorgenti del TA da 73 L/s dello SP 4 a 94 L/s dello SP 5.

Anche quest'ultima simulazione di prelievi dal TA, così come le precedenti (Regione Lazio 2008-2010), essendo ricavata da una modellazione numerica basata su un monitoraggio piezometrico e delle portate carente in termini temporali, è da considerare una prima approssimazione al reale comportamento del sistema. Ulteriori affinamenti sulla base dei dati disponibili non sono possibili.

Nello specifico, alla base delle modellazioni sono stati considerati i seguenti assunti:

- i carichi idraulici del SA misurati nel 2008-2009 sono rappresentativi del periodo 2007-2015;
- la piezometria del SA si riferisce a condizioni non perturbate dai prelievi idrici dal SA;
- la ricarica diretta del SA è stata omogeneamente distribuita sul sistema;
- le misure di flusso disponibili sono rappresentative dei periodi esaminati ed in alcuni casi, laddove per un intero periodo non erano disponibili misure di portata, è stata considerata rappresentativa la portata del periodo precedente;
- la distribuzione della ricarica dal basso del TA non è stata oggetto di calibrazione specifica.

Riguardo all'ultimo punto si sottolinea che ponendo la portata della ricarica dal basso sotto una certa soglia (190 L/s), il nuovo modello non raggiunge la convergenza. Quindi, anche se

ulteriori fasi della modellazione con diverse possibili distribuzioni della ricarica dal basso avrebbero potuto fornire un maggior grado di affidabilità di tale stima, alla scala dell'intero sistema si ricava, rispetto alle precedenti modellazioni (Regione Lazio 2008-2010; Baiocchi et al. 2013), un valore minimo (190 L/s) ed uno massimo del parametro (227 L/s).

7. Uso sostenibile delle acque sotterranee

Alla scala di bacino sotterraneo o di una parte di esso, in condizioni naturali, cioè in assenza di qualsiasi prelievo idrico dal sottosuolo (condizioni di *pre-development*), prevale un equilibrio in stato stazionario in cui, in termini di bilancio medio annuo, la ricarica naturale R_0 è pari alla portata naturale in uscita D_0 :

$$R_0 - D_0 = 0 \quad (1)$$

Se si introduce un prelievo di acque sotterranee mediante pompaggio il sistema raggiungerà un nuovo equilibrio. Se R_0 e D_0 non cambiano durante l'applicazione del prelievo, inizialmente il sistema attraverserà una fase transitoria che può essere descritta dalla seguente relazione:

$$(R_0 + \Delta R) - (D_0 - \Delta D) - Q = \Delta V / \Delta t \quad (2)$$

La relazione (2) esprime il fatto che il pompaggio di Q dal sistema è bilanciato da un aumento della ricarica naturale ΔR , una diminuzione delle uscite naturali ΔD , una diminuzione del volume di immagazzinamento ΔV nell'intervallo di tempo Δt , o una combinazione di questi fattori. Sostituendo la (1) nella (2), la fase transitoria è rappresentata dalla seguente relazione:

$$\Delta R - \Delta D - Q = \Delta V / \Delta t \quad (3)$$

Dopo un periodo di tempo, il sistema raggiunge un nuovo equilibrio in condizioni stazionarie quando $\Delta V / \Delta t = 0$, risultando quindi $\Delta R + \Delta D = Q$. In questa nuova condizione stazionaria, la portata di pompaggio deriva dalla somma di $(\Delta R + \Delta D)$, anche chiamata *cattura*, comprendente una diminuzione del volume di immagazzinamento rispetto alle condizioni naturali iniziali. Il raggiungimento di questa nuova condizione di stato stazionario e la durata della fase transitoria del sistema dipendono dalla risposta dell'acquifero al pompaggio (Lohman 1972; Bredehoeft 1997; Sophocleous 1997).

La risposta dell'acquifero al pompaggio è una funzione della diffusività idraulica Tr/S (dove Tr è la trasmissività e S è il coefficiente di immagazzinamento) e della distanza x del centro di pompaggio dal limite che può essere catturato. Con riferimento l'inverso del numero di Fourier Nf , espresso come:

$$\frac{1}{Nf} = \frac{\left[\frac{x^2 S}{4 Tr} \right]}{t} = \frac{t_c}{t} \quad (4)$$

dove t_c è la costante tempo caratteristica dello specifico acquifero e t è il tempo del pompaggio, l'abbassamento piezometrico evidenzierà solo un debole incremento nel tempo quando t diventa significativamente maggiore di t_c (per esempio, per $t > 10^3 t_c$), indicando quindi il raggiungimento del nuovo stato stazionario. In altri termini, la durata della fase transitoria ha una breve durata per ridotte distanze x del limite da catturare, per ridotti valori del coefficiente di immagazzinamento S e per alti valori della trasmissività Tr . Queste ultime due condizioni si ritrovano generalmente per gli acquiferi confinati, piuttosto che per quelli liberi (Domenico e Schwartz 1990).

Quindi, tutti i prelievi tramite pompaggio inizialmente comportano una fase di riduzione dell'immagazzinamento dell'acquifero; anche a cattura avvenuta, risulta una riduzione dell'immagazzinamento dell'acquifero rispetto alle condizioni iniziali. Se la zona di pompaggio è lontana dal limite delle uscite naturali o l'acquifero ha un elevato S ed una bassa Tr , la condizione di flusso transitorio sarà prolungata ed il volume di acqua pompata deriverà principalmente dall'immagazzinamento dell'acquifero. Inoltre, quando la portata di pompaggio è superiore alle uscite naturali dal sistema, l'acqua emunta viene fornita dal volume di immagazzinamento e dipende esclusivamente dal suo tempo di esaurimento.

Sulla base delle precedenti definizioni, si può introdurre il concetto di portata di prelievo sostenibile, concetto questo che deriva da una lunga evoluzione di diversi termini, che hanno origine dal concetto di *safe yield* per arrivare a quello di *sustainable yield* (per esempio, Sophocleous 2000). Una definizione del concetto di prelievo sostenibile è stato formulato da Evans e Cook (2002), secondo i quali la "*sustainable yield* è il regime di estrazione delle acque sotterranee, misurato su uno specifico riferimento temporale, che permette un accettabile livello di stress nell'acquifero e protegge gli usi che dipendono dalle acque".

Il concetto di portata di prelievo sostenibile al quale si fa riferimento in seguito è quello riportato più recentemente da Kalf e Woolley (2005). Gli autori introducono il concetto di *basin maximum sustainable yield*, che può essere espresso dalla seguente equazione:

$$(R_0 + \Delta R_{ms}) = Q_{ms} \quad (5)$$

dove la portata di prelievo Q_{ms} è il *basin maximum sustainable yield* e $(R_0 + \Delta R_{ms})$ è la massima quantità di ricarica del bacino. Questo concetto è simile a quello del *maximum stable basin yield* introdotto da Freeze e Cherry (1979).

Il prelievo della portata Q_{ms} , corrispondente al *basin maximum sustainable yield*, implica un nuovo stato stazionario del sistema che viene raggiunto dopo un tempo t_{ms} ed è caratterizzato da flussi residui in uscita pari a zero ($D_0 - \Delta D = 0$) e nessuna ulteriore riduzione

dell'immagazzinamento oltre il ΔV_{ms} , corrispondente quest'ultimo al *maximum sustenance storage*. Per ogni ulteriore quantità di pompaggio superiore a Q_{ms} , il prelievo dal sistema diventa insostenibile nel lungo termine, poiché i volumi delle acque di pompaggio deriveranno esclusivamente dall'immagazzinamento e produrranno una progressiva riduzione delle riserve dell'acquifero. Qualsiasi portata di prelievo Q_{sus} inferiore a Q_{ms} è sostenibile, in quanto implica un flusso residuo in uscita dal sistema D_s diverso da 0:

$$(R_0 + \Delta R) = Q_{sus} + D_s \quad (6)$$

Per queste condizioni, inoltre, il nuovo equilibrio tra flussi in entrata ed in uscita dal sistema viene raggiunto ad un tempo inferiore a t_{ms} , con una riduzione dell'immagazzinamento allo stato stazionario inferiore a ΔV_{ms} (Kalf e Woolley 2005).

A prescindere dal precedente esame, che considera solo la risposta dell'acquifero al pompaggio, la definizione della Q_{sus} deve comunque considerare molti altri vincoli, come gli abbassamenti piezometrici indotti, la qualità delle acque, i rapporti acque superficiali - acque sotterranee ed i relativi vincoli ecologici.

7.1 Valutazione della portata di prelievo sostenibile delle acque termali di Viterbo

Una valutazione della portata di prelievo sostenibile delle acque termali di Viterbo è stata precedentemente condotta (Regione Lazio 2008-2010) sulla base dei metodi suggeriti da Mandel e Shiftan (1981) e Kalf e Woolley (2005). E' stata in particolare adottata la seguente procedura:

1. definizione della potenzialità media del sistema idrotermale;
2. identificazione dei vincoli più stringenti per l'uso delle risorse idrotermali, al fine di contenere gli "effetti inaccettabili" correlati con i prelievi dal sottosuolo;
3. definizione dei livelli di prelievo idrotermali massimi "accettabili";
4. valutazione della quantità di uscite naturali all'equilibrio, quando i livelli di prelievo massimo delle acque termali saranno raggiunti;
5. definizione della portata sostenibile sulla base della differenza tra potenzialità media del sistema idrotermale (punto 1) ed uscite naturali all'equilibrio (punto 4).

Per la definizione della potenzialità del sistema idrotermale, facendo riferimento ai risultati della valutazioni effettuate su base analitica, è stata considerata una potenzialità complessiva cautelativa dell'acquifero termale di circa 150 L/s (Regione Lazio 2008-2010).

I vincoli più stringenti per l'uso delle risorse idrotermali, considerati al fine di contenere gli "effetti indesiderabili" correlati con i prelievi dal sottosuolo, sono stati i seguenti:

- a) mantenere le caratteristiche di qualità delle acque termali e delle acque dell'acquifero superficiale, utilizzate queste ultime ai fini irrigui e domestici;
- b) contenere gli effetti sull'equilibrio idrogeologico esistente tra l'acquifero termale e l'acquifero superficiale;
- c) assicurare una portata significativa alle sorgenti termali "storiche";
- d) assicurare la qualità e la portata delle sorgenti fredde utilizzate ai fini potabili.

Per la definizione dei prelievi idrotermali massimi, è stato considerato che per lo sviluppo del termalismo dell'area sarebbe auspicabile fornire alle diverse concessioni presenti il massimo della portata possibile, compatibilmente con le influenze indotte dai prelievi sul mantenimento della qualità e della quantità delle risorse idrotermali. In tal senso, livelli di prelievo massimi "accettabili" possono essere individuati facendo riferimento a due punti essenziali e di sintesi:

- a) relazione tra prelievi e variazione del potenziale dell'acquifero idrotermale;
- b) risposta del sistema per raggiungere l'equilibrio, allorché è definito il livello di prelievo massimo "accettabile".

Questi aspetti, in realtà sono stati valutati per le diverse zone del sistema attraverso il secondo modello matematico di flusso, simulando diversi scenari di prelievo (Regione Lazio 2008-2010).

Per la definizione della quantità di uscite naturali dal sistema idrotermale all'equilibrio, cioè quando saranno raggiunti i livelli massimi di prelievo dall'acquifero termale, è stato assunto che le uscite naturali verso le sorgenti e verso i torrenti devono essere mantenute, compatibilmente con le inevitabili interferenze prodotte dai prelievi di acque termali attraverso pozzi. Nella valutazione è stata stimata quale portata residuale verso le sorgenti termali una media annua di 35 L/s. E' stato invece considerato che le uscite naturali dall'acquifero termale verso l'acquifero superficiale potranno subire un decremento (fino a 45 L/s come media annua, rispetto a quelli stimati dal primo modello di flusso di circa 80 L/s), in vista di una nuova pianificazione finalizzata al rilancio del termalismo nell'area e, quindi, per il raggiungimento dei livelli di prelievo massimi "accettabili".

Sulla base di queste valutazioni, è stata definita la portata di prelievo sostenibile dalla differenza tra potenzialità media del sistema idrotermale (stimate in circa 150 L/s) ed uscite naturali residuali all'equilibrio (stimate complessivamente in circa 80 L/s), cioè 70 L/s. Questo valore di prelievo è stato definito quale quello da attribuire globalmente alle

captazioni mediante pozzi che intercettano le acque termali con temperatura superiore a 30 °C nell'intera area idrotermale di Viterbo (Regione Lazio 2008-2010).

7.2 Ulteriori valutazioni sul prelievo sostenibile dell'area idrotermale di Viterbo

Ulteriori valutazioni sul prelievo idrico sostenibile per il sistema idrotermale di Viterbo sono state condotte nel corso di questo studio, valutando i risultati delle più approfondite e recenti stime sulla potenzialità delle risorse idriche sotterranee dell'area. Queste derivano dalle recenti modellazioni del flusso e del trasporto di calore (Baiocchi et al. 2013), dall'ultimo modello di simulazione numerica (cfr. par. 6) e dall'analisi dell'andamento delle portate delle manifestazioni idrotermali nel tempo (cfr. par. 5.2).

La nuova valutazione è stata comunque condotta alla scala dell'intero sistema e facendo riferimento in particolare al TA, ciò al fine di ottenere elementi utili per una futura gestione unitaria delle risorse idrotermali del sistema.

E' stata applicata la relazione (6) al TA, esplicitando i singoli termini.

Il termine R_0 , corrispondente con la ricarica in condizioni naturali del TA, è stato valutato nelle diverse analisi indirettamente. Esso dal secondo modello di flusso calibrato (Regione Lazio 2008-2010) è stato stimato in 176 L/s; nel terzo modello di flusso calibrato (Baiocchi et al. 2013) risulta un valore di 199 L/s.

Il termine ΔR rappresenta il possibile aumento della ricarica naturale indotta dal pompaggio dai pozzi di acqua termale attivi nelle condizioni *under-development*, cioè da quando sono entrati in funzione i pozzi per ricerche geotermiche, ovvero da quando questi danno luogo a portate residuali dopo la loro parziale cementazione (per esempio, i pozzi S. Sisto e Zitelle), ed i pozzi degli stabilimenti termali. La produzione da questi pozzi abbassando localmente il carico idraulico possono aver innescato un incremento del gradiente idraulico con la zona di ricarica e quindi un incremento ΔR . Tuttavia non sono disponibili elementi per questa valutazione e per il principio di cautela il termine può essere considerato uguale a zero nella (6).

Il termine D_s rappresenta il flusso di acque termali residuo in uscita dal sistema in condizioni *under-developement*, cioè quando il sistema ha raggiunto le nuove condizioni stazionare dopo l'impatto dei prelievi idrici dal TA. Questo termine, come detto in precedenza, deve essere in generale diverso da zero ed il suo valore è condizionato da diversi vincoli ambientali, idrogeologici, idrochimici. Nel caso specifico, già si è sottolineato nelle precedenti valutazioni (cfr. par. 7.1) che i vincoli da considerare sono la qualità delle acque

termali, la valenza naturalistica, storica e ambientale di alcune delle sorgenti storiche ed i flussi verso i torrenti.

Il mantenimento della qualità delle acque termali è anche condizionato dai flussi tra il TA ed il SA. Dai modelli di flusso e trasporto (Baiocchi et al. 2013) e dalle prove di pompaggio (Regione Lazio 2008-2010; Baiocchi et al. 2012; 2013), risulta che i pompaggi dal SA possono incrementare i flussi verticali dal TA. Quindi un vincolo è quello di non alterare gli equilibri piezometrici tra i due acquiferi sovrapposti e limitare i prelievi dal SA, soprattutto nei settori settentrionale e centrale dell'area, dove l'equilibrio idrodinamico lungo la verticale è più fragile. I flussi dal TA verso il SA (Q_{SA}) stimati dal secondo e dal terzo modello di flusso calibrati indicano valori rispettivamente di 111 e 89 L/s. Le stesse modellazioni indicano che anche riducendo del 40 % il flusso dal TA verso SA non si avrebbe l'inversione del gradiente idraulico verticale che porterebbe ad un decadimento della qualità delle acque termali (cfr. Fig. 14).

Alla precedente componente di D_s , bisogna aggiungere le uscite residuali verso le sorgenti di valenza naturalistica, storica e ambientale. Le considerazioni in merito esulano da una valutazione esclusivamente idrogeologica, ma richiederebbe il contributo di idee e proposte da parte dei diversi gruppi di interesse. Comunque, considerando i gruppi sorgivi del Bagnaccio, le sorgenti Zitelle, Bullicame, Carletti e S. Caterina ed il gruppo Asinello – S. Cristoforo, oltre ad alcune venute di acque termali diffuse e lineari, è stata stimata in 35 L/s la portata residua (Q_{rs}) complessiva di acque termali dalle sorgenti naturali del sistema (Regione Lazio 2008-2010).

Facendo riferimento alle stime del terzo modello di flusso (Baiocchi et al. 2013), risulta che dal sistema, comprendente sia il TA che il SA, ulteriori uscite, pari a 30 L/s, sono verso i torrenti (Q_{tr}), tali uscite derivano sia dal TA sia dal SA. Comunque si tratta di flussi da conservare.

In definitiva, riferendosi omogeneamente alle stime del terzo modello di flusso calibrato (Baiocchi et al. 2013), si possono assumere le seguenti quantità per il TA:

- $R_0 = 199$ L/s
- $Q_{rs} = 35$ L/s
- $Q_{tr} = 30$ L/s
- $Q_{SA} = 89$ L/s

quindi:

$$D_s = Q_{rs} + Q_{tr} + 0.6 Q_{SA} = 118 \text{ L/s}$$

e di conseguenza la portata di prelievo sostenibile di acque termali attraverso pozzi da tutto il sistema è:

$$Q_{sus} = R_0 - D_s = 81 \text{ L/s}$$

Questa stima di prelievo sostenibile è superiore a quella effettuata precedentemente (Regione Lazio 2008-2010), cioè 70 L/s.

In definitiva, dalle diverse valutazioni condotte risulta che la portata di prelievo sostenibile di acque termali dal sistema mediante pozzi è compresa tra 70 e 80 L/s circa.

Proprio il valore minimo di portata di prelievo sostenibile dal TA risultante dalle stime condotte è stato oggetto delle verifiche del nuovo modello di flusso costruito per il presente studio (cfr. par. 6.3). In particolare, dalle nuove simulazioni è risultato che, imponendo una portata di prelievo di 69 L/s dal TA mediante pozzi (Bacucco, S. Albino, Gigliola, Paliano, Oasi, Bagnaccio e Pozzetto), la portata residuale dalle sorgenti “naturali” è di circa 25 L/s con una riduzione dei flussi dal TA verso il SA di circa l’11 % e dei travasi laterali dal SA verso l’esterno del sistema dell’8 % (cfr. par. 6.3). I flussi dal TA verso il SA restano dunque un’aliquota significativa della potenzialità globale del TA (circa il 62 %) (cfr. Tab. 10). Quindi la portata di prelievo di circa 70 L/s dal TA risulta essere sostenibile anche attraverso le ulteriori simulazioni numeriche condotte nel corso del presente studio, con impatti peraltro contenuti sull’acquifero superficiale.

Per completare la valutazione, dai dati disponibili è possibile anche stimare il tempo necessario per raggiungere le nuove condizioni stazionarie del sistema dopo l’applicazione dei prelievi dal TA mediante pozzi. Questo tempo è ricavabile dalla relazione (4). Una valutazione in tal senso è stata condotta facendo riferimento alle singole zone dove insistono le concessioni per prelievi mediante pozzi dell’area idrotermale, cioè la zona meridionale, dove sono localizzati i pozzi di Paliano, quella centrale, dove sono localizzati i pozzi delle Terme di Papi, INPS e Salus, e quella settentrionale, dove insistono i pozzi Bagnaccio, Oasi e Bacucco. Come si può notare dalla relazione (4), il tempo di cattura in cui permane uno stato transitorio è funzione della distanza del limite da catturare e della diffusività idraulica. I parametri per determinare la diffusività idraulica sono stati ricavati dalle prove di pompaggio relative al TA (cfr. par. 3). La distanza del limite da catturare è stata valutata zona per zona.

Per la zona meridionale, il centro di pompaggio di Paliano è distante circa 2500 m dal gruppo sorgivo S. Cristoforo – Asinello e dal limite occidentale dei flussi in uscita dal sistema. Assumendo valori di Tr e di S rispettivamente di $1 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ e 2×10^{-4} , cioè quelli ricavati dalle prove di pompaggio effettuate sul Pozzo Paliano 2 (Regione Lazio 2008-2010), e la

stabilizzazione dell'abbassamento per $t > 10^3 t_c$, risulta un tempo per raggiungere il nuovo stato stazionario di circa 10 anni.

Per la zona centrale, una prima valutazione è stata condotta per stimare il tempo di cattura della Sorgente Bullicame da parte dei pozzi presenti negli stabilimenti Terme dei Papi e INPS, che distano dalla scaturigine circa 1000 m. Assumendo valori di Tr e di S rispettivamente di $4 \times 10^{-3} \text{ m}^2/\text{s}$ e 4×10^{-4} , cioè quelli ricavati dalle prove di pompaggio effettuate sul Pozzetto (Regione Lazio 2008-2010), e la stabilizzazione dell'abbassamento per $t > 10^3 t_c$, si ricava un tempo per raggiungere il nuovo stato stazionario inferiore ad 1 anno. Se si considera la distanza del Pozzo S. Valentino dalla Sorgente Bullicame (circa 200 m), risulta un tempo di cattura inferiore a 12 giorni. Infine considerando la distanza del Pozzo Zitelle dalla Sorgente del Bullicame (circa 1200 m), si calcola un tempo di cattura di circa 1 anno.

Per la zona settentrionale, considerando la distanza della zona di ubicazione dei pozzi Bagnaccio e Oasi dalla Sorgente del Bullicame (circa 4700 m), adottando i parametri idrogeologici relativi alla zona centrale (essendo paragonabile la trasmissività determinata per il pozzo Oasi; Baiocchi et al. 2012; 2013), risulta un tempo di cattura di circa 17 anni.

I tempi di cattura precedentemente determinati, oltre a contribuire all'interpretazione delle variazioni di portata delle sorgenti avvenute nel tempo dopo la realizzazione dei pozzi di prelievo delle acque termali, sono indicativi per verificare gli effetti dei futuri prelievi dal TA mediante pozzi. I prelievi mediante pozzi dai settori meridionale e settentrionale avranno effetto sulla portata delle sorgenti e dei flussi in uscita del sistema idrotermale dopo una decina di anni; invece gli effetti dei prelievi dal settore centrale sulla portata della Sorgente Bullicame si avranno in qualche anno.

8. Ipotesi operative per l'utilizzo delle risorse idrotermali dell'area di Viterbo

Dalle analisi condotte in passato (Regione Lazio 2008-2010; Baiocchi et al. 2012; 2013) e da quelle effettuate nel corso di questa ricerca, è evidente che le venute di acque termali dell'area di Viterbo afferiscono ad un unico sistema idrogeologico. Le evidenze dell'unicità del sistema idrogeologico derivano, oltre che dalle modellazioni numeriche condotte, dalle prove di pompaggio effettuate sui pozzi di acque termali e dalle interferenze avvenute nel passato e recentemente tra portata delle sorgenti "naturali" e prelievi dai pozzi. A tale proposito si cita, solo a titolo di esempio, l'ultimo caso di interferenza avvenuto dopo i "lavori" effettuati al Pozzo S. Valentino nel novembre del 2014 e la contestuale riduzione di portata della Sorgente Bullicame (circa 2.5 L/s nell'aprile 2016; Tab. 1).

La unicità del sistema idrogeologico implica necessariamente una gestione unitaria dei prelievi delle risorse idrotermali. Una gestione unitaria del sistema è imprescindibile dall'adozione di una programmazione strategica di tutela e salvaguardia da definire alla scala di sistema, alla quale dovrà essere necessariamente affiancato un adeguato sistema di monitoraggio e controllo.

Di seguito sulla base delle valutazioni analitiche e numeriche condotte e tenendo conto dei più moderni concetti di portata sostenibile precedentemente esaminati (cfr. par. 7), viene proposto un Programma Operativo di Utilizzo delle risorse idrotermali dell'area di Viterbo (denominato in seguito POU).

Il POU, così come accennato a proposito del concetto di portata sostenibile, parte da presupposti non solo idrogeologici, ma che implicano anche considerazioni di carattere economico, legale e sociale. I presupposti considerati nel POU sono i seguenti:

- a) tra i diversi usi delle risorse idriche sotterranee dell'area, si ritengono prioritari quelli per lo sviluppo del termalismo dell'area e per uso potabile, ciò implica che l'uso delle risorse idriche sotterranee per scopo irriguo è ritenuto non prioritario;
- b) i prelievi di acque termali per le concessioni definiti in seguito sono quelli massimi possibili, ciò implica che il sistema all'applicazione del POU, così come già successo in passato, reagirà a lungo termine con una variazione delle portate in uscita dal sistema stesso, quindi inizialmente si avrà una fase transitoria;
- c) i pozzi per ricerche geotermiche realizzati in passato e che attualmente danno luogo a flussi idrotermali residuali, ma che non sono oggetto di concessione (per esempio, i

- pozzi S. Sisto e Zitelte), non essendo riconducibili a sorgenti naturali, non rappresentano oggetto di particolare attenzione ai fini della conservazione delle loro portate;
- d) le concessioni minerarie ed i permessi di ricerca di acque termali sono quelle attualmente depositate presso la Regione Lazio;
 - e) l'attuazione del POU prevede una collaborazione tecnico-amministrativa tra gli enti territoriali competenti in materia di risorse idriche ed uso del suolo (Regione Lazio, Provincia di Viterbo e Comune di Viterbo).

Con questi presupposti si possono definire i caratteri idrogeologici del POU alla scala dell'intero sistema ed alla scala dei diversi settori.

Alla scala dell'intero sistema, il prelievo annuo di acque termali mediante i pozzi delle concessioni non deve superare una portata media annua di circa 70 L/s, almeno nella prima fase di attuazione del POU. Questo valore di portata media annua risulta essere cautelativo dalla valutazioni analitiche della portata di prelievo sostenibile (cfr. par. 7.2). La sostenibilità di questa portata di prelievo sul sistema è stata verificata attraverso l'ultima simulazione numerica del flusso (cfr. par. 6.3).

La ripartizione delle portata complessiva di prelievo di acque termale tra i diversi settori è proposta in funzione dell'ubicazione dei pozzi delle concessioni, della loro distanza dai limiti che saranno "catturati", comprendenti le zone dove si ha l'uscita dei flussi di acque termali (sorgenti naturali, incrementi di portata in alveo e limiti di alimentazione laterale del SA), e facendo riferimento agli scenari di prelievo simulati in precedenza (Ipotesi IV, in Regione Lazio 2008-2010) ed a quello appositamente simulato nel corso del presente studio (cfr. par. 6.3). I settori considerati sono quello meridionale, dove sono presenti i pozzi della concessione Paliano, quello centrale, dove sono presenti i pozzi delle Terme dei Papi, INPS e Salus, e quello settentrionale, dove sono presenti i pozzi Bagnaccio, Oasi e Bacucco.

Per il settore meridionale, la portata di prelievo media annua massima di acque termali da pozzi può essere compresa tra 15 e 20 L/s. Questi prelievi a lungo termine cattureranno parte dei flussi del TA attualmente diretti verso i torrenti Freddano e Farine, il gruppo sorgivo S. Cristoforo-Asinello, il limite SO del sistema idrogeologico e l'area di S. Sisto. Quindi come simulato attraverso le modellazioni del flusso gli attuali recapiti delle acque termali subiranno un decremento delle loro portate. I tempi di cattura presumibili sulla base dei parametri idrogeologici noti per questa zona saranno di circa dieci anni per la cattura del limite più distante.

Per i settori centrali e settentrionale, conseguentemente, la portata media annua massima di prelievo di acque termali da pozzi può essere compresa tra 50 e 55 L/s. In questo caso, i prelievi a lungo termine cattureranno parte dei flussi di acque termali attualmente diretti da questi settori verso Sud. In particolare, i prelievi di acque termali dai pozzi nel settore settentrionale influiranno a lungo termine principalmente sui recapiti naturali di acque termali e sui prelievi da pozzi praticati nel settore centrale, dove la densità dei pozzi di captazione e delle sorgenti naturali di valenza storica, culturale e sociale è certamente la più alta del sistema.

Nell'ipotesi di una portata media annua massima di prelievo di acque termali dai pozzi del settore settentrionale compresa tra 14 e 15 L/s, sarebbe disponibile per il settore centrale una portata media annua massima di acque termali da pozzi compresa tra 35 e 41 L/s. In questa ipotesi, per i pozzi Bagnaccio, Oasi e Bacucco sarebbero quindi disponibili complessivamente da 14 a 15 L/s come portata media annua massima e per i pozzi delle Terme dei Papi, INPS e Salus sarebbero disponibili complessivamente da 35 a 41 L/s come portata media annua massima. I prelievi dai pozzi Bagnaccio, Oasi e Bacucco influiranno a breve termine sulle locali emergenze idrotermali di limitata portata (pozzi Danti e Mercatone, per esempio), mentre a lungo termine influiranno sulle venute idrotermali del settore centrale (circa 20 anni). Nel settore centrale, i prelievi dai pozzi delle Terme dei Papi, INPS e Salus influiranno a breve termine sulla portata delle locali venute idrotermali, che includono importanti recapiti naturali (quale la Sorgente Bullicame) e non naturali (quale il Pozzo Zitelle). D'altra parte, queste interferenze sono documentate per il passato (quando furono perforati i pozzi S. Sisto, Zitelle e Bagnaccio; Camponeschi e Nolasco 1984) e in parte osservabili attualmente, se si considera la portata della Sorgente Bullicame dopo i lavori condotti al Pozzo S. Valentino (cfr. par. 5.1).

Mentre nei settori meridionale e settentrionale la distribuzione delle opere di presa mediante pozzi delle concessioni non è concentrata, nel settore centrale bisognerà porre particolare attenzione nel prelievo mediante pozzi, in quanto le interferenze saranno immediate quando tutte le portate previste dal POU saranno applicate. D'altra parte, un ridotto tempo di cattura, permetterà una più rapida verifica delle ipotesi del POU per questo settore, rappresentando quindi un collaudo del programma stesso.

Il POU precedentemente ipotizzato non richiede particolari adeguamenti tecnici per le attuali opere di captazione delle concessioni dei settori meridionale e settentrionale.

Per il settore meridionale, le prove effettuate ai pozzi Paliano indicano che è possibile prelevare una portata media annua massima compresa tra 15 e 20 L/s. Attualmente il Pozzo Paliano 1 eroga naturalmente circa 9 L/s (Tab. 1); un incremento di portata, utilizzando per esempio il Pozzo Paliano 2, implicherebbe una nuova fase transitoria di cattura dei limiti.

Per il settore settentrionale, i pozzi Bagnaccio e Oasi possono erogare naturalmente portate fino a 10 L/s ciascuno. Il Pozzo Bacucco è dotato di elettropompa per il sollevamento delle acque termali e dalle prove eseguite dai gestori risulterebbe una portata di esercizio di circa 6 L/s. Nel complesso questi pozzi possono quindi prelevare una portata media annua massima compresa tra 14 e 15 L/s. Attualmente, la loro portata è poco più di 2 L/s (dai pozzi Bagnaccio e Oasi; Tab. 1), quindi l'applicazione del POU implicherebbe una nuova fase transitoria per l'incremento di portata.

Per il settore centrale, attualmente i pozzi delle Terme dei Papi e Salus erogano naturalmente circa 27 L/s (pozzi Pozzetto e S. Valentino; Tab. 1) ed il Pozzo Zitelle circa 9 L/s (dei circa 14 L/s misurati nel 2016 per il gruppo comprendente il Pozzo Zitelle e la "nuova" Sorgente Zitelle; Tab. 1), quindi complessivamente circa 36 L/s, con netta influenza del Pozzo S. Valentino sulla portata del Bullicame. I pozzi dell'INPS invece non erogano naturalmente, come invece avveniva nel passato. Per raggiungere le portate del POU sono quindi necessari degli interventi tecnici, anche per tentare di ripristinare le portate delle sorgenti naturali Bullicame e Zitelle. Una possibile soluzione è la seguente:

- 1) cementazione e sigillatura del Pozzo S. Valentino;
- 2) ri-condizionamento del Pozzo Zitelle, da strumentare e da chiudere mediante saracinesca al boccapozzo;
- 3) tentativo di ripristino delle condizioni di emergenza ante 2013 della Sorgente Zitelle;
- 4) ripristino del Pozzo S. Albino, con approfondimento controllato dell'attuale pozzo e suo ri-condizionamento;
- 5) ripristino del Pozzo Gigliola, attrezzandolo con elettropompa sommersa per il prelievo delle acque termali.

L'attività 1) è un tentativo necessario, ma non garantito, per ripristinare la portata della Sorgente Bullicame. L'attività 2) è finalizzata ad incrementare il carico idraulico del settore centrale, disattivando una portata non naturale del sistema e recuperando quindi circa 9 L/s. L'attività 3) può essere considerata un tentativo di ripristinare le condizioni originarie di portata della Sorgente Zitelle ante 2013, in alternativa alla "nuova" Sorgente Zitelle si applica

una ZT (cfr. Par. 9.3). L'attività 4) è finalizzata alla alimentazione dello stabilimento termale Salus, in previsione della cementazione e quindi disattivazione del Pozzo S. Valentino. L'attività 5) è finalizzata alla alimentazione dell'INPS, con un'opera di presa localizzata all'interno dello stabilimento termale e che limiti l'interferenza con il Pozzetto delle Terme dei Papi.

Nell'ipotesi di questi interventi, l'applicazione del POU implicherebbe, per il settore centrale, una fase transitoria del sistema con un incremento netto di portata, rispetto all'attuale, di 8-14 L/s, se si considera che attualmente circa 27 L/s sono derivati dal Pozzetto e dal Pozzo Zitelle.

La soluzione proposta richiederebbe una progettazione specifica per quanto riguarda gli anzidetti punti 1) – 5) e successive prove di verifica.

In ogni caso il POU definisce le portate medie annue massime per i singoli settori che sono da intendersi in termini di volumi annui di prelievo come riportato nella Tabella 11. Ciò implica che dietro presentazione di uno specifico cronoprogramma dei prelievi da parte del singolo utente concessionario sarà possibile concedere periodi di prelievo con portate superiori a quelle definite, nel rispetto però dei volumi di prelievo annuo massimi per settore, cioè quelli riportati in Tabella 11.

Tab. 11 Ipotesi di prelievo dai pozzi di acque termali del POU.

Settore	Portata media annua massima (L/s)	Volumi annui massimi ($\times 10^6 \text{ m}^3$)	Pozzi di captazione
Settentrionale	14-15	0.441-0.473	Bagnaccio, Oasi, Bacucco
Centrale	35-41	1.104-1.293	Pozzetto, S. Albino, Gigliola
Meridionale	15-20	0.473-0.631	Paliano
Totale per il sistema	70	2.207	

E' ovvio che, nell'applicazione del valore massimo dell'intervallo di portata e di volume di Tabella 11 per un determinato settore, di conseguenza negli altri settori bisogna applicare il valore minimo dell'intervallo, tale che la somma di portata e di volume dei tre settori non superi, rispettivamente, i 70 L/s e $2.207 \times 10^6 \text{ m}^3/\text{anno}$.

9. Salvaguardia delle risorse idrotermali del sistema di Viterbo

Come detto in precedenza (cfr. par. 7 e 8), una corretta gestione delle risorse idrotermali del sistema di Viterbo è strettamente connessa con l'adozione di misure per la salvaguardia delle acque sotterranee, che nel caso specifico è complicata dalle possibili interazioni tra le risorse dei due acquiferi sovrapposti, utilizzate peraltro per scopi diversi. Questi aspetti sono esaminati di seguito, partendo dal quadro normativo e proponendo poi, sulla base delle caratteristiche idrogeologiche specifiche dell'area, un programma di tutela delle risorse idriche sotterranee.

9.1 Quadro normativo di riferimento

La protezione e la salvaguardia delle acque termali è regolata in Italia dalla normativa regionale. Alcune definizioni di carattere generale importanti nel tema della salvaguardia, si ritrovano comunque nella normativa di valenza nazionale. Tra queste, nella Legge 323 del 24.10.2000, all'Art. 2 vengono definite "acque termali" le acque minerali naturali utilizzate a fini terapeutici, e "territori termali" i territori dei comuni nei quali sono presenti una o più concessioni minerarie per acque minerali e termali.

La Legge Regionale del Lazio 90 del 26.6.1980, all'Art. 10 definisce le "Zone di Protezione" delle manifestazioni di acque termali come di seguito:

"Costituiscono zone di protezione igienico-sanitaria le estensioni territoriali che sono necessarie per la salvaguardia dei requisiti geologici e igienico-sanitari delle sorgenti. Costituiscono zone di protezione ambientale le estensioni territoriali che sono necessarie per la salvaguardia, la conservazione e la qualificazione delle sorgenti. Le delimitazioni di tali aree nelle more della redazione e adozione del piano di cui all'articolo 36, risulteranno in ogni caso nel provvedimento di concessione. Le delimitazioni così effettuate costituiranno agli effetti dell'articolo 38 stralcio di piano e i comuni interessati dovranno adeguarvisi con le procedure ivi previste entro quattro mesi dalla deliberazione della Giunta Regionale del provvedimento di concessione."

Altri esempi di normativa al riguardo possono essere desunti da quelle più recenti relative ad altre regioni.

La Regione Campania (L.R. 8/2008, Art. 9) stabilisce che le aree di salvaguardia vanno distinte in "Zone di rispetto" e "Zone di protezione ambientale". Le zone di rispetto sono

individuare sulla base di apposito studio idrogeologico presentato dal soggetto richiedente la concessione e ricomprendono le sorgenti, i pozzi ed i punti di presa. Le zone di protezione ambientale ricomprendono le aree di ricarica delle falde, anche all'esterno del perimetro di concessione. Nelle zone di rispetto, necessariamente interne all'area di concessione, da individuarsi in relazione alle situazioni locali di vulnerabilità e rischio per le falde acquifere, sono vietate le attività inquinanti, nonché quelle che possono pregiudicare o alterare le caratteristiche chimiche, chimico-fisiche e batteriologiche della risorsa. Nelle zone di protezione ambientale sono proposte, negli strumenti di pianificazione territoriale, idonee misure relative alla destinazione d'uso del territorio e misure di tutela e salvaguardia delle aree di ricarica.

La Regione Piemonte (L.R. 302/2012, Art. 22) per assicurare la qualità delle acque termali stabilisce aree di salvaguardia da individuarsi mediante specifica indagine idrogeologica, distinguendole in: "Zone di rispetto", costituite da una superficie territoriale minima indispensabile a garantire la certezza di difesa da agenti inquinanti; "Zone di protezione ambientale" della risorsa idrica minerale, di sorgente, e termale, costituite dagli ambiti dei bacini imbriferi relativi alle aree di ricarica delle falde. Le zone di rispetto sono individuate dal Comune competente, che valuta l'apposita proposta di delimitazione presentata dal soggetto concessionario a carico del quale restano, in ogni caso, gli oneri relativi all'acquisto o alle indennità dovute ai proprietari dei terreni interessati da tali aree. Le zone di rispetto sono quindi indicate nel provvedimento di concessione o di rinnovo della concessione. Le zone di protezione sono individuate dalle Province, nell'ambito di un piano territoriale che valuta la compatibilità tra le varie forme e modalità di utilizzazione della risorsa idrica minerale, di sorgente e termale e stabilisce i criteri relativi all'uso ed alla tutela delle risorse termali ed idrotermali nelle aree individuate, formulando specifiche prescrizioni.

Da questa breve rassegna della normativa, è evidente che esistono livelli di salvaguardia delle acque termali relegati a due zone di protezione; questi concetti non cambiano sostanzialmente se si considerano le altre regioni italiane. Le zone di protezione sono aree non esclusivamente connesse con quella di concessione ed a volte implicano anche il coinvolgimento del bacino imbrifero o idrogeologico di afferenza delle acque termali oggetto di captazione. E' chiaro comunque che criteri idrogeologici e soprattutto di difesa della qualità della risorsa idrotermale devono guidare la loro individuazione. La proposta di individuazione delle aree di protezione è generalmente a cura del concessionario, seguita da

una valutazione ed approvazione degli enti territoriali competenti, in primis tra questi le Regioni.

Per quanto riguarda la Regione Lazio, generalmente le prescrizioni formulate per la “Zona di protezione igienico-sanitaria” comprendono:

- per quanto attiene alle attività agricole o zootecniche, il divieto della stabulazione fissa di bestiame da allevamento, nonché la costruzione di ricoveri, stalle o concimaie; il divieto di pascolo di animali eccedente un carico di bestiame minimo ad ettaro, stabilito sulla base di criteri agronomici di conservazione della fertilità naturale del suolo e sulla base di criteri geologici di igienicità della falda sotterranea; il divieto dell'uso di geo-disinfestanti e diserbanti chimici sul terreno; il divieto di spandimento di fertilizzanti, anticrittogamici, insetticidi, chemioterapici, salvo che l'impiego di tali sostanze sia effettuato sulla base delle indicazioni di uno specifico piano di utilizzazione che tenga conto della natura dei suoli, delle colture compatibili, delle tecniche agronomiche impiegate e della vulnerabilità delle risorse idriche sotterranee, preventivamente autorizzato dalla struttura competente in materia mineraria;
- per quanto attiene alle costruzioni, il divieto di costruzione di bacini per la raccolta delle acque (al di fuori delle vasche di fitodepurazione), nonché delle perforazioni di pozzi per la ricerca di acque sotterranee (fatte salve le esigenze di ricerca e utilizzo per scopi minerari autorizzati dalla Regione); la costruzione di strade deve essere effettuata in modo idoneo ad allontanare le acque al di fuori della zona di protezione igienico-sanitaria; la costruzione di fabbricati per uso abitazione ed industriale deve essere attuata tenendo presente le seguenti norme: le fondazioni devono essere del tipo a platea unica continua o fondazione equivalente, le acque scure e chiare devono essere incanalate in fognoli impermeabili di gres, cemento o altro materiale idoneo, contenuti in un controtubo di cemento poggiato su un masso di fondazione o sistemi equivalenti migliorativi, i fognoli devono scaricare le acque scure e chiare al di fuori della zona di protezione igienico-sanitaria, secondo i dettami delle vigenti disposizioni;
- per quanto attiene alle attività produttive o commerciali, il divieto dell'apertura di nuove cave; il divieto di attività e insediamenti industriali, artigianali, zootecnici ed agricoli classificati “insalubri”, dal Decreto del Ministero della Sanità 5 settembre 1994; il divieto di insediamenti di centri di raccolta, demolizione e rottamazione di

autoveicoli e di impianti di trattamento dei rifiuti; il divieto di realizzazione di discariche di qualsiasi tipo, anche se controllate, nonché lo stoccaggio di rifiuti, prodotti reflui, sostanze chimiche pericolose, sostanze radioattive;

- per quanto attiene allo smaltimento di acque o reflui civili, il divieto di insediamento di fognature e pozzi a dispersione (per quelli esistenti il Comune dovrà effettuare una verifica sullo stato attuale di tenuta ed operare il ripristino dei tratti avariati; per le fosse a tenuta, le Autorità sanitarie competenti dovranno verificarne, almeno ogni tre mesi, l'integrità ed il buon funzionamento); il divieto di dispersione, ovvero l'immissione in fossi non impermeabilizzati di reflui, di fanghi e liquami anche se depurati; il divieto di dispersione nel sottosuolo di acque bianche provenienti da piazzali e strade ed in particolare delle acque di prima pioggia.

La Regione Lazio specifica che il titolare della concessione dovrà, inoltre, porre in essere tutte le cautele tecniche atte a proteggere la zona circostante il pozzo di captazione e destinata a parcheggio autoveicoli, dove dovrà essere realizzata una idonea coibentazione atta a evitare infiltrazioni di potenziali inquinanti per la salvaguardia della falda mineralizzata sottostante.

Per quanto riguarda la "Zona di protezione ambientale", la Regione Lazio prescrive il divieto di modificare l'attuale situazione agricola e morfologica, per non recare danno alla conservazione e qualificazione della falda idrominerale alimentante le sorgenti della concessione e che per quanto non espressamente specificato di fare riferimento alle vigenti norme di legge sulla tutela delle acque dall'inquinamento ed, in particolare, a quelle relative alla disciplina delle aree di salvaguardia delle acque superficiali e sotterranee destinate al consumo umano.

Infine la Regione Lazio demanda al comune l'adeguamento degli strumenti urbanistici (ai sensi degli art. 10, 38 e 39 della L.R. 90/80) ai fini dell'accoglimento delle prescrizioni per le zone di protezione e per la vigilanza della loro applicazione.

9.2 Possibili criteri per le Misure di Tutela delle risorse idrotermali di Viterbo

Dal quadro normativo esaminato, è evidente che la delimitazione delle zone di protezione deve essere basata sul contesto idrogeologico nel quale ricadono le venute di acque termali. Più volte è specificato nella normativa che l'obiettivo della zonazione è la salvaguardia della qualità delle risorse idrotermali. Comunque, non sono indicati i metodi da seguire per giungere alla definizione di tali zone e ciò, probabilmente, in ragione delle complessità

specifiche che possono caratterizzare i diversi sistemi idrotermali. Anche dall'esame della letteratura italiana ed internazionale non risultano criteri e metodi, specifici e generali, sulle modalità di definizione delle aree di salvaguardia di sorgenti e pozzi di acque termali a differenza della ampia bibliografia riguardante le applicazioni per le acque potabili.

Nello specifico caso dell'area idrotermale di Viterbo, in relazione alla unicità del sistema idrogeologico, anche le Misure di Tutela delle risorse idrotermali (denominate in seguito MTI) non possono che essere di carattere unitario alla scala dell'intero sistema. Peraltro, come già specificato più volte (Regione Lazio 2008-2009; Baiocchi et al. 2012; 2013), la conservazione della qualità delle risorse idrotermali è funzione della entità dei prelievi delle acque termali ed anche di quelli dell'acquifero superficiale. Ciò implica che le MTI sono conseguenza del POU, nello stesso tempo esse devono considerare l'equilibrio idrogeologico esistente tra i due acquiferi sovrapposti, cioè il SA ed il TA.

Alla base delle MTI, essendo queste una conseguenza del POU, sono ritenuti validi i presupposti a) – e) dello stesso POU (cfr. par. 8).

Un aspetto specifico da considerare per la salvaguardia della qualità delle risorse idriche dell'area è che la valorizzazione ed il rilancio dell'attività termale ed il mantenimento degli altri prelievi idrici dal sistema, soprattutto quelli irrigui derivati dall'acquifero superficiale, possono rappresentare obiettivi in conflitto tra loro. Ciò deriva dal fatto che nelle aree dove si hanno mescolamenti tra i flussi risalenti dall'acquifero termale verso quello superficiale, il pompaggio da quest'ultimo può indurre il richiamo di acque più profonde termali e quindi la cattura delle risorse idrotermali, oltre che un decadimento qualitativo delle acque dell'acquifero superficiale. Viceversa un eccessivo prelievo dall'acquifero profondo può innescare, laddove non è presente un sufficiente isolamento tra gli acquiferi sovrapposti, una inversione locale dei flussi lungo la verticale con decadimento qualitativo delle acque termali (cfr. par. 4 e 6.3).

Queste considerazioni sono state già assunte alla base della zonazione proposta precedentemente nello studio Regione Lazio (2008-2010) che definiva le aree di salvaguardia del sistema idrotermale di Viterbo ed i relativi vincoli da adottare sulla base di un razionale uso compreso tra lo sviluppo dell'attività termale dell'area, la conservazione delle risorse idriche attualmente utilizzate per l'approvvigionamento potabile, la vocazione agricola del territorio e la conservazione dei valori storici, culturali ed ambientali connessi con le sorgenti termali. Questa zonazione è stata revisionata ed affinata in conseguenza del nuovo POU proposto.

In particolare, per la definizione delle MTI, oltre a quanto già assunto per la definizione del POU, sono stati considerati i seguenti punti:

- a) la conservazione della qualità delle acque termali, ovvero di acque minerali utilizzate ai fini terapeutici (secondo la definizione della Legge 323/2000), è imprescindibile dalla tutela della loro quantità;
- b) per acqua termale si intende un'acqua con temperatura significativamente superiore alla temperatura media annuale del luogo dove essa affiora (Albu et al. 1997), incremento che è definito in almeno 4 °C (Schoeller 1962);
- c) nel caso dell'area idrotermale di Viterbo, le acque sotterranee con temperatura superiore a 21 °C e conducibilità elettrica (a 20 °C) superiore a 1250 µS/cm sono da considerarsi risultato di mescolamento con le acque propriamente termali (temperatura superiore a 30 °C) in concessione per l'uso terapeutico. Ciò si ricava dalle caratteristiche chimiche delle acque sotterranee dell'area (cfr. par. 3) e dai grafici di Figura 29, dove sono messe a confronto le relazioni conducibilità elettrica - temperatura delle acque e conducibilità elettrica - contenuto di solfato, tipico componente, quest'ultimo, delle acque propriamente termali (cioè quelle con temperatura superiore a 30 °C);
- d) la definizione delle zone di protezione della sorgente o del pozzo di acqua termale in concessione, non può prescindere, nel caso specifico, dalla salvaguardia della qualità e della quantità delle risorse idrotermali dell'area dell'intero sistema, considerata la sua unicità di comportamento a lungo termine. D'altra parte questo approccio è coerente con la definizione di "territori termali" della Legge 323/2000.

Sulla base di questi principi le MTI sono proposte, rivisitando ed affinando quanto già definito nella zonazione proposta in precedenza (Regione Lazio 2008-2010).

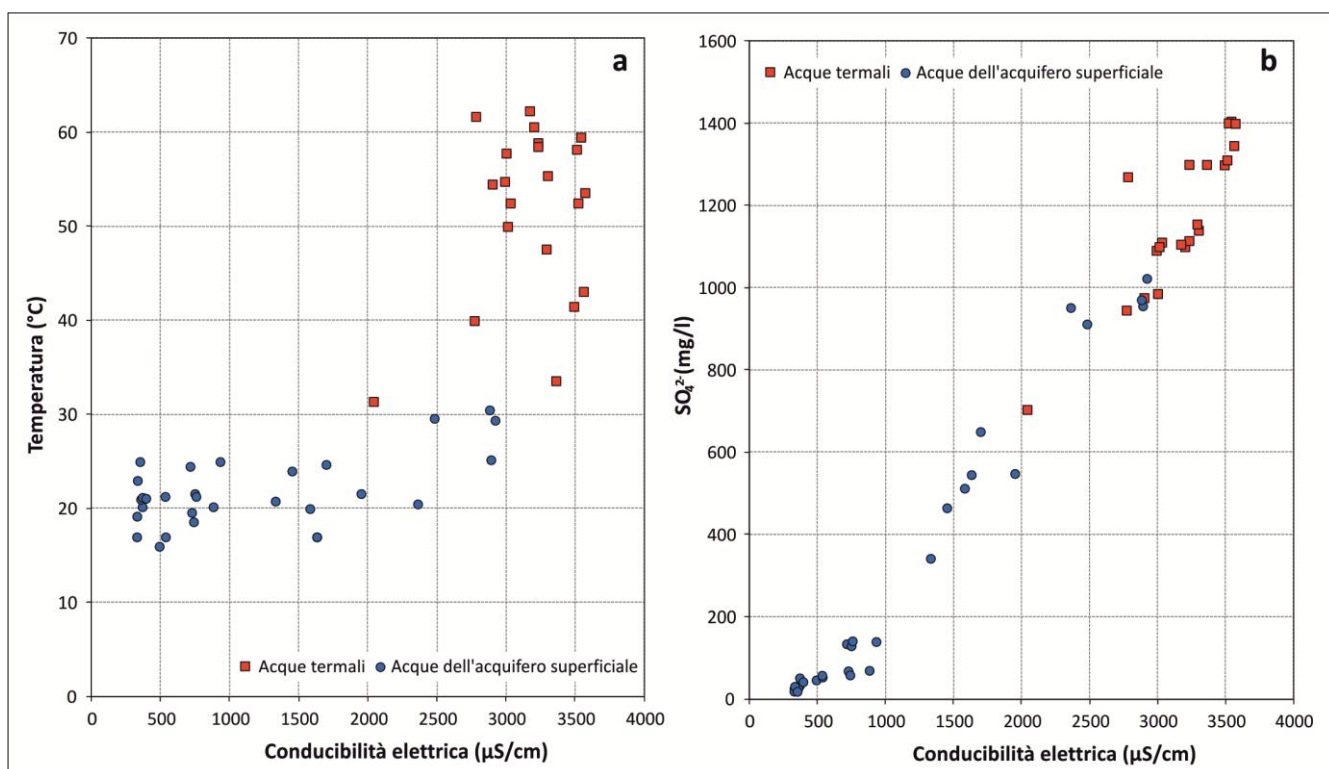


Fig. 29 Relazioni tra conducibilità elettrica e temperatura (a) e tra conducibilità elettrica e contenuto di solfato (b) delle acque sotterranee del sistema di Viterbo (da Regione Lazio 2008-2010).

9.3 Delimitazione delle zone di salvaguardia e prescrizioni per l'uso delle risorse e del territorio

Sulla base di principi precedentemente esposti sono state individuate più zone da sottoporre a vincoli specifici.

La Zona di Tutela Assoluta delle emergenze idrotermali (ZT) riguarda le sorgenti naturali con temperatura superiore o uguale a 30 °C non oggetto di concessione mineraria. La ZT di forma circolare deve avere un raggio di dimensione non inferiore a 5 m nell'intorno dell'emergenza, ove possibile. Essa deve essere dotata di recinzione ed opportuna cartellonistica di divieto di accesso alle persone non autorizzate. L'obiettivo della ZT è finalizzato alla conservazione delle sorgenti termali naturali non oggetto di concessione mineraria. Il divieto di accesso alle persone non autorizzate è definito per motivi di sicurezza, in relazione alla temperatura dell'acqua ed alle emissioni gassose che contraddistinguono le manifestazioni idrotermali dell'area. Tutte le altre venute di acque termali con temperatura uguale o superiore a 30 °C da pozzi o da scavi devono essere opportunamente sigillate, se non ricomprese nel sistema di monitoraggio.

La ZT riguarda le seguenti sorgenti o gruppi sorgivi: Gruppo Bagnaccio, Laghetto Bagnaccio - Pantano, Casale Montarozzo, Casale Bussete, Bussete, Zitelle (se ripristinato il luogo di affioramento ante 2013 o la “nuova” emergenza), Piazza d’Arme, Piscine Carletti, Asinello e S. Cristoforo (Tavola 2).

La Zona di Rispetto (ZR) corrisponde con l’area delle concessioni minerarie ed è finalizzata alla protezione igienico-sanitaria immediata delle opere di presa delle acque termali. Ad essa si applicano le prescrizioni ed i divieti formulati dalla Regione Lazio per quanto riguarda le attività agricole o zootecniche, le costruzioni, le attività produttive o commerciali e lo smaltimento di acque o reflui civili (cfr. par. 9.1), ivi inclusi nello specifico:

- il divieto assoluto di perforazione di pozzi e di emungimenti dal sottosuolo dai pozzi esistenti, se non autorizzati dalla Regione Lazio;
- il divieto assoluto di scavi e sbancamenti, se non preliminarmente supportati da appositi ed approfonditi studi, a firma di geologo abilitato, atti a dimostrare la non interferenza con acque con temperatura superiore a 21 °C e conducibilità elettrica (a 20 °C) superiore a 1250 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

La ZR si applica alle aree di concessione mineraria dei settori settentrionale (comprendenti i pozzi di captazione Bacucco, Bagnaccio e Oasi), centrale (comprendenti i pozzi di captazione Pozzetto, S. Albino, Gigliola e le sorgenti Bullicame e S. Caterina) e meridionale (comprendente i pozzi di captazione Paliano) (Tavola 2).

La Zona di Protezione Immediata (ZPI) è finalizzata sia alla protezione igienico-sanitaria delle acque termali in concessione sia alla salvaguardia della qualità e della quantità delle risorse idrotermali dell’intero sistema. Quindi, per questo secondo aspetto, corrisponde con una zona di protezione ambientale “immediata” della vigente normativa regionale.

La delimitazione della ZPI è stata definita considerando:

- l’ubicazione di sorgenti termali attive nel passato ed attualmente con temperatura superiore a 21 °C e conducibilità elettrica superiore a 1250 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Tavola 1);
- l’ubicazione dei pozzi dell’acquifero superficiale con temperatura superiore a 21 °C e conducibilità elettrica superiore a 1250 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (Tavola 1);
- l’affioramento di travertini recenti ed in formazione geneticamente legati a venute idrotermali (Tavola 1);
- le faglie delimitanti la zona interessata dal sollevamento delle substrato sedimentario delle vulcaniti, che costituisce l’idrostruttura profonda (cfr. par. 3 e Tavola 1);

- le zone con valori del rapporto $Q_t/Q_i > 0.4$ ricadenti all'interno dell'area idrotermale, indicative di significativi mescolamenti per le acque del SA con acque termali (Fig. 7);
- l'anomalia del flusso di calore come definita in bibliografia (cfr. par. 2);
- il reticolo idrografico alimentato da venute diffuse di acque termali (cfr. par. 5.1 e Tavola 1);
- l'area con pozzi dell'acquifero superficiale con contenuto di Arsenico nelle acque superiore a 30 $\mu\text{g/L}$, indicativi delle zone con risalite di fluidi profondi (per esempio, Armiento et al. 2015).

Dalla sovrapposizione degli anzidetti tematismi è stata ottenuta la delimitazione della ZPI (Tavola 2).

Per la ZPI si devono applicare i seguenti divieti e prescrizioni:

- il divieto di modificare l'attuale morfologia dei luoghi e la destinazione d'uso del suolo;
- la chiusura e sigillatura dei pozzi con temperatura delle acque superiore a 21 °C e conducibilità elettrica (a 20 °C) superiore a 1250 $\mu\text{S/cm}$;
- il divieto assoluto di perforazione di nuovi pozzi;
- il divieto assoluto di scavi e sbancamenti, se non preliminarmente supportati da appositi ed approfonditi studi, a firma di geologo abilitato, atti a dimostrare la non interferenza con acque con temperatura superiore a 21 °C e conducibilità elettrica (a 20 °C) superiore a 1250 $\mu\text{S/cm}$.

Per i pozzi esistenti con temperatura delle acque inferiore o uguale a 21 °C e conducibilità elettrica (a 20 °C) inferiore o uguale a 1250 $\mu\text{S/cm}$, l'esercizio è vincolato ai seguenti requisiti:

- a) essere dotati di misuratore dei prelievi idrici (con possibilità della misura della portata istantanea e dei volumi idrici totali prelevati);
- b) essere accessibili per misure piezometriche;
- c) le acque emunte devono, almeno annualmente, essere sottoposte ad analisi chimiche da eseguirsi in laboratorio certificato, comprendenti i seguenti parametri: temperatura, conducibilità elettrica, pH e ioni maggiori (Calcio, Magnesio, Potassio, Sodio, Solfato, Cloruro e Bicarbonato);
- d) essere stati sottoposti ad una prova di emungimento a gradini di portata crescente completa della determinazione della temperatura, conducibilità elettrica e pH dell'acqua emunta per ogni gradino di portata, a firma di geologo abilitato.

In relazione alla presentazione della documentazione di cui ai precedenti punti a) - d):

- la portata di emungimento istantanea dal singolo pozzo sarà definita sulla base della depressione del livello piezometrico indotta dal pompaggio, che non dovrà superare il 20 % dell'acquifero saturo intercettato dal pozzo, in modo da sollecitare principalmente la componente orizzontale del flusso;
- il volume annuo di emungimento dai pozzi nella ZPI dovrà essere tale da non eccedere $1 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{anno}$ per km^2 , in modo da essere inferiore al volume di infiltrazione efficace diretta (cfr. par. 3, 4, 5.3 e 6).

Le zonazione così definita è riportata nella Tavola 2, dove sono indicate le ZT, ZR e ZPI.

Nello stesso elaborato sono riportate le isocrone dei 90 e 365 giorni relative alla Sorgente Pidocchio, l'unico punto d'acqua utilizzato ai fini potabili. Le isocrone sono state calcolate con il criterio cronologico sulla base delle caratteristiche piezometriche ed idrauliche locali dell'acquifero superficiale (Regione Lazio 2008-2010).

10. Sistema di monitoraggio per la tutela ed alla salvaguardia delle acque termali

Il sistema di monitoraggio delle risorse idrotermali (denominato in seguito SIM) è funzionale alla verifica del POU (cfr. par. 8) e delle MTI (cfr. par. 9). Esso è disegnato per verificare la risposta del sistema idrotermale di Viterbo alla applicazione del POU e delle MTI, in termini di quantità e qualità delle risorse idriche. Nello stesso tempo, i risultati del monitoraggio costituiranno la base per l'eventuale revisione periodica sia del POU che delle MTI. Quindi il SIM è uno strumento indispensabile in una concezione dinamica del POU e delle MTI, cioè quanto definito in precedenza circa i possibili programmi di gestione e salvaguardia delle acque termali di Viterbo non deve essere considerato come un punto di arrivo definitivo, ma i programmi e le misure (POU e MTI) sono suscettibili di aggiornamenti e ridefinizione proprio in funzione dei risultati via via acquisiti dal monitoraggio del sistema.

Di seguito sono considerati i parametri più significativi da adottare per il SIM, è definita la rete di monitoraggio ed è dettagliato il protocollo da seguire.

10.1 Parametri idrogeologici e idrochimici del SIM

Essendo necessario monitorare la quantità e la qualità delle acque sotterranee del sistema idrotermale di Viterbo, un primo aspetto è la definizione dei parametri idrogeologici e idrochimici più sensibili per valutare l'impatto del POU e delle MTI, quando attuati. La scelta dei parametri è dunque conseguenza dello schema idrogeologico del sistema e, nello stesso tempo, della significatività e semplicità dei parametri da controllare. In particolare, l'approccio del SIM prevede due livelli di controllo in termini temporali con numero diverso di parametri di monitoraggio.

In relazione ai precedenti concetti e alle peculiarità qualitative delle acque termali di Viterbo, nonché ai rapporti esistenti tra i diversi acquiferi presenti, i parametri di interesse sono:

- 1) portata e volumi dei prelievi di acque termali dalle concessioni minerarie;
- 2) carico idraulico delle acque termali;
- 3) principali caratteristiche chimico-fisiche delle acque termali delle concessioni minerarie;
- 4) caratteristiche chimiche principali delle acque termali captate;
- 5) carico idraulico dell'acquifero superficiale;
- 6) principali caratteristiche chimico-fisiche delle acque dell'acquifero superficiale.

I punti 1) e 2) sono finalizzati al controllo della quantità delle risorse idrotermali. In particolare, il monitoraggio del carico idraulico delle acque termali rappresenta certamente uno dei parametri più affidabili per monitorare l'impatto dei prelievi di acque termali sull'intero sistema. I dati dei volumi e della portata di prelievo e del carico idraulico acquisiti potranno essere correlati con le variazioni della ricarica del sistema, considerando precipitazioni e temperatura dell'aria della rete di stazioni meteorologiche locali gestite dalla Regione Lazio, che acquisiscono dati giornalieri.

I parametri del punto 3), cioè temperatura e conducibilità elettrica delle acque termali delle concessioni minerarie, essendo facili da acquisire in continuo, possono rappresentare un primo livello di controllo della qualità delle acque termali prelevate. La variazione dei due parametri chimico-fisici potrà essere correlata con i volumi di prelievo ed i dati meteorologici (precipitazioni e temperatura dell'aria) dai quali dipende la ricarica del sistema, risultando quindi significativi indicatori dell'impatto dei prelievi nel tempo sul sistema idrogeologico.

Il monitoraggio dei parametri del punto 4) sono finalizzati ad un controllo della qualità delle acque captate con un maggiore grado di approfondimento, rispetto a quelli del punto 3), ma con una frequenza temporale più dilatata. Si propongono quattro campionamenti annuali e relative analisi comprendente il seguente set analitico: temperatura; pH; conducibilità elettrica; Calcio, Magnesio, Potassio, Sodio, Cloruro, Solfato e Bicarbonato; gas disciolti, CO₂ e H₂S. In relazione alla peculiare composizione chimica delle acque termali di Viterbo, questi parametri sono sufficienti ad un controllo della variazione nel tempo della qualità delle acque termali prelevate.

Il parametro del punto 5) rappresenta un indicatore di facile acquisizione per controllare l'impatto dei prelievi dall'acque termali e dall'acquifero superficiale sui rapporti idrodinamici dei due acquiferi sovrapposti. In particolare, l'analisi comparata della variazione del carico idraulico dell'acquifero superficiale e delle acque termali (di cui al punto 2) permetterà di controllare la variazione nel tempo del gradiente verticale e quindi dei flussi tra i due acquiferi sovrapposti. In questo modo, sarà possibile scongiurare significativi incrementi del gradiente verticale o addirittura l'inversione dello stesso che, come discusso in precedenza (cfr. par. 4), possono innescare anche un decadimento qualitativo delle risorse idriche dei due acquiferi.

I parametri del punto 6), cioè temperatura e conducibilità elettrica, sono proposti quali indicatori della qualità delle acque dell'acquifero superficiale, essendo possibili per queste impatti in relazione ai prelievi sia delle acque termali sia dallo stesso acquifero superficiale.

Variazione del carico idraulico dell'acquifero superficiale e monitoraggio della temperatura e la conducibilità elettrica delle sue acque permetteranno nell'insieme di controllare i rapporti tra i due acquiferi sovrapposti, sia in termini quantitativi che qualitativi.

10.2 Rete di monitoraggio

La rete di monitoraggio proposta comprende pozzi e sorgenti per la maggior parte ricadenti all'interno delle aree delle concessioni minerarie. Il dettaglio dei punti di misura è riportato nella Tavola 2. La strumentazione da installare è specificata di seguito, considerando anche quanto è stato possibile rilevare direttamente in merito alle opere di captazione delle acque termali.

Per quanto riguarda le acque termali, nel settore settentrionale, bisognerà strumentare a cura dei concessionari i pozzi Bacucco, Bagnaccio e Oasi. Nel settore centrale, contestualmente all'applicazione del POU, bisognerà strumentare a cura dei concessionari i pozzi Pozzetto, Gigliola, Uliveto, S. Albino e Zitelle e le sorgenti Bullicame e S. Caterina. Nel settore meridionale, bisognerà strumentare a cura del concessionario i pozzi Paliano.

Nella Tabella 12 è riportata la sintesi della rete di monitoraggio proposta dedicata al controllo delle acque termali, incluso il tipo di opera e la strumentazione da prevedere, se non già presente, in relazione alle caratteristiche del pozzo (artesiano o con livello idrico al di sotto del p.c.) o della sorgente. Oltre alla strumentazione delle opere di captazione, è prevista la strumentazione dei pozzi Zitelle e Uliveto che avranno la funzione di piezometri di monitoraggio nella zona centrale del sistema, quella sicuramente più delicata per la più alta densità di opere di presa di acque termali. La strumentazione della Sorgente Bullicame sarà finalizzata alla funzione di monitoraggio della più importante sorgente naturale del sistema, anche nel caso in cui fosse prevista una parziale derivazione delle sue acque per alimentare gli stabilimenti termali. La strumentazione per il Pozzo S. Albino è definita nella previsione di un pozzo non artesiano dopo il suo ri-condizionamento; se dopo la ri-perforazione risultasse il fenomeno dell'artesianesimo si provvederà con una strumentazione tipo il Pozzo Oasi.

Per quanto riguarda l'acquifero superficiale, bisogna prevedere la strumentazione di almeno tre piezometri di monitoraggio, uno per ogni settore del sistema idrogeologico interessato dalle opere di captazione di acque termali. I piezometri saranno strumentati con sonda ad immersione per la misura della soggiacenza, temperatura e conducibilità elettrica.

La posizione dei piezometri dovrebbe essere quanto più vicina ai centri di captazione delle acque termali. Si potrebbero utilizzare a tale scopo pozzi o piezometri già presenti all'interno

delle aree di concessione o prossimi a queste. Ovviamente, in questo caso, i piezometri o i pozzi di monitoraggio dovranno essere esclusivamente dedicati al controllo del carico idraulico delle caratteristiche chimico-fisiche delle acque, quindi non devono essere utilizzati per il prelievo di acque sotterranee, in modo che le misure acquisite si riferiscano a condizioni “indisturbate”. Nel caso in cui non fossero disponibili piezometri o pozzi da strumentare, i concessionari dovranno farsi carico della loro realizzazione, sottoponendo preliminarmente un progetto per l’approvazione da parte della Regione Lazio.

Tab. 12 Rete di monitoraggio delle acque termali e strumentazione richiesta.

Pozzo/sorgente	Funzione	Strumentazione
Pozzo Bacucco	Captazione	Sonda ad immersione per la misura della soggiacenza, temperatura e conducibilità elettrica. Misuratore della portata.
Pozzo Bagnaccio	Captazione	Misuratore di portata e di pressione. Sonda per la misura della temperatura e conducibilità elettrica.
Pozzo Oasi	Captazione	Misuratore di portata e di pressione. Sonda per la misura della temperatura e conducibilità elettrica.
Pozzetto	Captazione	Misuratore di portata e di pressione. Sonda per la misura della temperatura e conducibilità elettrica.
Pozzo Gigliola	Captazione	Sonda ad immersione per la misura della soggiacenza, temperatura e conducibilità elettrica. Misuratore della portata.
Pozzo S. Albino	Captazione	Sonda ad immersione per la misura della soggiacenza, temperatura e conducibilità elettrica. Misuratore della portata.
Sorgente S. Caterina	Captazione	Sonda ad immersione per la misura della soggiacenza, temperatura e conducibilità elettrica. Misuratore della portata.
Sorgente Bullicame	Monitoraggio o captazione	Misuratore di portata. Sonda per la misura della temperatura e conducibilità elettrica.
Pozzo Uliveto	Monitoraggio	Sonda ad immersione per la misura della soggiacenza, temperatura e conducibilità elettrica.
Pozzo Zitelle	Monitoraggio	Misuratore di pressione. Sonda per la misura della temperatura e conducibilità elettrica.
Pozzo Paliano 1	Captazione o monitoraggio	Sonda ad immersione per la misura della soggiacenza, temperatura e conducibilità elettrica. Misuratore della portata.
Pozzo Paliano 2	Captazione	Misuratore di portata e di pressione. Sonda per la misura della temperatura e conducibilità elettrica.

Nella Tavola 2, oltre ad esser indicata l’ubicazione dei punti di misura delle acque termali, è riportata l’ubicazione più favorevole della rete minima dei piezometri di monitoraggio dell’acquifero superficiale (corrispondente, peraltro, a pozzi e piezometri esistenti).

Per quanto riguarda le caratteristiche tecniche dei misuratori di portata, essi dovranno essere di tipo automatico, dotati di certificato di produzione con numero di serie e dovranno comprendere: visualizzatore della portata istantanea misurata, totalizzatore della quantità di

acqua prelevata e registratore dati su supporto informatico. La risoluzione richiesta per il sensore di portata è di 0.02 L/s, l'accuratezza della misura dovrà essere ± 1 % del valore misurato.

I misuratori di portata saranno installati con flangia o altri sistemi a monte di qualsiasi derivazione. Dovranno inoltre essere applicati sigilli di garanzia inamovibili o altro dispositivo che garantisca l'inalterabilità dello strumento installato sul pozzo o sulla tubazione di derivazione della sorgente. Il concessionario è tenuto a comunicare in anticipo agli enti competenti le manutenzioni che implichino la rimozione dei sigilli.

Per quanto riguarda i pozzi artesiani, i misuratori di pressione dovranno essere installati sul pozzo mediante opportuna tubazione dedicata. La risoluzione del sensore sarà di 0.001 bar e l'accuratezza pari a ± 1 % del valore misurato.

Per la misura della temperatura e conducibilità elettrica, saranno utilizzate sonde ad immersione, nel caso dei pozzi non artesiani, e sonde da installare su tubazioni dedicate per i pozzi artesiani e le sorgenti, a monte di qualsiasi derivazione e quanto più prossime alla emergenza delle acque, in modo da non alterare i valori dei parametri. La risoluzione del sensore per la misura della temperatura delle acque sarà di 0.1 °C e l'accuratezza pari a ± 0.1 °C. Per il sensore della conducibilità elettrica è richiesta una risoluzione di 10 μ S/cm ed una accuratezza pari a ± 1 % del valore misurato.

Per la misura della soggiacenza (in m dal p.c.) sarà utilizzato un sensore di tipo a pressione differenziale per la compensazione della pressione atmosferica da installare nel pozzo di produzione o nel piezometro di monitoraggio. La risoluzione e l'accuratezza del sensore saranno rispettivamente di 0.001 m e ± 1 % del valore misurato. Il pozzo di produzione o il piezometro di monitoraggio dovranno anche permettere la misura della soggiacenza mediante freatimetro di controllo manuale, predisponendo nel pozzo di produzione un adeguato tubo-guida atto a favorire l'accesso del freatimetro senza interferenze con le altre installazioni presenti nel pozzo.

Anche per i misuratori di pressione, temperatura, conducibilità elettrica e soggiacenza dovrà essere prevista la registrazione automatica dei dati.

La frequenza di campionamento di tutti parametri di monitoraggio (portata, pressione, soggiacenza, temperatura e conducibilità elettrica) dovrà essere oraria, al fine di elaborare un valore medio giornaliero del parametro misurato. Ogni stazione di monitoraggio dovrà essere dotata di una memoria interna dimensionata per la registrazione di almeno 12 mesi

dei dati acquisiti in continuo. Dovrà essere possibile lo scarico locale dei dati mediante apposito palmare o computer portatile.

Per i sensori ed i misuratori installati presso i pozzi e le sorgenti di acque termali dovrà essere particolarmente curata la scelta dei materiali, al fine di prevenire la corrosione degli stessi considerata la peculiare composizione chimica delle acque.

10.3 Protocollo di monitoraggio

Il protocollo di monitoraggio comprenderà due tipi di attività: monitoraggio qualitativo in continuo e monitoraggio trimestrale della qualità delle acque termali.

Il monitoraggio della qualità e quantità delle acque termali e di quelle dell'acquifero superficiale avverrà mediante le stazioni della rete di monitoraggio in continuo. Ogni stazione di monitoraggio in continuo delle acque termali e di quelle dell'acquifero superficiale sarà caratterizzata da una scheda anagrafica, dove saranno specificati almeno: ID stazione, nome stazione, tipo di opera, tipo di strumento, schema di installazione, coordinate della stazione espresse nel sistema di riferimento WGS-84-UTM-33-N, quota della stazione in m s.l.m., unità di misura del parametro di monitoraggio.

I dati acquisiti dalle stazioni di monitoraggio in continuo (portata, pressione, soggiacenza, temperatura e conducibilità elettrica) saranno memorizzati in *file* giornalieri, in numero pari al tipo di sensore, dove saranno specificati: ID stazione, data, ora e valore, pompa on/off nel caso di pozzi o sorgenti con sollevamento attraverso elettropompa sommersa. I dati orari acquisiti dalle stazioni saranno elaborati in dati medi giornalieri. Questi saranno raccolti in un secondo *file* mensile, sempre in numero pari al tipo di sensore, con specifica dell'ID stazione, data, ora e valore, pompa on/off nel caso di pozzi o sorgenti con sollevamento attraverso elettropompa sommersa.

I *file* giornalieri e mensile, in formato *excel* editabile, saranno trasmessi ogni tre mesi alla Regione Lazio su supporto informatico.

Il monitoraggio della qualità delle acque termali avverrà mediante campionamenti trimestrali con determinazione dei parametri riportati in Tabella 13.

Queste analisi riguarderanno i pozzi di produzione delle concessioni, Bacucco, Bagnaccio, Oasi, S. Albino, Pozzetto, Gigliola, Paliano, e le sorgenti Bullicame e S. Caterina. Esse dovranno essere eseguite da laboratorio certificato secondo metodiche accreditate.

I concessionari ogni trimestre trasmetteranno alla Regione Lazio un *report* contenente sia i *file* del monitoraggio in continuo sia le analisi delle acque di Tabella 13.

Tab. 13 Set analitico per le analisi trimestrali delle acque termali captate.

Parametro	Unità di misura
Temperatura	°C
Conducibilità elettrica a 20 °C	µg/L
pH	Unità
Ca	mg/L
Mg	mg/L
K	mg/L
Na	mg/L
Cl	mg/L
SO ₄	mg/L
HCO ₃	mg/L
CO ₂ disciolta	mg/L
H ₂ S	mg/L

Dall'analisi incrociata delle portate di prelievo, soggiacenza, pressione, temperatura e conducibilità elettrica delle acque, chimismo delle acque termali, precipitazioni e temperatura dell'aria, la Regione Lazio verificherà la sostenibilità dei prelievi delle acque termali, e quindi l'impatto dei prelievi sul regime idrodinamico del sistema idrogeologico e sulla eventuale variazione della qualità delle risorse idriche nel tempo.

I dati acquisiti attraverso il monitoraggio consentiranno alla Regione Lazio, dopo l'elaborazione dei risultati relativi ai primi due anni di monitoraggio, la eventuale ridefinizione del POU e delle MTI, nonché dello stesso protocollo di monitoraggio.

11. Conclusioni

Lo studio condotto sull'area idrotermale di Viterbo ha compreso l'analisi dei risultati delle precedenti ricerche sviluppate dal Dipartimento di Scienze Ecologiche e Biologiche dell'Università degli Studi della Tuscia e delle nuove indagini appositamente condotte nel 2016. Queste ultime hanno incluso: a) una nuova campagna di misura della portata delle emergenze di acque termali del sistema; b) una nuova campagna di rilievo delle principali caratteristiche chimico-fisiche delle acque termali; c) una nuova campagna di misura della portata dei torrenti che attraversano l'area idrotermale; d) la costruzione di un nuovo modello di simulazione numerica del flusso.

Sulla base dell'insieme delle conoscenze acquisite sul sistema idrogeologico è stato possibile elaborare il possibile Programma Operativo di Utilizzo delle acque termali dal sistema (POU), le possibili Misure di Tutela e Salvaguardia delle risorse idriche sotterranee (MTI) ed il progetto della rete di monitoraggio e controllo del sistema idrogeologico (SIM). I tre programmi proposti, POU, MTI e SIM, sono quelli più appropriati sulla base delle attuali conoscenze del sistema idrogeologico e disegnati secondo il principio della cautela per rispettare i delicati equilibri esistenti, non solo idrogeologici. Essi sono strettamente interconnessi secondo un diagramma di flusso "circolare" (Fig. 30) che prevede all'attivazione del POU una portata di prelievo massima di acque termali mediante pozzi di 70 L/s, come media annua, ciò significa che il controllo dell'entità dei prelievi dovrà essere effettuato sui volumi annui, che non dovranno superare 2.2×10^6 m³/anno dall'intero sistema. La contestuale attuazione delle MTI e del SIM permetterà di verificare la sostenibilità dei prelievi di acque termali dal sistema a medio termine. Dopo due anni di monitoraggio, proprio sulla base dei risultati del SIM, sarà possibile verificare il POU ed le MTI ed eventualmente ridefinire gli stessi programmi, incluso lo stesso SIM (Fig. 30). Questo tipo di approccio dinamico implica quindi che i risultati del monitoraggio diventano elementi fondamentali e imprescindibili per il collaudo dei programmi adottati e per la loro eventuale ridefinizione. In tale senso, il monitoraggio proposto è disegnato per essere gestito in modo centralizzato dalla Regione Lazio, al fine di analizzare la risposta del sistema nella sua unicità di comportamento idrogeologico.

Il POU proposto, oltre ad indicare l'entità massima dei prelievi di acque termali mediante pozzi di captazione, definisce gli intervalli di volumi annui di acque termali che possono

essere prelevati dai tre settori dove insistono le concessioni minerarie. Gli intervalli proposti sono stati individuati sulla base dell'entità massima dei prelievi possibili alla attivazione del POU e della distribuzione delle opere di presa e delle sorgenti naturali di acque termali con l'obiettivo di contenere gli impatti sulle risorse idriche sotterranee del sistema.

Le MTI proposte definiscono la zonazione delle aree di salvaguardia del sistema idrogeologico ed i vincoli per l'uso delle risorse idriche e del territorio, partendo dal quadro normativo regionale. Includendo il sistema usi delle acque sotterranee, non solo per le concessioni minerarie, che possono impattare sulla qualità e quantità delle risorse idriche degli acquiferi presenti, le MTI prevedono per la loro attuazione una partecipazione dei diversi enti territoriali competenti (Regione Lazio, Provincia di Viterbo e Comune di Viterbo).

Il SIM proposto è finalizzato al monitoraggio degli impatti dei prelievi di acque termali dal sistema attraverso una rete di controllo della quantità e della qualità delle acque sotterranee. Il SIM rappresenta, come detto in precedenza, uno strumento indispensabile per il collaudo e la verifica del POU e delle MTI e tende a colmare l'attuale carenza di dati idrogeologici sul sistema, che condiziona fortemente ulteriori approfondimenti sulla comprensione del comportamento idrodinamico del sistema stesso.

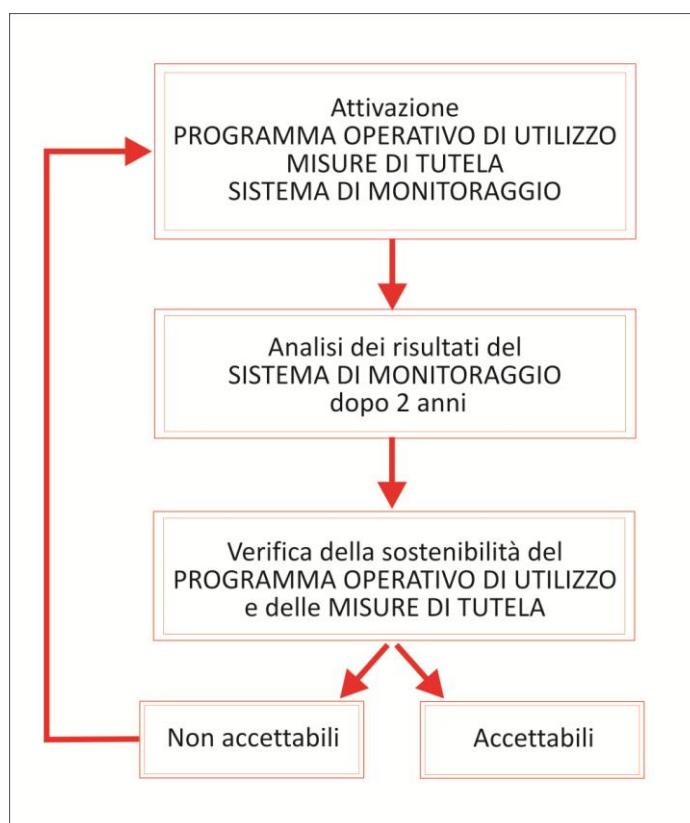


Fig. 30 Flow-chart dei programmi proposti relativamente all'utilizzo (POU), salvaguardia (MTI) e monitoraggio (SIM) delle acque termali del sistema idrogeologico di Viterbo.

Riferimenti citati

- Albu M, Banks D, Nash H (1997) Mineral and thermal groundwater resources. Springer, Netherlands.
- Angelone M, Cremisini C, Piscopo V, Proposito M, Spaziani F (2009) Influence of hydrostratigraphy and structural setting on the arsenic occurrence in groundwater of the Cimino-Vico volcanic area (central Italy). *Hydrogeol J* 17:901–914.
- Armiento G, Baiocchi A, Cremisini C, Crovato C, Lotti F, Lucentini L, Mazzuoli M, Nardi E, Piscopo V, Proposito M, Veschetti E (2015) An integrated approach to identify water resources for human consumption in an area affected by high natural arsenic content. *Water* 7:5091–5114.
- Baiocchi A, Lotti F (2012) Analysis of the interactions between overlapping aquifers in the Viterbo hydrothermal area (central Italy) from pumping tests. In: *Flowpath 2012*, Bologna, Italy, 20–22 June 2012, 2 pp. <http://nuke.iahitaly.it/Flowpath2012/tabid/487/Default.aspx>. (Accesso 05.01.2013).
- Baiocchi A, Dragoni W, Lotti F, Luzzi G, Piscopo V (2006) Outline of the hydrogeology of the Cimino and Vico volcanic area and of the interaction between groundwater and Lake Vico (Lazio Region, central Italy). *Boll Soc Geol Ital* 125:187–202.
- Baiocchi A, Lotti F, Piscopo V (2012) Conceptual hydrogeological model and groundwater resource estimation in a complex hydrothermal area: the case of the Viterbo geothermal area (central Italy). *J Water Resour Protect* 4:231–247.
- Baiocchi A, Lotti F, Piscopo V (2013) Impact of groundwater withdrawals on the interactions between overlapping aquifers in the Viterbo geothermal area (Central Italy). *Hydrogeol J* 21:1339–1353.
- Baldi P, Decandia FA, Lazzarotto A, Calamai A (1974) Studio geologico del substrato della copertura vulcanica laziale nella zona dei laghi di Bolsena, Vico e Bracciano. *Mem Soc Geol Ital* 13:575–606.
- Barberi F, Buonasorte G, Cioni R, Fiordelisi A, Foresi L, Iaccarino S, Laurenzi MA, Sbrana A, Vernia L, Villa IM (1994) Plio-Pleistocene geological evolution of the geothermal area of Tuscany and Latium. *Mem Descrit Carta Geol Ital* 49:77–134.
- Bertagnini A, Sbrana A (1986) Il vulcano di Vico: stratigrafia del complesso vulcanico e sequenze eruttive delle formazioni piroclastiche. *Mem Soc Geol Ital* 35:699–713.
- Boni C, Bono P, Capelli G (1986) Schema idrogeologico dell'Italia centrale. *Mem Soc Geol Ital* 35:991–1012.
- Bredehoeft JD (1997) Safe yield and the water budget myth. *Ground Water* 35, no 6:929.
- Buonasorte G, Fiordelisi A, Pandeli E, Rossi U, Sollevanti E (1987) Stratigraphic correlations and structural setting of the pre-neoautochthonous sedimentary sequences of northern Latium. *Period Mineral* 56:111–122.
- Calamai A, Cataldi R, Locardi E, Praturlon A (1976) Distribuzione delle anomalie geotermiche nella fascia preappenninica tosco-laziale (Italia). In: *Simposio International sobre Energia Geotérmica en America Latina*, Ciudad de Guatemala, 16–23 October 1976, pp 189–229.
- Camponeschi B, Nolasco F (1984) Le risorse naturali della Regione Lazio: 2. Monti Cimini e Tuscia Romana. Regione Lazio, Roma.
- Capelli G, Mazza R, Gazzetti C (2005) Strumenti e strategie per la tutela e l'uso compatibile della risorsa idrica del Lazio: gli acquiferi vulcanici. Pitagora, Bologna.
- Cataldi R, Mongelli F, Squarci P, Taffi L, Zito G, Calore C (1995) Geothermal ranking of Italian territory. *Geothermics* 24:115–129.
- Certes C, de Marsily G (1991) Application of the pilot-points method to the identification of aquifer transmissivities. *Adv Water Resour* 14 (5):284–300.
- Chiang W-H, Kinzelbach W (2001) 3D-groundwater modeling with PMWIN, a simulation system for modeling groundwater flow and pollution. Springer, Berlin.
- Chiodini G, Frondini F, Ponziani F (1995) Deep structures and carbon dioxide degassing in Central Italy. *Geothermics* 24:81–94.
- Cimarelli C, De Rita D (2006) Structural evolution of the Pleistocene Cimini trachytic volcanic complex (central Italy). *Bull Volcanol* 68:538–548.

- Cinti D, Tassi F, Procesi M, Bonini M, Capecchicci F, Voltattorni N, Vaselli O, Quattrocchi F (2014) Fluid geochemistry and geothermometry in the unexploited geothermal field of the Vicano–Cimino Volcanic District (Central Italy). *Chem Geology* 371:96-114.
- Della Vedova B, Bellani S, Pellis G, Squarci P (2001) Deep temperatures and surface heat flow distribution. In: Vai GB, Martini P (eds) *Anatomy of an orogen, the Apennines and adjacent Mediterranean Basin*. Kluwer, Dordrecht, The Netherlands, pp 65–76.
- Diersch HJG (2002) FEFLOW. Finite element subsurface flow and transport simulation system. Reference manual, WASY, Berlin.
- Diersch HJG, Kolditz O (1998) Coupled groundwater flow and transport: thermohaline and 3D convection systems. *Adv Water Resour* 21:401–425.
- Doherty J (2010) PEST, Model-independent parameter estimation. User manual (5th ed). Watermark Numerical Computing, Brisbane.
- Doherty J, Brebber L, Whyte P (1994) PEST: model-independent parameter estimation. User's manual, Watermark, Brisbane.
- Doherty J, Fienen MN, Hunt RJ (2010) Approaches to highly parameterized inversion: Pilot-point theory, guidelines, and research directions. US Geological Survey Scientific Investigations Report 2010–5168.
- Domenico PA, Schwartz FW (1990) *Physical and chemical hydrogeology*. Wiley & Sons, New York.
- Duchi V, Minissale A (1995) Distribuzione delle manifestazioni gassose nel settore peritirrenico toscano-laziale e loro interazione con gli acquiferi superficiali. *Boll Soc Geol Ital* 114:337–351.
- ENEL (1987) *Inventario delle risorse geotermiche nazionali*. Repubblica Italiana, Ministero dell'Industria, del Commercio e dell'Artigianato. <http://unmig.mise.gov.it/> (Accesso 02.05.2016).
- Evans W, Cook P (2002) What is a sustainable yield for Australia's groundwater systems? Int. Assoc. Hydrogeologists Darwin Conference: balancing the groundwater budget, Darwin May, 12-17, 2002.
- Freeze RA, Cherry JA (1979) *Groundwater*. Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- Funciello R, Locardi E, Lombardi G, Parotto M (1977) The main volcanic groups of Latium: relations between structural evolution and petrogenesis. *Geol Romana* 15:279–300.
- Gambardella B, Cardellini C, Chiodini G, Frondini F, Marini L, Ottonello G, Vetuchi Zuccolini M (2004) Fluxes of deep CO₂ in the volcanic areas of central-southern Italy. *J Volcanol Geotherm Res* 136:31-52.
- Harbaugh AW, McDonald MG (1996) Programmer's documentation for MODFLOW-96, an update to the U.S. Geological Survey modular finite-difference ground-water flow model: U.S. Geological Survey Open-File Report 96-486.
- ISPRA (2012) Progetto Corine land cover map 2012. <http://www.sinanet.isprambiente.it/it/progetti/corine-land-cover-1> (Accesso 13.06.2016).
- Kalf RP, Woolley DR (2005) Applicability and methodology of determining sustainable yield in groundwater systems. *Hydrogeol J* 13:295–312.
- La Torre P, Nannini R, Sollevanti F (1981) Geothermal exploration in central Italy: geophysical survey in Cimino Range area. In: European Association of Exploration Geophysicists, 43th Meeting, Venice, 26–29 May 1981.
- Lardini D, Nappi G (1987) I cicli eruttivi del complesso vulcanico cimino. *Rend Soc Ital Mineral Petrol* 42:141–153.
- Locardi E (1965) Tipi di ignimbrite di magmi mediterranei. Le ignimbrite del vulcano di Vico. *Atti Soc Toscana Sci Natural* 72:53–173.
- Lohman SW (1972) *Ground-water hydraulics*. US Geological Survey, Professional Paper 708.
- Mandel S, Shiftan ZL (1981) *Ground-water resources. Investigation and development*. Academic Press, New York.
- Marini L, Chiodini G (1994) The role of carbon dioxide in the carbonate-evaporite geothermal systems of Tuscany and Latium (Italy). *Acta Vulcanol* 5:95-104.
- Mattias PP, Ventriglia V (1970) La regione vulcanica dei Monti Cimino e Sabatini. *Mem Soc Geol Ital* 9:331–384.

- McDonald MG, Harbaugh AW (1988) A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model. Techniques of Water-Resources Investigations of the US Geological Survey, Book 6, Chap A1, pp 83–375.
- Minissale A, Duchi V (1988) Geothermometry on fluids circulating in a carbonate reservoir in north-central Italy. *J Volcanol Geotherm Res* 35:237–252.
- Minissale A, Kerrick DM, Magro G, Murell MT, Paladini M, Rihs S, Sturchio NC, Tassi F, Vaselli O (2002) Geochemistry of Quaternary travertines in the region north of Rome (Italy): structural, hydrologic and paleoclimatic implications. *Earth Planet Sci Lett* 203:709–728.
- Mongelli F, Zito G, Ciaranfi N, Pieri P (1989) Interpretation of heat flow density of the Apennine Chain, Italy. *Tectonophysics* 164:267–280.
- Pagano G. (2004) Le variazioni di portata della Sorgente Bullicame: periodo 1855-2004 da dati storici e dell'archivio S.Te.G.A. I° Rapporto per il Comune di Viterbo. Comune di Viterbo, Viterbo.
- Piscopo V, Barbieri M, Monetti V, Pagano G, Pistoni S, Ruggi E, Stanzione D (2006) Hydrogeology of thermal waters in Viterbo area, central Italy. *Hydrogeol J* 14:1508–1521.
- Provincia di Viterbo (2008) Rapporto sullo stato dell'ambiente 2008. Provincia di Viterbo http://www.provincia.vt.it/agenda21/Indice_Rapp2008.asp (Accesso 10.6.2016).
- Regione Lazio (2008-2010) Valorizzazione dei materiali di cava del Comune di Viterbo. Studio delle eventuali interferenze con le risorse idrotermali del bacino minerario di Viterbo. Delimitazione delle aree di tutela e protezione tenuto conto delle attività estrattive in atto. Rapporti I, II, III e IV. Università degli Studi della Tuscia, Viterbo.
- Rumbaugh JO, Rumbaugh DB (2011) Groundwater Vistas v 6. Environmental Simulations Inc. http://www.groundwatermodels.com/ESI_Software.php
- Schoeller H (1962) *Les eaux souterraines*. Masson, Paris.
- Sollevanti F (1983) Geologic, volcanologic and tectonic setting of the Vico-Cimino area, Italy. *J Volcanol Geotherm Res* 17:203–217.
- Sophocleous M (1997) Managing water resources systems: Why “safe yield” is not sustainable. *Ground Water* 35, no 4:561.
- Sophocleous M (2000) From safe yield to sustainable development of water resources: the Kansas experience. *J Hydrol* 235:27-43.