



**Dipartimento di Ecologia e Sviluppo Economico Sostenibile (DECOS)**

**Largo Università snc – 01100 Viterbo**

**PROGRAMMA DI RICERCA**

**VALORIZZAZIONE DEI MATERIALI DI CAVA DEL COMUNE  
DI VITERBO. STUDIO DELLE EVENTUALI INTERFERENZE  
CON LE RISORSE IDRO-TERMALI DEL BACINO  
MINERARIO DI VITERBO. DELIMITAZIONE DELLE AREE  
DI TUTELA E PROTEZIONE TENUTO CONTO DELLE  
ATTIVITA'  
ESTRATTIVE IN ATTO.**

**Rapporto integrativo**

***Verifica dell'influenza di nuove ipotesi di prelievo dal  
sistema idrotermale di Viterbo mediante simulazioni  
numeriche del flusso***

**Luglio, 2010**

**Direttore del Dipartimento  
Prof. Silvano Onofri**

**Responsabile scientifico della ricerca  
Prof. Vincenzo Piscopo**

# Indice

1. Introduzione	pag. 1
2. Nuovo modello di flusso del sistema idrotermale	pag. 2
2.1. Costruzione del modello	pag. 2
2.2. Calibrazione del modello	pag. 8
2.3. Risultati del modello	pag. 9
3. Scenari di prelievo idrico dal sistema idrotermale	pag. 14
4. Incertezze della modellazione e discussione dei risultati delle simulazioni	pag. 23
5. Simulazione del nuovo scenario di prelievo dal sistema idrotermale	pag. 30
6. Conclusioni	pag. 33
Bibliografia citata	pag. 34

## 1. Introduzione

Il presente rapporto illustra i risultati ottenuti nel corso dello studio condotto ad integrazione del Programma di Ricerca “*Valorizzazione dei materiali di cava del comune di Viterbo. Studio delle eventuali interferenze con le risorse idro-termali del bacino minerario di Viterbo. Delimitazione delle aree di tutela e protezione tenuto conto delle attività estrattive in atto*” svolto presso il Dipartimento di Ecologia e Sviluppo Economico Sostenibile dell’Università degli Studi della Tuscia di Viterbo.

Questo rapporto integrativo è stato richiesto dalla Regione Lazio, Dipartimento Economico Occupazionale – Direzione Regionale Attività Produttive Area 04, per valutare nuove ipotesi di prelievo dall’area idrotermale di Viterbo.

A tale scopo, sono stati considerati gli studi idrogeologici precedentemente condotti, sintetizzati nei rapporti delle tre fasi del Programma di Ricerca (in seguito citati come I, II e III Rapporto) condotto da questo Dipartimento. E’ stato inoltre elaborato un nuovo modello di flusso del sistema idrotermale per meglio esaminare l’influenza delle ipotesi proposte sulla circolazione idrica sotterranea dell’area. Attraverso il nuovo modello di flusso sono stati simulati diversi scenari di uso delle risorse idriche sotterranee dell’area idrotermale di Viterbo, comprendenti quelli proposti dalla Regione Lazio ed altri considerati sulla base dello stato attuale di conoscenza del sistema.

Lo studio è stato condotto dal gruppo di ricerca così composto:

Prof. Vincenzo Piscopo, responsabile della ricerca;

Dott.ssa Antonella Baiocchi, Ph.D. in Ecologia e Gestione delle Risorse Biologiche;

Dott.ssa Francesca Lotti, Ph.D. in Geologia Applicata, Geomorfologia e Idrogeologia;

Dott. Stefano Quadrani, dottore in Scienze Ambientali.

## **2. Nuovo modello di flusso del sistema idrotermale**

Il nuovo modello di flusso del sistema idrotermale di Viterbo è stato implementato utilizzando il codice MODFLOW, modello tridimensionale alle differenze finite sviluppato da MCDONALD & HARBAUGH (1988) per conto dell'USGS (UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY), attraverso l'interfaccia grafica PROCESSING MODFLOW 5.3 sviluppata da CHIANG E KINZELBACH (2001).

L'obiettivo della nuova modellazione è stato quello di simulare il flusso in condizioni stazionarie nell'acquifero termale ed in quello vulcanico ad esso sovrapposto. Partendo dai risultati del modello di flusso relativo all'acquifero termale (cfr. III Rapporto, Par. 4) ed in generale dai risultati dell'indagine idrogeologica e idrogeochimica condotta sull'area idrotermale di Viterbo (cfr. I, II e III Rapporto), è stato costruito il nuovo modello finalizzato a verificare le modalità di flusso nell'acquifero termale e ad esaminare i rapporti tra quest'acquifero e quello vulcanico ad esso sovrapposto. Dopo la calibrazione, il nuovo modello è stato utilizzato per esaminare la risposta dei due acquiferi interagenti a diversi scenari di uso delle risorse idriche sotterranee dell'area.

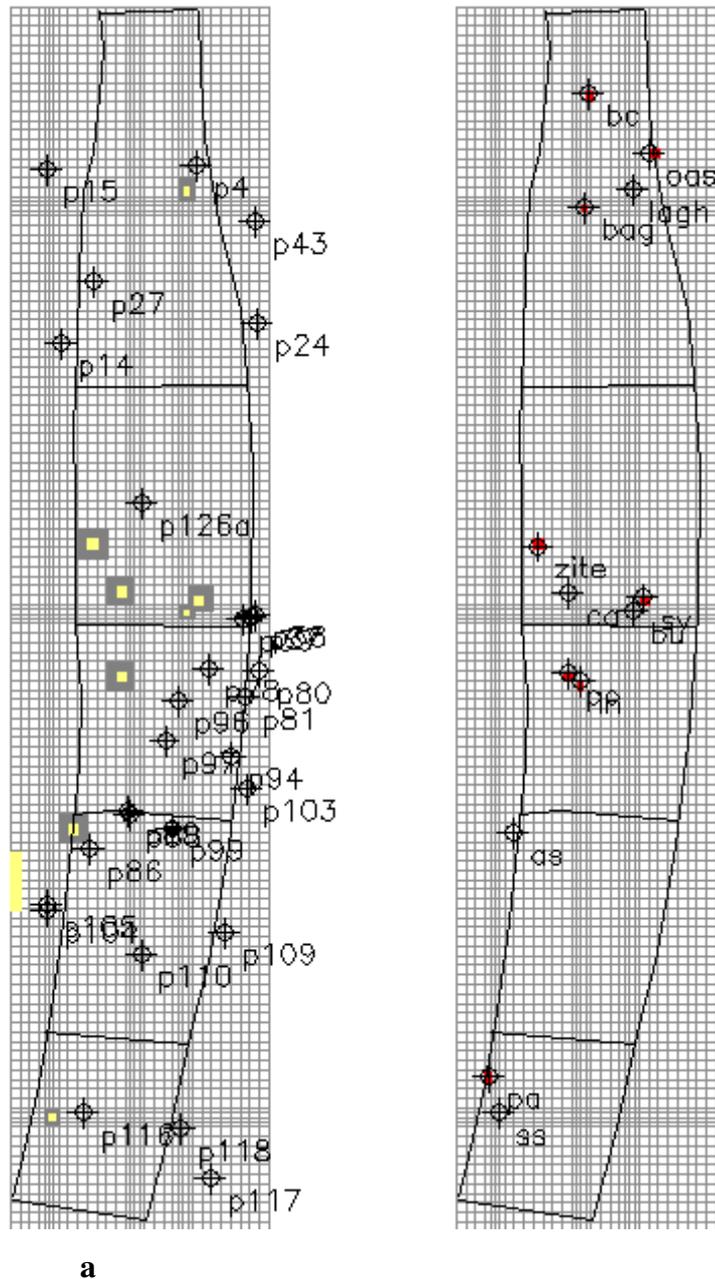
### **2.1 Costruzione del modello**

La costruzione del nuovo modello ha seguito le stesse fasi operative del modello di flusso relativo all'acquifero termale (cfr. III Rapporto, Par. 4), pertanto di seguito sono stati sinteticamente riportati gli aspetti peculiari della nuova modellazione.

I confini dell'area modellata, riportati in Figura 1, sono stati georeferenziati attraverso il programma ArcMap e importati direttamente come file *raster* in MODFLOW. La discretizzazione orizzontale è stata effettuata tramite una griglia costituita da 33 colonne e 135 righe con maglie di diverse dimensioni, più piccole in corrispondenza dei punti d'acqua termale (50×50 m o 50×100 m), più grandi altrove (100×100 m). L'area ricoperta dalla griglia è stata orientata coerentemente con l'assetto stratigrafico-strutturale dell'area idrotermale (Fig. 2).



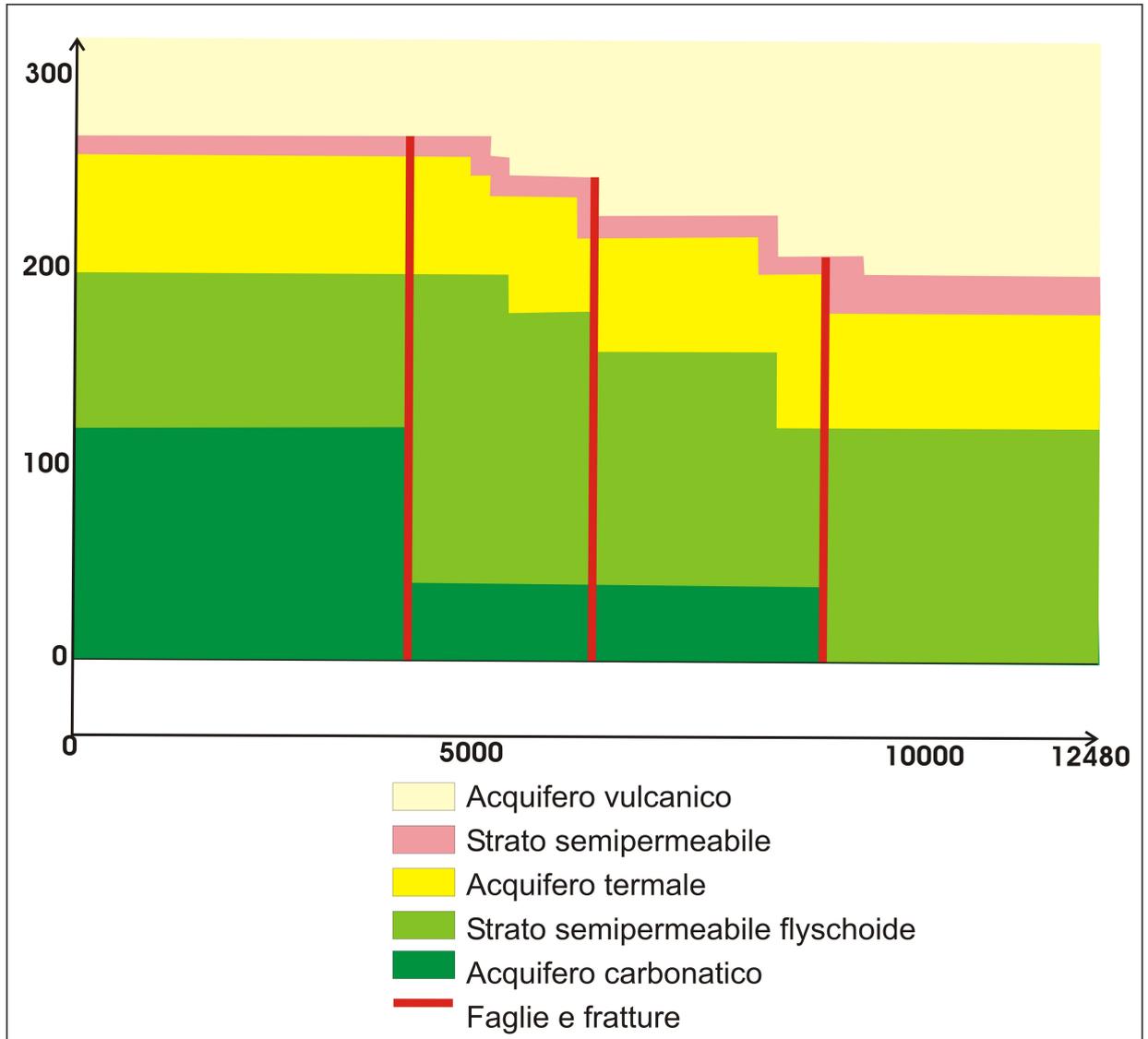
Fig. 1 - Area modellata.



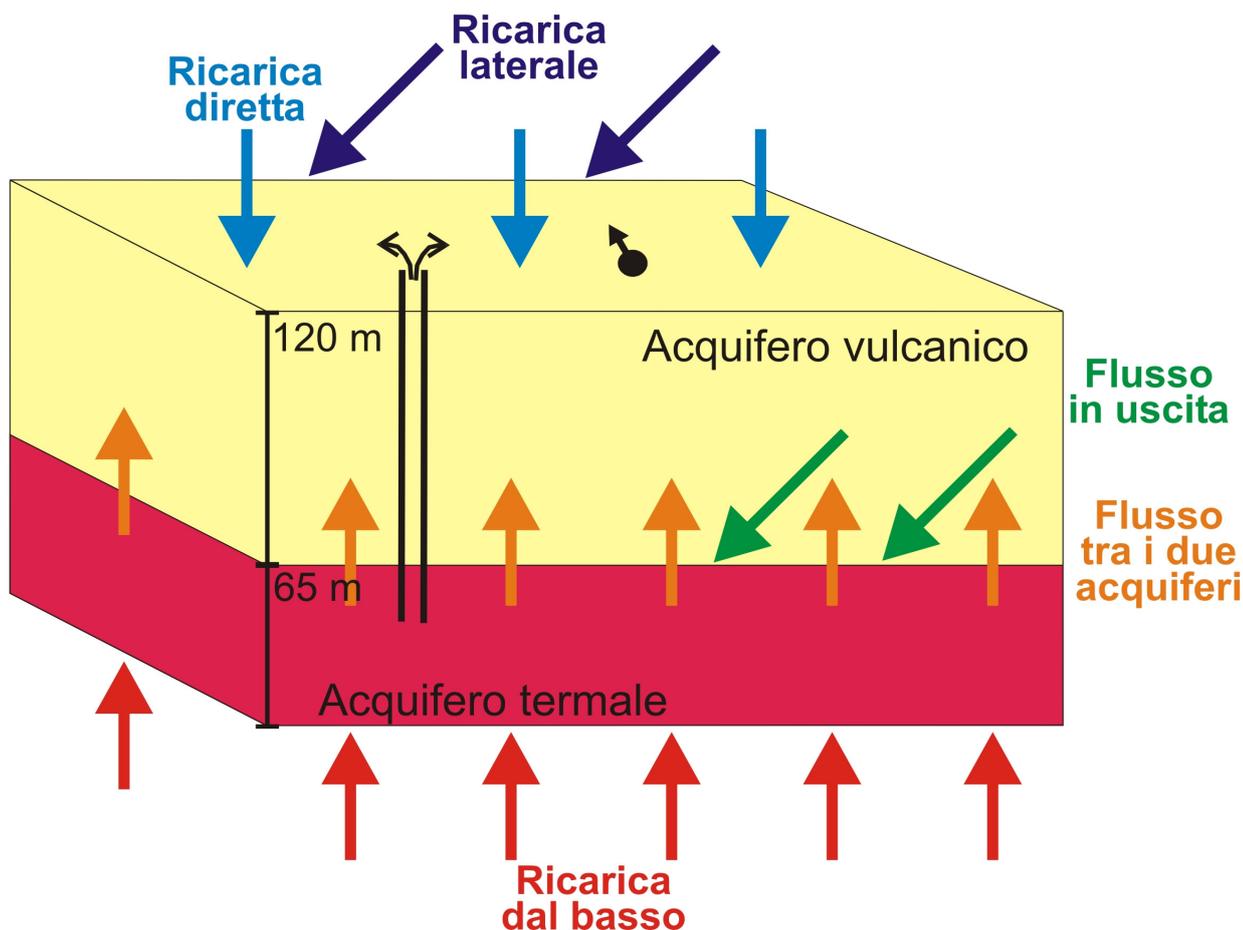
**Fig. 2** - Griglia in PMWIN del primo (a) e del secondo layer (b); i *drain* sono indicati in giallo; i *well* dell'acquifero termale sono indicati in rosso; gli altri punti sono i punti di osservazione dell'acquifero vulcanico e di quello termale.

La discretizzazione verticale è stata elaborata sulla base delle sezioni idrostratigrafiche disponibili (cfr. II Rapporto, Par. 5) e semplificandone l'andamento come mostrato nella sezione Nord-Sud di Figura 3. Il risultato è un modello composto da due *layers*, dove il primo rappresenta l'acquifero vulcanico libero ed il secondo corrisponde con l'acquifero termale confinato/libero. Per semplificare la geometria verticale, gli spessori dei due strati sono stati simulati con lo spessore medio derivante da quelli reali risultanti dalle sezioni idrostratigrafiche. Lo schema di riferimento della discretizzazione verticale risultante è quello riportato in Figura 4. Lo schema di circolazione idrica sotterranea del

nuovo modello considera dunque la ricarica dal basso dell'acquifero termale, il flusso al suo interno, il flusso all'interno dell'acquifero vulcanico e gli scambi idrici tra l'acquifero termale e quello vulcanico ad esso sovrapposto.



**Fig. 3** - Sezione idrostratigrafica schematica dell'area idrotermale di Viterbo orientata N-S.



**Fig. 4** Modello concettuale utilizzato per la simulazione numerica.

Per le condizioni al contorno, sono state considerate condizioni a flusso nullo per i confini laterali dei due *layers*.

All'interno delle celle rappresentanti le aree di emergenza delle acque termali (primo *layer*), è stata adottata la condizione *drain*, condizione definita dalla quota del dreno e dalla sua conduttanza idraulica. Quando il livello piezometrico simulato si trova al di sopra della quota del dreno, l'acqua fluisce nella cella ed esce dal sistema modellato con una portata proporzionale alla differenza di quota e alla conduttanza. La portata è zero quando il livello piezometrico è inferiore alla quota del dreno.

La condizione *drain* è stata utilizzata anche per rappresentare i flussi in uscita dal sistema verso l'acquifero vulcanico nel settore occidentale (Fig. 4); in questo caso le caratteristiche del dreno sono state ricavate dalla piezometria locale e dalle caratteristiche idrauliche dell'acquifero vulcanico (cfr. II Rapporto, Par. 7).

E' stata valutata la ricarica del sistema considerando quella dell'acquifero vulcanico e quella dell'acquifero termale.

Per l'acquifero vulcanico è stata considerata l'infiltrazione efficace sull'area, valutata in  $0.26 \text{ m}^3/\text{s}$  sulla base delle stime del bilancio idrologico disponibili (PISCOPO *et alii*, 2006; III Rapporto, Par. 3), e la ricarica laterale nel settore orientale evidenziata dalle ricostruzioni piezometriche prodotte (cfr. II Rapporto, Par. 6; III Rapporto, Par. 3). Sulla base dei valori di gradiente idraulico e di trasmissività misurati nella sezione di alimentazione dell'area modellata e della lunghezza della stessa sezione alimentante (cfr. II Rapporto, Par. 6 e 7), è stato calcolato un flusso in ingresso di  $0.10 \text{ m}^3/\text{s}$ . Questo valore sommato alla infiltrazione efficace ha permesso di definire la ricarica complessiva dell'acquifero vulcanico, pari a  $0.36 \text{ m}^3/\text{s}$ , che è stata distribuita uniformemente sul primo *layer*.

Per quanto riguarda l'acquifero termale, la ricarica dal basso è stata simulata assegnando flussi in entrata per un totale di circa  $0.15 \text{ m}^3/\text{s}$ , uniformemente distribuiti sul secondo *layer*, in accordo con le stime condotte precedentemente sulla potenzialità dell'acquifero termale (cfr. II Rapporto, Par. 8) e con i risultati del primo modello di flusso (cfr. III Rapporto, Par. 4).

I valori dei carichi idraulici in ingresso nel modello (*initial heads*) sono stati ricavati dalle misure piezometriche e dalle ricostruzioni elaborate precedentemente, distinguendo i dati relativi all'acquifero vulcanico da quelli relativi all'acquifero termale (cfr. II Rapporto, Par. 6; III Rapporto, Par. 4).

Per la caratterizzazione idraulica delle celle attive, gli acquiferi sono stati assunti isotropi nel piano orizzontale ed adottando quale conducibilità idraulica verticale una percentuale di quella orizzontale in fase di calibrazione. I valori di conducibilità idraulica iniziali sono stati attribuiti uniformemente per i due *layers* partendo da quelli risultanti dalla trasmissività ricavata dalle prove di emungimento disponibili per l'acquifero vulcanico e per l'acquifero termale (cfr. II Rapporto, Par. 7). I valori iniziali della conducibilità idraulica nel piano orizzontale attribuiti al primo ed al secondo *layer* sono stati rispettivamente di  $8.0 \times 10^{-5} \text{ m/s}$  e  $1.2 \times 10^{-5} \text{ m/s}$ , valori questi ricavati tenendo conto dello spessore degli acquiferi saturi interessati dalle prove di emungimento. In fase di calibrazione i valori di conducibilità idraulica sono stati variati nei due *layers* in modo da trovare il migliore accordo tra dati osservati e calcolati.

La valutazione dei flussi verticali di scambio tra l'acquifero termale e quello vulcanico è stata condotta in fase di calibrazione. Per rappresentare questi scambi idrici lungo la verticale è stata utilizzata la funzione *leakance*, alla quale è stato attribuito inizialmente un valore uniforme per entrambi i *layers* di  $2.9 \times 10^{-7} \text{ m/s}$ .

Quali punti di osservazione per la calibrazione del modello, processo finalizzato a minimizzare lo scarto tra il valore del carico idraulico misurato e calcolato dal modello, sono stati considerati 11 punti per l'acquifero termale (pozzi e sorgenti) e 28 pozzi per l'acquifero vulcanico (Fig. 2).

## 2.2 Calibrazione del modello

La calibrazione del modello è stata condotta considerando le morfologie piezometriche dei due acquiferi, la loro portata attraverso il modulo *water budget* ed il movimento delle particelle negli acquiferi attraverso l'utilizzo del modulo PMPATH.

La calibrazione è stata effettuata con il metodo *trial and error*, secondo il quale ad ogni modifica operata sui parametri di ingresso, il modello viene fatto girare e la risposta viene valutata di volta in volta. Pur disponendo di programmi di calibrazione automatica (PEST, UNCODE), la calibrazione con il metodo *trial and error* è stata preferita in quanto, in assenza di una fitta rete di osservazione, la modellazione inversa può condurre verso risultati non sempre fisicamente validi.

I parametri di ingresso variati entro range accettabili per minimizzare l'errore sono stati i valori e la distribuzione areale della conducibilità idraulica orizzontale e verticale nei due *layers*, la funzione *leakance* verticale per il primo *layer*, le conduttanze dei dreni e la diversa distribuzione spaziale della ricarica per il secondo *layer*.

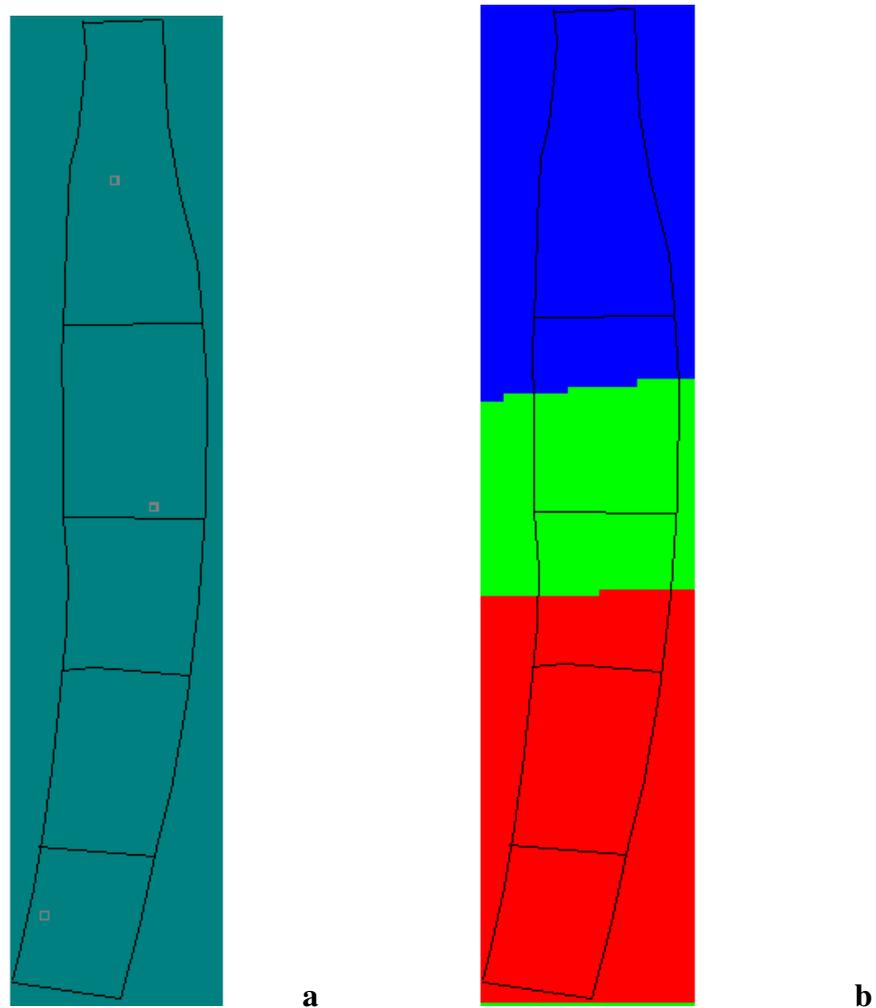
Gli output del modello monitorati sono stati: la morfologia piezometrica calcolata dal modello confrontata con le *initial heads*; le portate in entrata al primo *layer* provenienti dal secondo *layer*, la portata in uscita dal primo *layer* per via sotterranea e le portate in uscita dai dreni; la traiettoria delle particelle per avere una ulteriore verifica dello schema idrogeologico.

Centinaia di simulazioni hanno permesso di raggiungere un buon accordo tra il bilancio stimato dallo schema concettuale e quello calcolato dal modello e tra la piezometria misurata e quella calcolata. I risultati ottenuti sono stati avvalorati dalla coerenza idrogeologica dei circuiti idrici nei e tra i due acquiferi sovrapposti.

## 2.3 Risultati del modello

I risultati del nuovo modello calibrato sono sintetizzati di seguito e riguardano le caratteristiche idrauliche del sistema, la piezometria dei due acquiferi ed i flussi nei e tra i due *layers*. Il processo di calibrazione è stato ultimato considerando anche la coerenza delle traiettorie delle particelle, che, tenuto conto della differenza di carico idraulico esistente tra i due acquiferi, deve necessariamente prevedere percorsi orientati dal basso verso l'alto tra i due *layers*.

La zonazione della conducibilità idraulica dei due *layers*, ottenuta a valle della calibrazione, è mostrata in Figura 5 ed in Tabella 1, dove sono riportati i valori relativi confrontati con quelli iniziali.



**Fig. 5** - Zone a diversa conducibilità idraulica per l'acquifero vulcanico (a) e l'acquifero termale (b): i valori del parametro sono riportati in Tab. 1.

Layer	Conducibilità idraulica iniziale (m/s)		Conducibilità idraulica calibrata (m/s)		Colore Fig. 5
	Verticale	Orizzontale	Verticale	Orizzontale	
1	$8 \times 10^{-5}$	$8 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$	$2 \times 10^{-4}$	Azzurro
2	$1.2 \times 10^{-5}$	$1.2 \times 10^{-5}$	$1 \times 10^{-5}$	$1.3 \times 10^{-5}$	Blu
2			$1 \times 10^{-5}$	$1.2 \times 10^{-5}$	Verde
2			$1 \times 10^{-5}$	$3 \times 10^{-6}$	Rosso

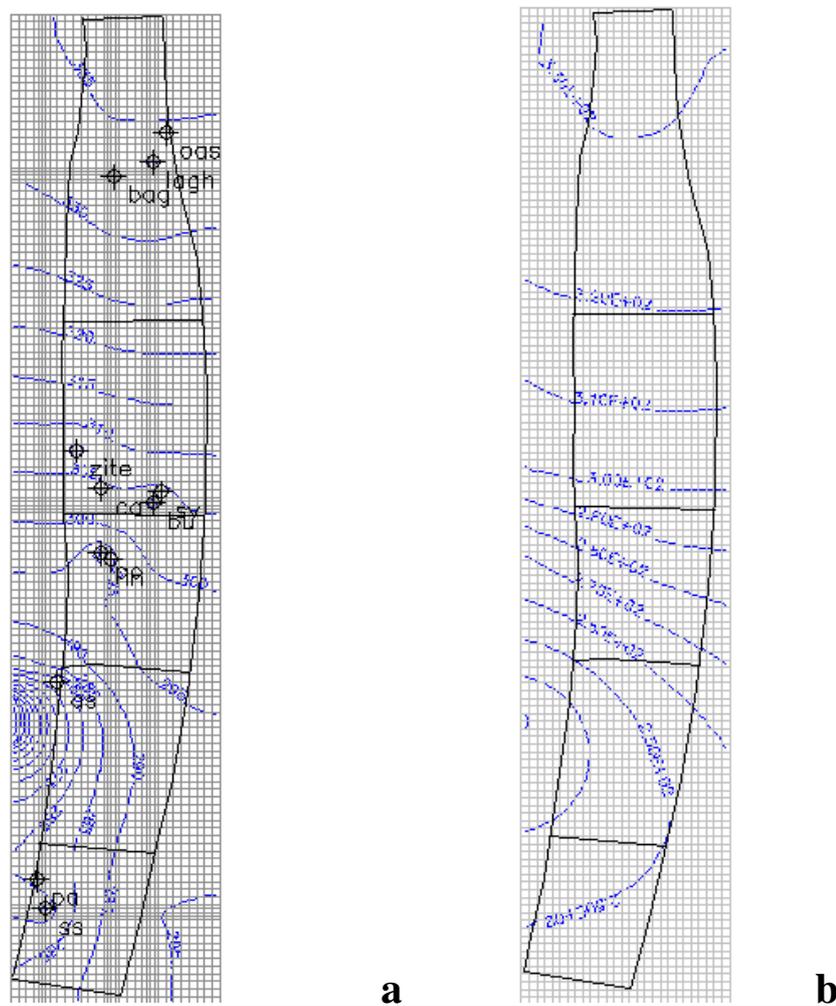
**Tab. 1** - Valori iniziali e di calibrazione della conducibilità idraulica.

Per quanto riguarda la funzione *leakance*, il valore ottenuto a valle della calibrazione risulta inferiore a quello di ingresso per entrambi i *layers* (Tab. 2).

Layer	Leakance iniziale (m/s)	Leakance calibrata (m/s)
1 Vulcanico	$2.9 \times 10^{-7}$	$1 \times 10^{-10}$
2 Termale	$2.9 \times 10^{-7}$	$1 \times 10^{-6}$

**Tab. 2** - Valori iniziali e di calibrazione della *leakance*.

La calibrazione della piezometria si è principalmente concentrata sull'acquifero termale, ponendo attenzione alla differenza relativa di carico idraulico esistente tra i due acquiferi sovrapposti piuttosto che alla quota assoluta della piezometria dell'acquifero vulcanico. La piezometria dell'acquifero termale risultante dal modello ha un andamento generale simile a quella risultante dalle poche misure disponibili per l'area (Fig. 6). In Tabella 3 sono riportate le quote ottenute dalla calibrazione relativamente ai punti d'acqua dell'acquifero termale considerati e modellati con la funzione *drain*.



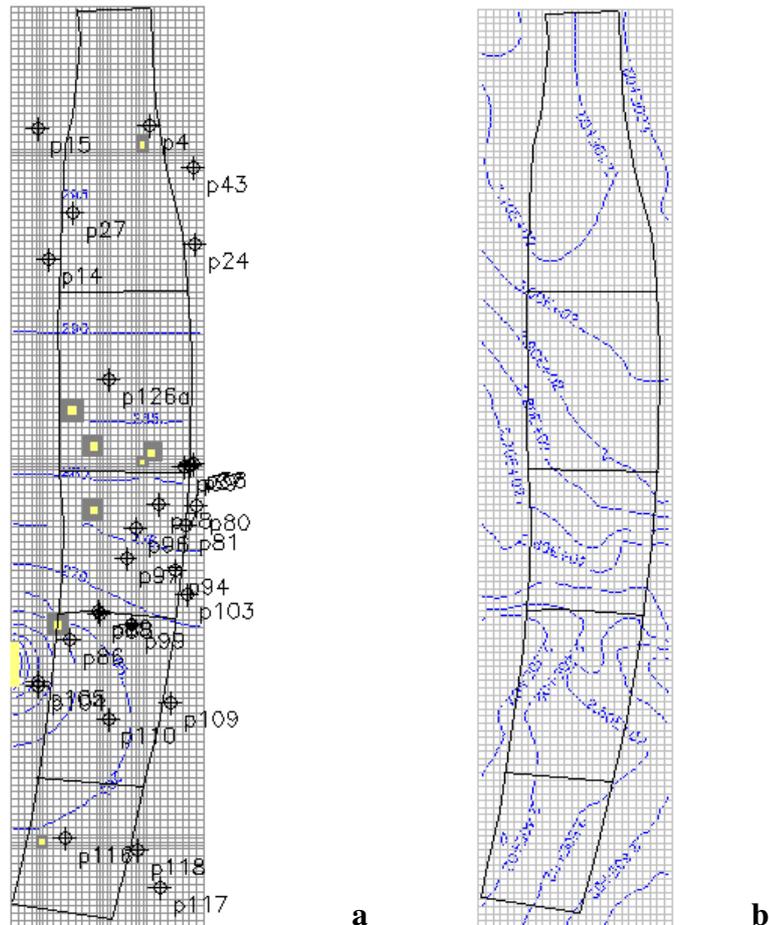
**Fig. 6 -** Piezometria dell'acquifero termale calibrata (a) e misurata (b).

Denominazione <i>drain</i>	Quota misurata del p.c. (m s.l.m.)	Quota piezometrica calibrata (m s.l.m.)
Area del Bagnaccio	314-320	314
Sorgente Bullicame	286	294
Area Zitelle	295	295
Sorgente Carletti	286	292
Area S. Valentino	285	292
Pozzetto	260	260
Area Asinello – S.Cristoforo	230	230
Area S. Sisto	244	244

**Tab. 3 -** Quote dei dreni misurati e calibrati.

La piezometria dell'acquifero vulcanico, riportata in Figura 7, anche se mostra un andamento delle direzioni di flusso coerenti con quelle delle ricostruzioni basate sui dati misurati, evidenzia un maggiore scarto tra valori piezometrici osservati e calcolati. Ciò è

da attribuire a diverse cause, tra le quali certamente quella che prevede una totale assenza di prelievi dall'acquifero vulcanico, condizione questa che è stata successivamente esaminata. E' verificata però la condizione misurata circa la differenza di carico idraulico positiva tra i valori rilevati nell'acquifero termale e quelli relativi all'acquifero vulcanico, condizione questa ulteriormente verificata anche mediante l'utilizzo del programma PMPATH.



**Fig. 7 -** Piezometria dell'acquifero vulcanico calibrata (a) e misurata (b).

I risultati della calibrazione dei flussi è stata effettuata mediante l'applicazione *water budget*, suddividendo il sistema in più zone. Una sintesi di questi risultati è riportata in Tabella 4.

Nell'acquifero vulcanico le entrate sono costituite dalla ricarica diretta e dagli apporti provenienti dal secondo *layer*. Le uscite totali dall'acquifero vulcanico sono state simulate come flussi dal *drain* del limite occidentale del sistema.

Nell'acquifero termale le entrate sono rappresentate da flussi dal basso. Le uscite dall'acquifero termale, oltre che dai già segnalati travasi verso l'acquifero vulcanico,

sono costituite dalle portate effluenti dalle emergenze idrotermali (pozzi e sorgenti). Queste portate sono state calibrate tenendo conto dei valori misurati nel corso delle indagini, valori risultati essere confrontabili alla sommatoria media degli ultimi 25 anni (cfr. II Rapporto, Par. 8).

<b>Acquifero</b>	<b>Flussi</b>	<b>Portata (L/s)</b>
Vulcanico	In entrata dalla ricarica	344
	In entrata dall'acquifero termale	111
	In uscita nel settore occidentale	455
Termale	In entrata dal basso	176
	In uscita area del Bagnaccio	8.6
	In uscita sorgente Bullicame	10.5
	In uscita area Zitelle	10.5
	In uscita sorgente Carletti	3.4
	In uscita area S. Valentino	4.0
	In uscita Pozzetto	22
	In uscita area Asinello –S.Cristoforo	2.4
	In uscita area S. Sisto	3.9
Totale uscite emergenze termali		65.3

**Tab. 4** - Flussi calibrati da *water budget*.

### 3. Scenari di prelievo idrico dal sistema idrotermale

Le ipotesi di prelievo dall'acquifero termale sono state fornite dalla Regione Lazio secondo tre modelli di gestione dell'intero sistema idrotermale (Tab. 5).

Area sorgiva	Concessionario	Sorgente o pozzo	I ipotesi Portata (L/s)	II ipotesi Portata (L/s)	III ipotesi Portata (L/s)
Bullicame	Comune di Viterbo		14	20	23
Bullicame	Kurhouse Int.	Pozzo S. Valentino	5	5	5
Bagnaccio	Comune di Viterbo	Pozzo Bagnaccio	10	15	10
Zitelle	Regione Lazio – Comune di Viterbo	Pozzo e sorgente Zitelle	10	10	10
Terme di Viterbo	Ex-INPS		5	5	5
Paliano	Free-Time	Pozzo Paliano1	10	20	20
Oasi	Fenis Immobiliare	Pozzo Oasi	2	2	2
			<b>Totale 56</b>	<b>Totale 77</b>	<b>Totale 75</b>

**Tab. 5** - Ipotesi di prelievo dall'acquifero termale proposte dalla Regione Lazio.

La I ipotesi si riferisce a prelievi ad oggi effettivamente autorizzati anche se non completamente praticati, se si fa riferimento, per esempio, al Pozzo Bagnaccio, che risulta attualmente chiuso, o ai pozzi delle Terme di Viterbo (ex-INPS), che attualmente non erogano più spontaneamente, se non in occasione della temporanea riduzione o disattivazione degli altri pozzi presenti nell'area. Le altre ipotesi (II e III) si riferiscono ad altri possibili utilizzi della risorsa idrotermale previsti dalla Regione Lazio e differiscono dalla prima per la portata derivata dall'area del Bullicame, dal Pozzo Bagnaccio e dall'area Paliano. Inoltre, è stato richiesto di valutare anche l'incidenza di una ulteriore possibile derivazione in località Bacucco per una portata massima di 2 L/s. Le ipotesi proposte dalla Regione Lazio sono state tradotte in scenari di prelievo e simulati attraverso il modello di flusso per verificare la loro incidenza sul sistema idrogeologico. I prelievi previsti in Tabella 5 sono stati ubicati nelle relative celle attraverso la funzione *well* (Fig. 2b).

Dalla Tabella 5 risulta che le principali variazioni di portata di prelievo rispetto al modello calibrato, nel seguito indicato come condizione *pre-development*, riguardano i pozzi Bagnaccio e Paliano. Per maggiore chiarezza, le prime due simulazioni hanno riguardato rispettivamente l'influenza dell'uno e dell'altro pozzo sul resto del sistema. I risultati sono riportati nelle Tabelle 6 e 7, in termini di flussi uscenti dalle emergenze

idrotermali simulate rispetto alle condizioni *pre-development*, e relativa variazione percentuale.

Acquifero	Flussi	Portata (L/s)	Per 10 L/s		Per 15 L/s	
		<i>Pre-development</i>	(L/s)	%	(L/s)	%
Vulcanico	In entrata dalla ricarica	344				
	In entrata dall'acquifero termale	111	106	-5	103	-7
	In uscita nel settore occidentale	455	450	-1	447	-2
Termale	In entrata dal basso	176				
	In uscita area del Bagnaccio	8.6	6	-30	4.7	-45
	In uscita sorgente Bullicame	10.5	9.9	-6	9.6	-9
	In uscita area Zitelle	10.5	9.7	-8	9.2	-12
	In uscita sorgente Carletti	3.4	3.2	-6	3.0	-12
	In uscita area S. Valentino	4.0	3.8	-5	3.7	-8
	In uscita Pozzetto	22	21.7	-1	21.5	-2
	In uscita area Asinello –S.Cristoforo	2.4	2.38	-1	2.37	-1
In uscita area S. Sisto	3.9	3.9	0	3.9	0	
Totale uscite emergenze termali		65.3	70.6	+8	73.0	+12

**Tab. 6** - Influenza della sola derivazione dal Pozzo Bagnaccio sulle uscite dal sistema, per portate di 10 e 15 L/s.

Acquifero	Flussi	Portata (L/s)	Per 10 L/s		Per 20 L/s	
		<i>Pre-development</i>	(L/s)	%	(L/s)	%
Vulcanico	In entrata dalla ricarica	344				
	In entrata dall'acquifero termale	111	104	-6	98	-12
	In uscita nel settore occidentale	455	448	-2	440	-3
Termale	In entrata dal basso	176				
	In uscita area del Bagnaccio	8.6	8.5	-1	8.4	-2
	In uscita sorgente Bullicame	10.5	10.3	-2	10.0	-5
	In uscita area Zitelle	10.5	10.4	-1	10.3	-2
	In uscita sorgente Carletti	3.4	3.3	-3	3.3	-3
	In uscita area S. Valentino	4.0	3.9	-3	3.9	-3
	In uscita Pozzetto	22	21.8	-1	21.6	-2
	In uscita area Asinello –S.Cristoforo	2.4	2.3	-4	2.3	-4
In uscita area S. Sisto	3.9	2.3	-41	0.6	-85	
Totale uscite emergenze termali		65.3	72.8	+11	80.4	+23

**Tab. 7** - Influenza della sola derivazione dal Pozzo Paliano sulle uscite dal sistema, per portate di 10 e 20 L/s.

E' stata successivamente simulata l'influenza sull'intero sistema delle variazioni di portata ipotizzate per la sola area sorgiva del Bullicame – Concessione Comune di Viterbo, per la quale in Tabella 5 sono previste tre ipotesi a 14, 20 e 23 L/s. Queste portate sono state attribuite quali derivazioni dal Pozzetto, simulando le influenze sugli altri flussi in uscita. I risultati sono dettagliati in Tabella 8.

Acquifero	Flussi	Portata (L/s)	Per 14 L/s		Per 20 L/s		Per 23 L/s	
		<i>Pre-development</i>	(L/s)	%	(L/s)	%	(L/s)	%
Vulcanico	In entrata dalla ricarica	344						
	In entrata dall'acquifero termale	111	115	+4	112	+1	111	0
	In uscita nel settore occidentale	455	459	+1	457	0	456	0
Termale	In entrata dal basso	176						
	In uscita area del Bagnaccio	8.6	8.7	+1	8.6	0	8.5	-1
	In uscita sorgente Bullicame	10.5	12	+17	11	+5	10.2	-3
	In uscita area Zitelle	10.5	12	+17	10.7	+2	10.3	-2
	In uscita sorgente Carletti	3.4	3.9	+15	3.5	+3	3.3	-3
	In uscita area S. Valentino	4.0	4.5	+13	4.1	+4	4.0	0
	In uscita Pozzetto	22	14		20		23	
	In uscita area Asinello – S.Cristoforo	2.4	2.5	+4	2.4	0	2.4	0
In uscita area S. Sisto	3.9	4.0	+3	4.0	+3	4.0	+3	
Totale uscite emergenze termali		65.3	61.6	-6	64.3	-1	65.7	+1

**Tab. 8** - Influenza della sola variazione della derivazione dal Pozzetto sulle uscite dal sistema, per portate di 14, 20 e 23 L/s.

Infine sono stati simulati gli scenari complessivi di prelievo dal sistema secondo le tre ipotesi proposte dalla Regione Lazio. Le tre ipotesi di prelievo sono state simulate una prima volta considerando le portate indicate nella Tabella 5 (ipotesi I, II e III) ed una seconda volta aggiungendo anche il prelievo per una portata di 2 L/s dalla località Bacucco (ipotesi Ia, IIa e IIIa). I risultati delle simulazioni sono riportati nelle Tabelle 9, 10 e 11, in termini di flussi uscenti dai *drains* e di variazione percentuale rispetto alle condizioni *pre-development*. In Figura 8 sono riportate le piezometrie dell'acquifero termale risultanti dagli scenari Ia, IIa e IIIa.

Acquifero	Flussi	Portata (L/s)	Ipotesi I		Ipotesi Ia	
		<i>Pre-development</i>	(L/s)	%	(L/s)	%
Vulcanico	In entrata dalla ricarica	344				
	In entrata dall'acquifero termale	111	98	-12	97	-13
	In uscita nel settore occidentale	455	444	-2	443	-3
Termale	In entrata dal basso	176				
	In uscita area del Bagnaccio	8.6	5.1	-41	4.6	-46
	In uscita sorgente Bullicame	10.5	9	-14	8.9	-15
	In uscita area Zitelle	10.5	10		10	
	In uscita sorgente Carletti	3.4	3	-12	3	-12
	In uscita area S. Valentino	4.0	5		5	
	In uscita Pozzetto	22	14		14	
	In uscita area Asinello –S.Cristoforo	2.4	2.3	-4	2.3	-4
	In uscita area S. Sisto	3.9	2.3	-41	2.3	-41
	Terme di Viterbo – ex INPS		5		5	
	Paliano		10		10	
	Oasi		2		2	
	Pozzo Bagnaccio		10		10	
	Pozzo Bacucco				2	
Totale uscite emergenze termali		65.3	77.7	+19	79.1	+21

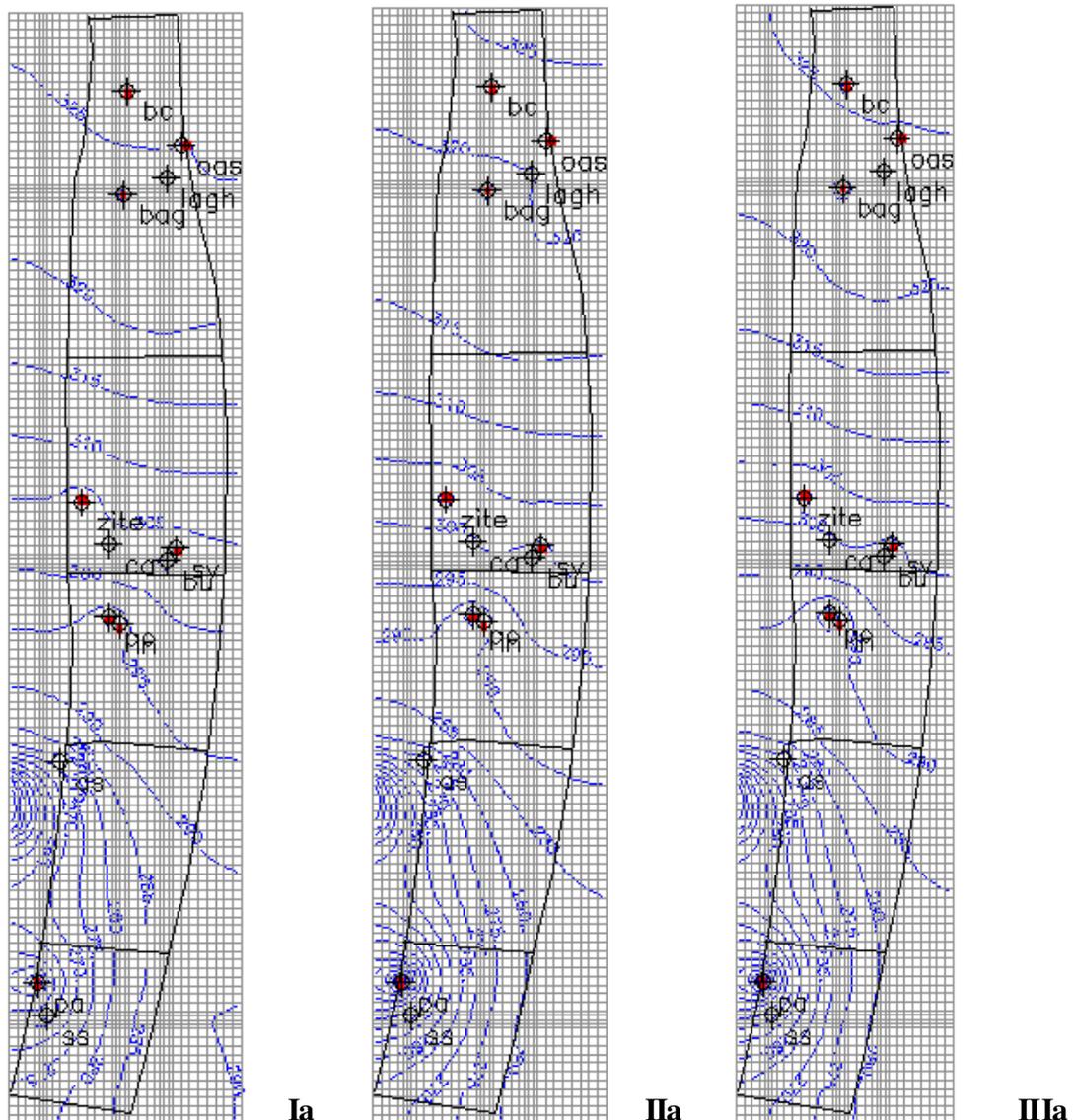
**Tab. 9** - Scenario simulato con riferimento alle ipotesi di prelievo I e Ia.

Acquifero	Flussi	Portata (L/s)	Ipotesi II		Ipotesi IIa	
		<i>Pre-development</i>	(L/s)	%	(L/s)	%
Vulcanico	In entrata dalla ricarica	344				
	In entrata dall'acquifero termale	111	86	-23	85	-23
	In uscita nel settore occidentale	455	430	-5	429	-6
Termale	In entrata dal basso	176				
	In uscita area del Bagnaccio	8.6	3.5	-59	3.0	-65
	In uscita sorgente Bullicame	10.5	6.4	-39	6.2	-40
	In uscita area Zitelle	10.5	10		10	
	In uscita sorgente Carletti	3.4	2.3	-32	2.25	-34
	In uscita area S. Valentino	4.0	5		5	
	In uscita Pozzetto	22	20		20	
	In uscita area Asinello –S.Cristoforo	2.4	2.2	-8	2.2	-8
	In uscita area S. Sisto	3.9	0.5	-87	0.5	-87
	Terme di Viterbo – ex INPS		5		5	
	Paliano		20		20	
	Oasi		2		2	
	Pozzo Bagnaccio		15		15	
	Pozzo Bacucco				2	
Totale uscite emergenze termali		65.3	91.9	+41	93.1	+43

**Tab. 10** - Scenario simulato con riferimento alle ipotesi di prelievo II e IIa.

Acquifero	Flussi	Portata (L/s)	Ipotesi III		Ipotesi IIIa	
		<i>Pre-development</i>	(L/s)	%	(L/s)	%
Vulcanico	In entrata dalla ricarica	344				
	In entrata dall'acquifero termale	111	87	-22	86	-23
	In uscita nel settore occidentale	455	431	-5	430	-5
Termale	In entrata dal basso	176				
	In uscita area del Bagnaccio	8.6	4.7	-45	4.2	-51
	In uscita sorgente Bullicame	10.5	6.0	-43	5.85	-44
	In uscita area Zitelle	10.5	10		10	
	In uscita sorgente Carletti	3.4	2.2	-35	2.16	-36
	In uscita area S. Valentino	4.0	5		5	
	In uscita Pozzetto	22	23		23	
	In uscita area Asinello –S.Cristoforo	2.4	2.18	-9	2.16	-10
	In uscita area S. Sisto	3.9	0.5	-87	0.5	-87
	Terme di Viterbo – ex INPS		5		5	
	Paliano		20		20	
	Oasi		2		2	
	Pozzo Bagnaccio		10		10	
	Pozzo Bacucco				2	
Totale uscite emergenze termali		65.3	90.6	+39	91.9	+41

**Tab. 11** - Scenario simulato con riferimento alle ipotesi di prelievo III e IIIa.

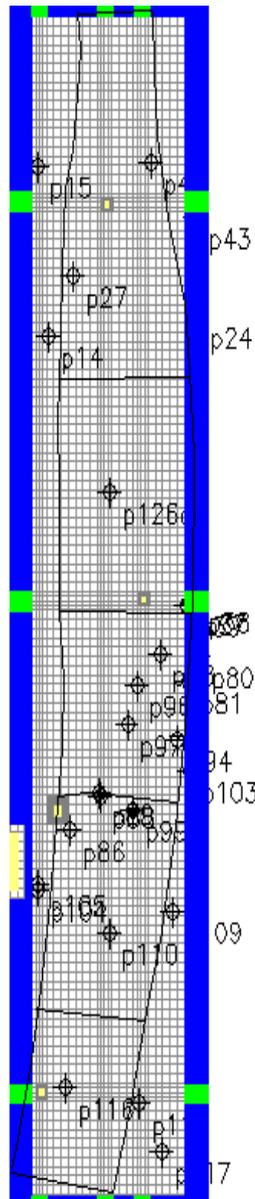


**Fig. 8 –** Piezometrie dell’acquifero termale relative agli scenari Ia, IIa e IIIa.

Sono stati inoltre considerati i prelievi dall’acquifero vulcanico ipotizzando diversi scenari di prelievo differenziati sia per portata complessiva di emungimento dall’acquifero vulcanico sia per la distribuzione dei prelievi all’interno dell’area idrotermale. I risultati delle simulazioni hanno evidenziato un sostanziale impatto dei prelievi dall’acquifero vulcanico sulle risorse dell’acquifero termale.

Uno degli scenari meno impattanti tra quelli simulati ha previsto l’emungimento dall’acquifero vulcanico solo per una fascia marginale all’area idrotermale (Fig. 9). Per questa fascia è stata simulata una portata di emungimento complessiva di 25 L/s, considerata principalmente per il fabbisogno irriguo. E’ stato inoltre considerato il prelievo di 10 L/s della sorgente Pidocchio, emergenza questa alimentata dall’acquifero vulcanico ed utilizzata ai fini idropotabili (cfr. II Rapporto, Par. 4.2; III Rapporto, Par.

5). Sono state quindi verificate le influenze di un prelievo complessivo dall'acquifero vulcanico di 35 L/s sulle altre uscite del sistema nelle tre ipotesi di prelievo dall'acquifero termale Ia, IIa e IIIa. I risultati, in termini di flussi e di percentuale di variazione dei flussi rispetto alle condizioni *pre-development*, sono sintetizzati nelle Tabelle 12, 13 e 14.



**Fig. 9** – Griglia del primo layer con indicazione delle celle sottoposte ad emungimento dall'acquifero vulcanico (celle in azzurro e verde).

Acquifero	Flussi	Portata (L/s)	Ipotesi Ia		Ia + prelievi dal vulcanico	
		<i>Pre-development</i>	(L/s)	%	(L/s)	%
Vulcanico	In entrata dalla ricarica	344				
	In entrata dall'acquifero termale	111	97	-13	99.5	-10
	In uscita nel settore occidentale	455	443	-3	411	-10
Termale	In entrata dal basso	176				
	In uscita area del Bagnaccio	8.6	4.6	-46	4.0	-53
	In uscita sorgente Bullicame	10.5	8.9	-15	7.8	-26
	In uscita area Zitelle	10.5	10		10	
	In uscita sorgente Carletti	3.4	3	-12	2.7	-20
	In uscita area S. Valentino	4.0	5		5	
	In uscita Pozzetto	22	14		14	
	In uscita area Asinello –S.Cristoforo	2.4	2.3	-4	2.3	-4
	In uscita area S. Sisto	3.9	2.3	-41	2.0	-49
	Terme di Viterbo – ex INPS		5		5	
	Paliano		10		10	
	Oasi		2		2	
	Pozzo Bagnaccio		10		10	
	Pozzo Bacucco		2		2	
Totale uscite emergenze termali		65.3	79.1	+21	76.8	+18

**Tab. 12** - Scenario simulato con riferimento alle ipotesi Ia e con prelievi dall'acquifero vulcanico per una portata complessiva di 35 L/s.

Acquifero	Flussi	Portata (L/s)	Ipotesi IIa		IIa + prelievi dal vulcanico	
		<i>Pre-development</i>	(L/s)	%	(L/s)	%
Vulcanico	In entrata dalla ricarica	344				
	In entrata dall'acquifero termale	111	85	-23	87	-22
	In uscita nel settore occidentale	455	429	-6	397	-13
Termale	In entrata dal basso	176				
	In uscita area del Bagnaccio	8.6	3.0	-65	2.2	-74
	In uscita sorgente Bullicame	10.5	6.2	-40	5.1	-51
	In uscita area Zitelle	10.5	10		10	
	In uscita sorgente Carletti	3.4	2.25	-34	1.9	-44
	In uscita area S. Valentino	4.0	5		5	
	In uscita Pozzetto	22	20		20	
	In uscita area Asinello –S.Cristoforo	2.4	2.2	-8	2.1	-12
	In uscita area S. Sisto	3.9	0.5	-87	0.35	-91
	Terme di Viterbo – ex INPS		5		5	
	Paliano		20		20	
	Oasi		2		2	
	Pozzo Bagnaccio		15		15	
	Pozzo Bacucco		2		2	
Totale uscite emergenze termali		65.3	93.1	+43	90.6	+39

**Tab. 13** - Scenario simulato con riferimento alle ipotesi IIa e con prelievi dall'acquifero vulcanico per una portata complessiva di 35 L/s.

Acquifero	Flussi	Portata (L/s)	Ipotesi IIIa		IIIa + prelievi dal vulcanico	
		<i>Pre-development</i>	(L/s)	%	(L/s)	%
Vulcanico	In entrata dalla ricarica	344				
	In entrata dall'acquifero termale	111	86	-23	88	-21
	In uscita nel settore occidentale	455	430	-5	398	-12
Termale	In entrata dal basso	176				
	In uscita area del Bagnaccio	8.6	4.2	-51	3.4	-60
	In uscita sorgente Bullicame	10.5	5.85	-44	4.7	-55
	In uscita area Zitelle	10.5	10		10	
	In uscita sorgente Carletti	3.4	2.16	-36	1.8	-47
	In uscita area S. Valentino	4.0	5		5	
	In uscita Pozzetto	22	23		23	
	In uscita area Asinello -S.Cristoforo	2.4	2.16	-10	2.1	-12
	In uscita area S. Sisto	3.9	0.5	-87	0.35	-91
	Terme di Viterbo – ex INPS		5		5	
	Paliano		20		20	
	Oasi		2		2	
	Pozzo Bagnaccio		10		10	
	Pozzo Bacucco		2		2	
Totale uscite emergenze termali		65.3	91.9	+41	89.3	+37

**Tab. 14** - Scenario simulato con riferimento alle ipotesi IIIa e con prelievi dall'acquifero vulcanico per una portata complessiva di 35 L/s.

#### **4. Incertezze della modellazione e discussione dei risultati delle simulazioni**

Prima di discutere i risultati ottenuti dal modello, è necessario ricordare quali sono le assunzioni di base del codice utilizzato e quali sono i principali limiti evidenziati durante l'implementazione del modello.

Il MODFLOW è un codice di calcolo che simula il flusso delle acque sotterranee in un mezzo saturo, omogeneo e poroso dove il fluido ha densità e temperatura uniformi. Nel presente studio la modellazione riguardante l'acquifero vulcanico superficiale e l'acquifero termale ha avuto come finalità la verifica e una maggiore conoscenza dello schema idrogeologico dell'area di studio, con particolare riferimento agli scambi idrici tra i due acquiferi.

Un limite del modello risiede proprio nelle differenze di temperatura e densità presenti nel sistema ed in particolare tra i flussi dell'acquifero vulcanico e quelli dell'acquifero termale. Nonostante esistano altri codici di calcolo che tengono conto della presenza di gradienti di concentrazione e di temperatura, questi presentano una maggiore complessità ed un numero di parametri di input maggiore rispetto al MODFLOW. Non disponendo del set di dati minimo per l'implementazione di tali codici (ad esempio il FEFLOW), si è preferito come primo approccio l'utilizzo di un codice già collaudato focalizzandosi esclusivamente sulla modellazione del flusso. In ogni caso anche nell'applicazione di modelli di simulazione più robusti che prevedono i cosiddetti *coupled phenomena* è sempre necessario inizialmente considerare gli effetti dei diversi fattori individualmente. In tal senso, il modello implementato sebbene basato sul flusso guidato essenzialmente dal carico idraulico, si colloca nel contesto di un primo approccio alle dinamiche del flusso in un sistema complesso quale quello in esame e, quindi, il modello elaborato ha come obiettivo quello di fornire un contributo di prima approssimazione al problema in esame. Pertanto i risultati delle simulazioni necessitano di un appropriata validazione ex-post mediante il necessario monitoraggio, come specificato in seguito (cfr. Par. 6), validazioni peraltro sempre necessarie allorché si utilizzano modelli matematici per applicazioni nel campo della gestione delle risorse idriche sotterranee, a prescindere dalla robustezza della simulazione condotta.

Nell'acquifero termale il numero ridotto dei punti di osservazione del carico idraulico, problema tipico delle aree idrotermali, introduce un margine di errore nei dati di partenza che, inevitabilmente, si ripercuote sui dati simulati. Si può tuttavia affermare

che le incertezze che ne derivano possono essere considerate accettabili per uno studio su piccola scala, quale quello in esame.

Altro limite della modellazione è stato quello di partire da una distribuzione uniforme o quasi delle conducibilità idrauliche nei due *layers*, trascurando, in prima approssimazione, le differenze di conducibilità dovute alla presenza di faglie e fratture. Questa limitazione non inficia i risultati se essi vengono letti nell'ottica di un mezzo poroso equivalente, cioè se si considerano le risposte degli acquiferi ai diversi stress non come effetti localizzati a livello puntuale, ma piuttosto come effetti mediati nell'ambito di volumi di acquiferi di riferimento rappresentativi di condizioni medie e quindi che prescindono dalla eterogeneità idraulica alla scala della singola frattura o della singola faglia. In altri termini, i risultati del modello sono da considerare una buona approssimazione se utilizzati per esaminare la risposta degli acquiferi agli stress idrodinamici indotti alla scala dell'intero sistema. Ovviamente le verifiche e le validazioni a scala locale sono conseguenza dell'anzidetto necessario monitoraggio *ex-post* della risposta del sistema sottoposto agli stress idrodinamici simulati.

Alla luce dei limiti del modello esposti, i risultati della modellazione in regime stazionario rappresentano comunque elementi di novità per la comprensione delle modalità di flusso nell'area idrotermale. Inoltre il modello conferma lo schema generale di circolazione idrica del sistema evidenziando la interconnessione tra i due acquiferi sovrapposti (cfr. III Rapporto, Par. 3). Ottenuta una prima calibrazione del modello, soprattutto per quanto riguarda il flusso nell'acquifero termale, il modello è stato utilizzato per verificare l'impatto sul sistema di diversi scenari di prelievo dall'acquifero termale e da quello vulcanico.

I risultati della modellazione sono stati rappresentati in termini di flussi in uscita dal sistema, assumendo valori costanti per la ricarica dell'acquifero vulcanico e di quello termale. Questa assunzione da ricondurre a condizioni medie, essendo la ricarica dei due acquiferi derivante dai dati medi delle diverse grandezze utilizzate per i calcoli, è funzionale alla verifica delle interferenze tra i diversi punti di prelievo dai due acquiferi. Con questo grado di incertezza i risultati, relativamente ai valori dei flussi calcolati e soprattutto ai valori delle loro variazioni nelle diverse simulazioni, devono essere considerati con una approssimazione percentuale del 2-3 %. A tale scopo nelle tabelle dei risultati sono indicate sempre le variazioni in termini percentuali dei flussi simulati rispetto a quelli del modello calibrato in condizioni *pre-development*.

Passando ai risultati della modellazione, un primo commento è da riferire ai risultati ottenuti relativamente alle condizioni *pre-development*. Queste condizioni si riferiscono a quelle di una ricarica dall'acquifero vulcanico ottenuta da valutazioni medie (bilancio idrologico e portata della falda dell'acquifero vulcanico nel settore orientale), ad uscite dall'acquifero termale medie relative agli ultimi 25 anni ed all'assenza di prelievi dall'acquifero vulcanico.

La calibrazione ha evidenziato una portata di ricarica dal basso dell'acquifero termale di 176 L/s, valore questo differente per il 21 % rispetto a quello calcolato per via analitica e per il 15 % rispetto a quello calcolato attraverso il primo modello di flusso (cfr. III Rapporto, Par. 4). Di questo flusso in entrata circa il 63 % ha recapito verso le attuali emergenze idrotermali (sorgenti e pozzi termali) per un totale di circa 65 L/s, valore questo coerente con quello misurato nel corso delle indagini e che è sostanzialmente rimasto invariato come portata complessiva nell'arco degli ultimi 25 anni, anche se sono variati i punti di emergenza in relazione alla storia delle perforazioni nell'area idrotermale (cfr. II Rapporto, Par. 8). Le uscite dalle diverse emergenze idrotermali, simulate mediante la funzione *drain*, sono da intendersi localizzate per aree e relativamente alle dimensioni delle celle della griglia utilizzata, in altri termini i valori riportati in Tabella 4 per ogni singolo *drain* possono riferirsi anche alla sommatoria delle uscite da più sorgenti o pozzi termali poco distanti tra loro e, quindi, ricadenti nella stessa cella.

Il modello relativo alle condizioni *pre-development* evidenzia inoltre un travaso verso l'acquifero vulcanico del flusso dell'acquifero termale per una percentuale di circa il 37 %. Questi travasi già evidenziati dal primo modello di flusso, sono testimoniati anche dai risultati delle indagini idrogeochimiche (cfr. III Rapporto, Par. 2 e 3).

La ricarica dell'acquifero vulcanico, calcolata in 344 L/s, ed i flussi di risalita dall'acquifero termale, calcolati in 111 L/s, costituiscono le uscite complessive dall'acquifero vulcanico e sono state simulate, in condizioni *pre-development*, come uscite verso il settore occidentale del sistema per semplificare la modellazione. Nella realtà effettivamente esistono consistenti uscite verso il settore occidentale del sistema, così come evidenziano peraltro le ricostruzioni piezometriche e la caratterizzazione idrogeochimica dell'acquifero vulcanico; esistono però anche uscite nel reticolo idrografico, verso qualche sorgente ed attraverso pozzi che captano l'acquifero vulcanico (cfr. III Rapporto, Par. 3). Quest'ultima assunzione non incide sui risultati del

flusso dell'acquifero termale; inoltre, successivamente sono stati considerati anche i prelievi dall'acquifero vulcanico.

Mantenendo invariate la ricarica dal basso dell'acquifero termale e la ricarica dell'acquifero vulcanico, sono state poi condotte diverse simulazioni di prelievo dai due acquiferi. Nelle diverse simulazioni i prelievi sono stati imposti mediante emungimenti a portata costante, attraverso la funzione *well*, e sono stati osservati gli effetti sulle altre emergenze idrotermali del modello calibrato nelle condizioni *pre-development*. Anche se il controllo è stato effettuato attraverso le piezometrie e le traiettorie delle particelle, i risultati dei diversi scenari sono stati esplicitati in termini di flussi uscenti e soprattutto di variazione percentuale dei flussi uscenti dal sistema (*drain* del settore occidentale dell'acquifero vulcanico), dei flussi di travaso dall'acquifero termale verso quello vulcanico e dei flussi uscenti dai *drains* rappresentanti le uscite idrotermali presenti in condizioni *pre-development*. Pertanto nelle Tabelle 6-13, dove non è riportata la percentuale di variazione si tratta di pozzi il cui flusso è imposto nello scenario di simulazione.

Una prima serie di simulazioni ha riguardato prelievi solo dall'acquifero termale sulla base delle indicazioni fornite dalla Regione Lazio.

Dapprima sono state valutate le influenze dei prelievi dai pozzi Bagnaccio, Paliano e Pozzetto per diverse portate di emungimento, valutando i loro effetti singolarmente sull'intero sistema e cioè attivando un solo pozzo di prelievo per volta. E' risultato che il prelievo dal singolo pozzo influenza localmente le altre emergenze idrotermali, riducendone la portata solo di quelle più prossime all'area di prelievo (Tab. 6, 7 e 8).

In particolare per il pozzo Bagnaccio, per la massima portata simulata (15 L/s), l'influenza si propaga fino alla zona centrale del sistema idrotermale; dalla zona di ubicazione del Pozzetto fino al margine meridionale l'influenza è trascurabile essendo la variazione percentuale di flusso sulle altre emergenze minore al 3 %, limite di significatività della simulazione (Tab. 6). Per il pozzo Paliano, per la massima portata simulata (20 L/s), l'influenza è evidente soprattutto sulle emergenze idrotermali della zona meridionale (soprattutto sull'area S. Sisto) e secondariamente su quelle della zona centrale (Tab. 7). Per il pozzo Pozzetto, le simulazioni condotte evidenziano che variazioni della portata di prelievo da questa captazione hanno una sostanziale influenza sulle emergenze idrotermali della zona centrale (aree del Bullicame, Zitelle, S. Valentino e Carletti); risulta infatti che per una riduzione del prelievo da questo pozzo a 14 L/s, rispetto al valore di portata misurato nel corso dell'indagine (intorno a 22 L/s;

cfr. II Rapporto, Par. 7 e 8), si hanno variazioni di flusso tra il 13 ed il 17 % per le anzidette emergenze (Tab. 8).

I risultati di queste prime simulazioni sono in accordo con quelli delle prove di emungimento e di interferenza condotte sui pozzi Paliano, Bagnaccio e Pozzetto nel corso delle indagini (cfr. II Rapporto, Par. 7), che hanno effettivamente evidenziato sostanziali variazioni della portata dei punti d'acqua termali prossimi ai pozzi testati.

Successivamente sono state condotte simulazioni ancora con prelievi dal solo acquifero termale ma considerando l'influenza di diversi pozzi di emungimento. Gli scenari considerati sulla base delle indicazioni fornite dalla Regione Lazio hanno compreso portate complessive di emungimento da pozzi a flusso imposto di 56, 77 e 75 L/s (rispettivamente ipotesi I, II e III) e di 58, 79 e 77 L/s (rispettivamente ipotesi Ia, IIa e IIIa), queste ultime comprendenti una possibile ulteriore concessione di 2 L/s al limite settentrionale dell'area idrotermale. Come si può vedere in Figura 2a la distribuzione dei punti di prelievo mostra una maggiore densità nelle zone centrale e settentrionale.

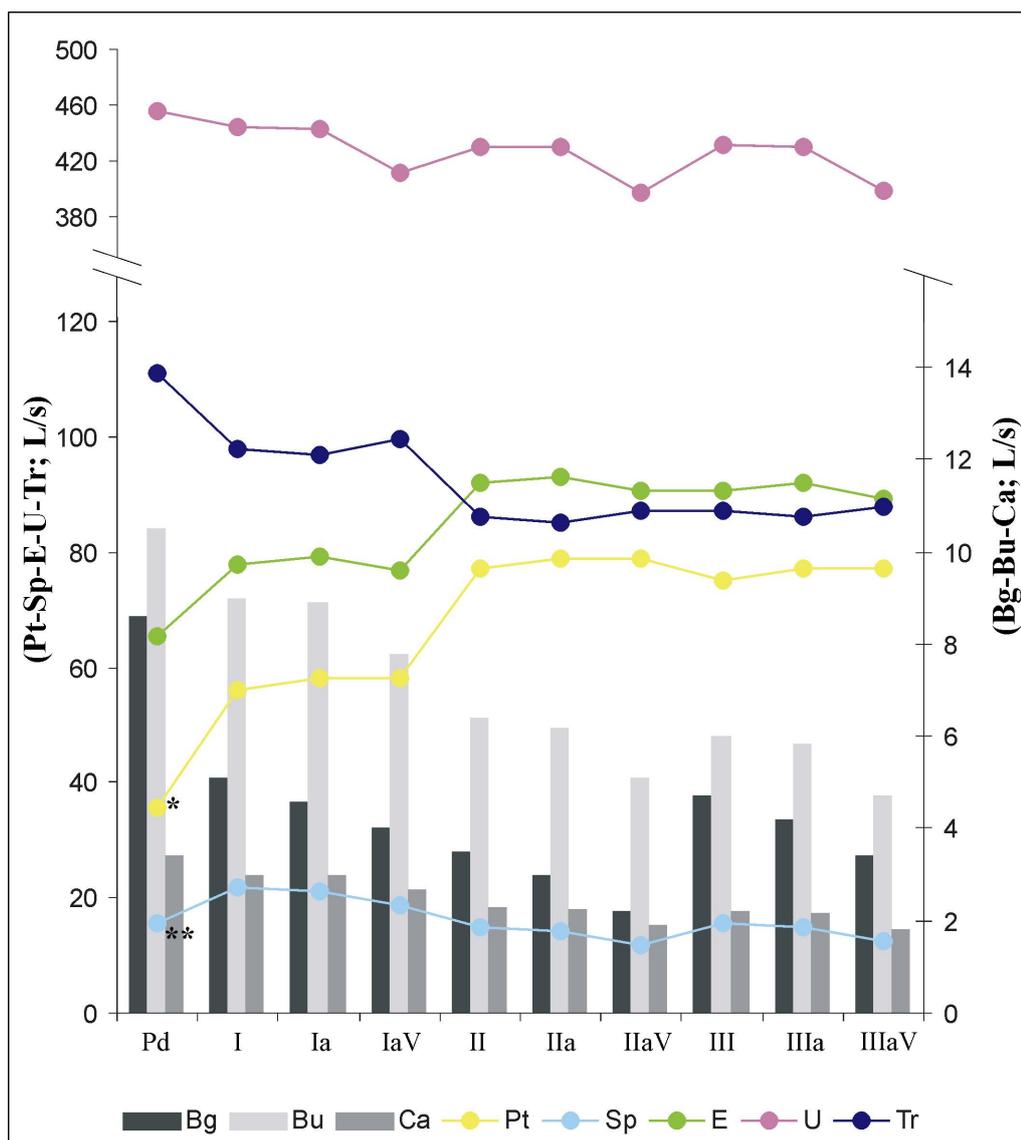
Anche in questo caso i risultati sono stati esplicitati in termini di flussi uscenti e soprattutto di variazione percentuale dei flussi uscenti dal sistema (Tab. 9, 10 e 11). Dalle tabelle e dal grafico di Figura 10, che sintetizza e compara i risultati delle diverse simulazioni, è evidente una graduale diminuzione della portata delle emergenze idrotermali, rappresentate come *drains*, all'aumentare della portata di prelievo dal sistema, contestualmente diminuiscono anche i flussi di travaso tra i due acquiferi e quelli in uscita dal sistema. I punti di emergenza idrotermale *pre-development* più interessati dalla diminuzione di portata sono ovviamente quelli ubicati in prossimità dei pozzi di prelievo simulati.

Oltre alle ipotesi di prelievo dal solo acquifero termale, sono stati considerati anche ulteriori scenari comprendenti prelievi dall'acquifero vulcanico per complessivi 35 L/s, distribuiti tra emungimenti da pozzi ubicati nella fascia marginale dell'area modellata e da prelievi per circa 10 L/s dalla sorgente Pidocchio ad uso idropotabile. Anche in questo caso, risultano decrementi della portata delle emergenze idrotermali rispetto alle condizioni *pre-development* e dei flussi in uscita dal sistema (Tab. 12, 13 e 14). Nel grafico di Figura 10 sono rappresentati anche i risultati di queste ulteriori simulazioni.

Nell'anzidetto grafico è possibile comparare tra loro gli effetti dei diversi scenari di prelievo. In particolare, sono stati rappresentati anche: l'andamento della portata totale captata di acque termali mediante pozzi per le diverse ipotesi di prelievo; l'andamento della portata non captata di acque termali e quindi fruibile pubblicamente; l'andamento

della portata delle principali sorgenti “storiche”, quali il Bullicame, quelle alimentanti l’area del Bagnaccio comprendenti il laghetto omonimo e Carletti. Nel grafico sono rappresentate anche le portate di acque termali attualmente non captate (condizione *pre-development*); a questo proposito è da sottolineare che attualmente la portata del Bullicame non derivata verso le Terme dei Papi è solo di qualche litro al secondo, invece negli scenari simulati è prevista una captazione di acque termali per lo stabilimento termale esclusivamente mediante il Pozzetto.

Sulla base degli andamenti rappresentati in Figura 10 si può concludere che, ad eccezione degli scenari I, Ia e IaV, le ipotesi di captazione previste dagli altri scenari hanno un significativo impatto sulle risorse idriche del sistema idrotermale, soprattutto se si fa riferimento agli scenari che includono anche i prelievi dall’acquifero vulcanico (ipotesi IIaV e IIIaV). Proprio in relazione a quanto risultante da queste ultime considerazioni è stato simulato un ulteriore scenario di prelievo.



**Fig. 10** – Grafico degli andamenti delle diverse uscite dal sistema idrotermale relativamente agli scenari simulati (*Pd* condizioni *pre-development*; *I*, *II*, *III*, *Ia*, *IIa* e *IIIa* si riferiscono alle ipotesi riportate in Tab. 9-11; *IaV*, *IIaV* e *IIIaV* si riferiscono alle ipotesi che prevedono prelievi anche dall’acquifero vulcanico, come in Tab. 12-14).

Legenda: *Bg* emergenze area Bagnaccio; *Bu* sorgente Bullicame; *Ca* sorgente Carletti; *Pt* portata delle acque termali captate (\* portata effettivamente captata attualmente ed utilizzata dalle Terme dei Papi e Terme Salus); *Sp* portata delle emergenze idrotermali non captate (\*\* portata effettivamente presente attualmente in luoghi di pubblico accesso, quali le aree del Bagnaccio, Bullicame, Carletti, Asinello-S. Cristoforo); *E* portata delle emergenze idrotermali; *U* portata in uscita dal sistema nel settore occidentale; *Tr* portata di travaso dall’acquifero termale verso quello vulcanico.

## 5. Simulazione del nuovo scenario di prelievo dal sistema idrotermale

Una ulteriore possibilità di prelievo dal sistema idrotermale di Viterbo è stata disegnata a valle dei risultati delle precedenti simulazioni e considerando quanto derivante dall'analisi della portata sostenibile di prelievo dettagliata nel III Rapporto (cfr. Par. 5).

Il nuovo scenario di prelievo, definito in seguito ipotesi IV, è basato sui seguenti criteri:

1. la portata di prelievo di acque termali mediante pozzi non deve superare complessivamente 70 L/s come valore medio;
2. la distribuzione dei prelievi dai singoli pozzi di acque termali deve tener conto delle interferenze tra i pozzi stessi e con le sorgenti di acque termali che hanno valenza storico-culturale-sociale, al fine di assicurare a queste ultime una portata residuale significativa;
3. nella definizione dei prelievi dall'acquifero termale, bisogna tener conto anche dei suoi rapporti con l'acquifero vulcanico, assicurando i prelievi che da quest'ultimo avvengono per fini potabili e, per quanto possibile, quelli destinati agli altri usi, tra i quali il principale è quello irriguo.

Questi concetti, in parte già contenuti nelle altre simulazioni, sono stati ulteriormente specificati nell'ipotesi IV in modo da raggiungere un livello intermedio di utilizzo delle risorse idriche sotterranee dell'area compreso tra quello rappresentato dall'ipotesi IaV, certamente più cautelativa, e quelli rappresentati dalle ipotesi IIaV e IIIaV, certamente più impattanti sul sistema.

L'ipotesi IV ha quindi previsto una portata imposta di prelievo da pozzi dell'acquifero termale in totale di 70 L/s, considerando sostanzialmente il tipo di prelievo dell'ipotesi IIIa ma riducendo la pressione delle derivazioni di acque termali nella zona centrale, ovvero quella più densamente interessata da pozzi. A differenza dunque dell'ipotesi IIIa è stato previsto un prelievo di 21 L/s dal Pozzetto ed una portata nulla dai pozzi delle Terme di Viterbo – ex INPS. Questi ultimi pozzi peraltro sono ubicati a breve distanza dal Pozzetto ed interferiscono con esso come dimostrato attraverso le prove condotte (cfr. II Rapporto, Par. 7). Inoltre nell'area dove insistono il Pozzetto ed i pozzi delle Terme di Viterbo – ex INPS e nel suo intorno sono ubicate due delle sorgenti di valenza storico-culturale-sociale, quali il Bullicame e Carletti, che dalle precedenti simulazioni risentono fortemente dei prelievi praticati da questi pozzi.

Nell'ipotesi IV è stata mantenuta una portata di 20 L/s dal pozzo Paliano, in quanto ubicato in una zona lontana dalle sorgenti di valenza storico-culturale-sociale. Per il

pozzo Bagnaccio è stata considerata una portata di prelievo di 10 L/s, in quanto portate più alte, come risultante dalle precedenti simulazioni, condiziona, riducendolo, il flusso verso la zona centrale del sistema, essendo il pozzo Bagnaccio ubicato a monte idrogeologico rispetto alla zona centrale, quella più densamente interessata dai prelievi mediante pozzi dall'acquifero termale.

Infine è stato considerato un prelievo dall'acquifero vulcanico come nelle precedenti ipotesi IaV, IIaV e IIIaV, cioè comprendente una portata complessiva di 35 L/s, dei quali 10 L/s dalla sorgente Pidocchio e 25 L/s da pozzi relativi all'acquifero vulcanico ubicati nella fascia marginale dell'area modellata.

I risultati della simulazione sono rappresentati in Tabella 15 in termini di flussi ed in Figura 11 in termini di piezometria dell'acquifero termale.

Acquifero	Flussi	Portata (L/s)	Ipotesi IV	
		<i>Pre-development</i>	(L/s)	%
Vulcanico	In entrata dalla ricarica	344		
	In entrata dall'acquifero termale	111	92.4	-17
	In uscita nel settore occidentale	455	402	-12
Termale	In entrata dal basso	176		
	In uscita area del Bagnaccio	8.6	3.7	-57
	In uscita sorgente Bullicame	10.5	6.9	-34
	In uscita area Zitelle	10.5	10	
	In uscita sorgente Carletti	3.4	2.4	-29
	In uscita area S. Valentino	4.0	5	
	In uscita Pozzetto	22	21	
	In uscita area Asinello –S.Cristoforo	2.4	2.2	-8
	In uscita area S. Sisto	3.9	0.4	-90
	Terme di Viterbo – ex INPS		0	
	Paliano		20	
	Oasi		2	
	Pozzo Bagnaccio		10	
	Pozzo Bacucco		2	
Totale uscite emergenze termali		65.3	85.6	+31

**Tab. 15** - Scenario simulato con riferimento alle ipotesi IV comprendente prelievi dall'acquifero vulcanico per una portata complessiva di 35 L/s.

Il confronto dei risultati di quest'ultima simulazione con quelli delle precedenti ipotesi di prelievo evidenzia che l'ipotesi IV è da considerare uno scenario di prelievo intermedio tra l'ipotesi IaV (Tab. 12) e quelle II-IIa-IIaV e III-IIIa-IIIaV (Tab. 10,11, 13 e 14) in relazione ai flussi uscenti dai *drains* ed ai flussi di travaso tra i due acquiferi. L'ipotesi IV riduce meno di quelle IIaV e IIIaV le portate in uscita dal sistema. Inoltre nell'ipotesi che la captazione delle acque termali avvenga solo mediante pozzi, lo scenario IV è quello che consente il mantenimento di una portata non captata inferiore

alle ipotesi I, Ia e IaV, ma certamente superiore alle ipotesi IIaV e IIIaV, oltre che a quelle II, IIa e IIIa. Infine, l'ipotesi IV è quella che conserva una portata residua dalle sorgenti Bullicame e Carletti più alta di quella degli scenari II, IIa, IIaV, III, IIIa e IIIaV.



**Fig. 11** – Piezometria dell'acquifero termale relativa allo scenario IV.

## 6. Conclusioni

In questo rapporto integrativo sono sintetizzati gli ulteriori studi condotti con riferimento al sistema idrotermale di Viterbo, finalizzati a verificare la possibilità di nuove ipotesi di prelievo di acque sotterranee. A tale scopo è stato elaborato un nuovo modello di flusso e sono stati considerati i risultati dei precedenti studi.

Il nuovo modello di flusso ha permesso di verificare l'incidenza dei prelievi dall'acquifero termale secondo diverse ipotesi, considerando anche l'influenza di queste sull'acquifero vulcanico e l'influenza dei prelievi dai due acquiferi sul sistema considerato nella sua globalità, cioè tenendo conto delle interconnessioni tra i due acquiferi.

I risultati sono stati presentati in termini di flussi e variazione dei flussi per ogni scenario simulato, riportandoli alle condizioni attuali.

Lo scenario IV, tra quelli considerati, sembra essere quello più appropriato per la gestione futura del sistema idrotermale di Viterbo, in quanto è quello che sembra meglio rispondere ai criteri di prelievo sostenibile precedentemente definiti con specifico riferimento all'area idrotermale di Viterbo (cfr. III Rapporto, Par. 5), quali quelli legati alla valorizzazione ed al rilancio del termalismo dell'area, agli altri usi delle risorse idriche locali (potabile ed irriguo) ed alla conservazione dei valori storici, culturali e sociali associati ad alcune sorgenti termali.

Considerate le incertezze insite nell'approccio modellistico adottato, incertezze proprie di qualsiasi simulazione numerica, è importante ribadire, coerentemente a quanto già segnalato nei precedenti rapporti, che l'applicazione di uno qualsiasi degli scenari di prelievo simulato prevede necessariamente il monitoraggio a partire dalla completa attuazione dei piani di prelievo e la verifica dell'efficacia almeno nel corso di un biennio. I risultati del monitoraggio rappresentano la base imprescindibile per il collaudo dei piani adottati e per la loro eventuale ridefinizione. Il monitoraggio previsto per i punti d'acqua (pozzi e sorgenti) termali, ipotermali e freddi, così come dettagliato nel III Rapporto (Par. 6.3), dovrà essere gestito in modo centralizzato al fine di analizzare la risposta del sistema all'attuazione dei piani sulle sue diverse componenti e sulle interrelazioni esistenti tra le stesse.

## Bibliografia citata

CHIANG W. H., KINZELBACH W. (2001) – *3D-groundwater modeling with PMWIN*. Springer, New York, 346 pp.

MCDONALD M. G., HARBAUGH A. V. (1988) – *A modular three-dimensional finite-difference ground-water flow model*. Techniques of Water Investigations 06-A1, USGS, 576 pp.

PISCOPO V., BARBIERI M., MONETTI V., PAGANO G., PISTONI S., RUGGI E., STANZIONE D. (2006) – *Hydrogeology of the thermal waters in Viterbo area, central Italy*. Hydrogeology Journal, 14, 1508-1521.

I RAPPORTO REGIONE LAZIO (2008) - *Valorizzazione dei materiali di cava del comune di Viterbo. Studio delle eventuali interferenze con le risorse idro-termali del bacino minerario di Viterbo. Delimitazione delle aree di tutela e protezione tenuto conto delle attività estrattive in atto – Fase 1 Indagini sulle cave dismesse*. Dipartimento di Ecologia e Sviluppo Economico Sostenibile, Università della Tuscia, 37 pp.

II RAPPORTO REGIONE LAZIO (2009) - *Valorizzazione dei materiali di cava del comune di Viterbo. Studio delle eventuali interferenze con le risorse idro-termali del bacino minerario di Viterbo. Delimitazione delle aree di tutela e protezione tenuto conto delle attività estrattive in atto – Fase 2 Indagini idrogeologiche*. Dipartimento di Ecologia e Sviluppo Economico Sostenibile, Università della Tuscia, 137 pp.

III RAPPORTO REGIONE LAZIO (2009) - *Valorizzazione dei materiali di cava del comune di Viterbo. Studio delle eventuali interferenze con le risorse idro-termali del bacino minerario di Viterbo. Delimitazione delle aree di tutela e protezione tenuto conto delle attività estrattive in atto – Fase 3 Portata di prelievo sostenibile e criteri di protezione del sistema idrotermale*. Dipartimento di Ecologia e Sviluppo Economico Sostenibile, Università della Tuscia, 98 pp.