

# PERMESSO DI RICERCA DI RISORSE GEOTERMICHE FINALIZZATO ALLA SPERIMENTAZIONE DI UN IMPIANTO PILOTA DENOMINATO "CORTOLLA"

COMUNI DI MONTECATINI VAL DI CECINA – PROVINCIA DI PISA

PROPONENTE:

**R.T.I.**

Raggruppamento Temporaneo di Impresa



## PROGETTO DEFINITIVO

NUMERO ELABORATO:

**CRT-RP01-A16-V00**

TITOLO:

**MODELLO GEOLOGICO E NUMERICO**

DATA:

Febbraio 2017

PROGETTISTI:

**RENEWEM S.r.l**

Via Norvegia n° 68 - 56021 Cascina (PI) - ITALIA

UFFICI:

Renewem srl

Via Norvegia n° 68 - 56021 Cascina (PI) - ITALIA  
tel. 0039 050 6205317 fax. 0039 050 0987814

Cosvig

Via T. Gazzei n° 89 - Radicondoli (SI) - ITALIA  
tel. e fax. 0039 0577 752950

REVISIONE

DATA		NOTE
REV.1		
REV.2		
REV.3		





# **PERMESSO DI RICERCA DI RISORSE GEOTERMICHE FINALIZZATO ALLA SPERIMENTAZIONE DI UN IMPIANTO PILOTA DENOMINATO “CORTOLLA”**

COMUNI DI MONTECATINI VAL DI CECINA – PROVINCIA DI PISA

**PROCEDURA DI VALUTAZIONE DI IMPATTO AMBIENTALE**

## **MODELLO GEOLOGICO E NUMERICO**

**RENEWEM S.R.L.**

*Modello Geologico:*

Dott. W. Luperini

Dott. F. Martini

Dott. N. Sannino

*Modello Numerico:*

Steam Srl





## **Impianto Pilota Geotermico “CORTOLLA”**

### **Modellazione numerica del Serbatoio Geotermico del PR “Cortolla”**

*Preparato per:*  
**Renewem S.r.l.**

Febbraio 2017

*Codice Progetto:*  
P16\_RNW\_041

Revisione: 0

**STEAM**  
**Sistemi Energetici Ambientali**  
Via Ponte a Piglieri, 8  
I – 56122 Pisa  
Telefono +39 050 9711664  
Fax +39 050 3136505  
Email : [info@steam-group.net](mailto:info@steam-group.net)



**STEAM**

*Questo prodotto è stato realizzato nel rispetto delle regole stabilite dal sistema di gestione qualità conforme ai requisiti UNI EN ISO 9001: 2008 valutato da Bureau Veritas Italia S.p.A. e coperto dal certificato n. IT257421.*

*Renewem S.r.l*

# **Impianto Pilota Geotermico “CORTOLLA”**

## **MODELLAZIONE NUMERICA DEL SERBATOIO GEOTERMICO DEL PR “CORTOLLA”**



---

*Geol. Paolo Basile*

<b>Progetto</b>	<b>Rev</b>	<b>Preparato da</b>	<b>Rivisto da</b>	<b>Approvato da</b>	<b>Data</b>
P16_RNW_041	0	PB,	GB, RC	RC, WL, FM	27/02/2017

## INDICE

<b>1</b>	<b><i>PREMESSA</i></b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b><i>ARCHITETTURA DEL PROGETTO E CARATTERISTICHE TECNICHE-PROGETTUALI</i></b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b><i>SINTESI DEI DATI</i></b>	<b>4</b>
<b>3.1</b>	<b><i>DATI GEOLOGICI</i></b>	<b>4</b>
<b>3.2</b>	<b><i>DATI SISMICI</i></b>	<b>2</b>
<b>4</b>	<b><i>MODELLO GEOLOGICO-STRUTTURALE</i></b>	<b>8</b>
<b>4.1</b>	<b><i>SUPERFICI</i></b>	<b>8</b>
<b>4.2</b>	<b><i>MODELLO TERMICO</i></b>	<b>11</b>
<b>4.3</b>	<b><i>PARAMETRI</i></b>	<b>13</b>
<b>4.4</b>	<b><i>MODELLO GEOLOGICO TRIDIMENSIONALE</i></b>	<b>13</b>
<b>5</b>	<b><i>SIMULAZIONI NUMERICHE E MODELING TERMODINAMICO DEL SERBATOIO GEOTERMICO</i></b>	<b>16</b>
<b>5.1</b>	<b><i>MODELLO FISICO</i></b>	<b>17</b>
<b>5.2</b>	<b><i>RISULTATI DELLA MODELLAZIONE</i></b>	<b>20</b>
<b>6</b>	<b><i>CONCLUSIONI</i></b>	<b>30</b>
	<b><i>BIBLIOGRAFIA</i></b>	<b>31</b>



**PREMESSA**

L'area interessata dal progetto di Impianto Pilota Sperimentale di Cortolla è situata a circa 10 km a nord-ovest della grande area geotermica di Larderello-Travale.

L'area geotermica di Larderello è tuttora oggetto di coltivazione geotermica da parte di Enel Green Power. Nel corso degli anni l'area è stata oggetto di numerosi studi minerari, geologici, geofisici e di fisica del serbatoio, che sono stati più volte pubblicati in specifici lavori (i principali sono riportati nella bibliografia).

Nel presente lavoro sono state esaminate le stratigrafie e i dati di produzione dei pozzi più prossimi ai confini del Permesso di Ricerca. In particolare sono stati considerati i pozzi Orciatico 2, Orciatico 3 e Montecatini 1 al fine di ricostruire il modello geologico-strutturale di riferimento e di stimare con ragionevole approssimazione le caratteristiche chimico fisiche del fluido, le pressioni e temperature attese del serbatoio.

Tali dati, sia presi singolarmente che già interpretati da Romagnoli et alii, 2010 e Bellani e Gherardi 2013, per un'area molto più vasta e comprendente anche quella del Permesso "Cortolla", hanno permesso di ricostruire un modello geologico e geotermico.

Le modellazioni sono state condotte per l'area del Permesso di Ricerca Cortolla partendo dalla constatazione della loro appartenenza allo stesso grande sistema geotermico di Larderello.

Il modello geologico strutturale e termico, di seguito mostrato, è stato sviluppato prevalentemente da Renewem, mentre la simulazione numerica del serbatoio geotermico, in produzione e reiniezione, è stata effettuata da Steam con l'utilizzo del software Tough 2

## **ARCHITETTURA DEL PROGETTO E CARATTERISTICHE TECNICHE-PROGETTUALI**

Il progetto "CORTOLLA" è finalizzato all'utilizzo delle risorse geotermiche presenti in un'area della Toscana centro-meridionale, ubicata ad ovest del centro abitato di Montecatini Val di Cecina (PI), attraverso la preventiva sperimentazione, così come previsto dal D.Lgs 11 febbraio 2010, n.22 e s.m.i., di un impianto pilota con reiniezione del fluido geotermico nelle stesse formazioni di provenienza, con emissioni nulle e con potenza nominale installata non superiore a 5 MWe.


Dal punto di vista architettonico il progetto "Cortolla" si compone dei seguenti elementi principali (Figura 2.1a):

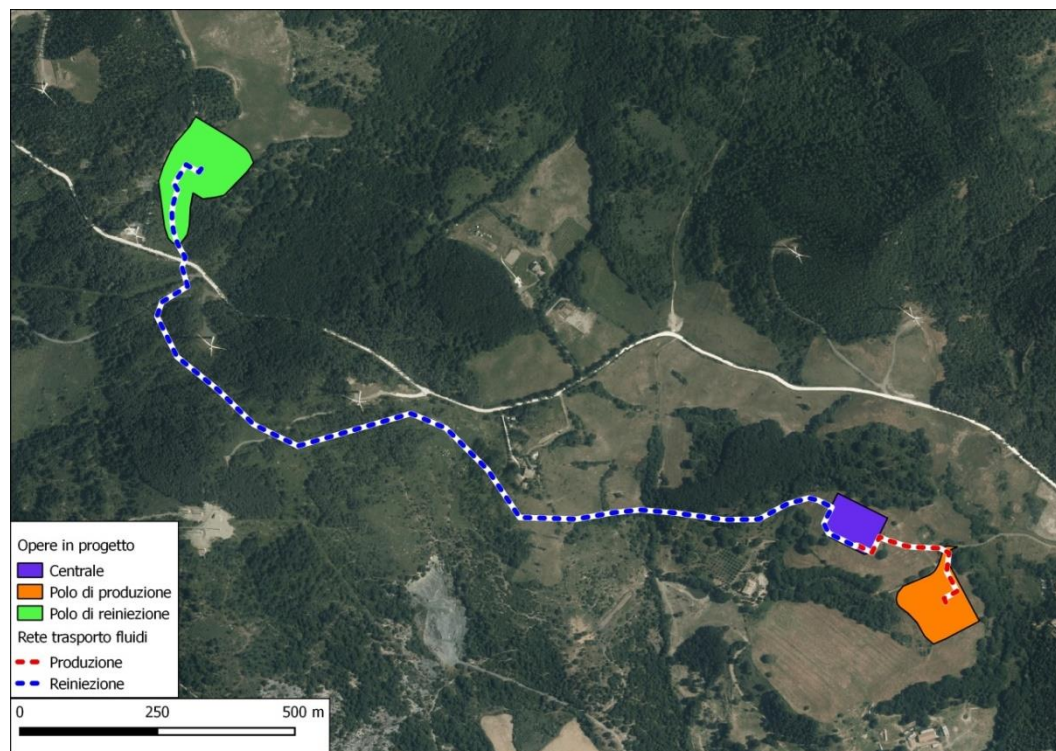
- 1) Impianto geotermoelettrico sperimentale ORC a ciclo binario di potenza nominale installata pari a 5 MWe, al netto degli autoconsumi necessari per mantenere il fluido allo stato liquido;
- 2) 3 pozzi di produzione del fluido geotermico (realizzati in corrispondenza di 1 piazzola di perforazione);
- 3) 3 pozzi di reiniezione del fluido geotermico (realizzati in corrispondenza di 1 piazzola di perforazione);
- 4) Condotte di trasporto del fluido geotermico tra l'impianto e i pozzi, di diametro nominale di 500 mm;

Completano il layout, con riferimento alla centrale:

- Sottosistemi ausiliari;
- Sistemi di controllo;
- Infrastrutture di servizio;
- Uffici, servizi e aree tecniche.

Nella seguente tabella 2.1a vengono sintetizzate le caratteristiche principali del progetto.

	PROGETTO	TITOLO	REV.	Pagina
	P16_RNW_041	RENEWEM SRL: IMPIANTO PILOTA GEOTERMICO "CORTOLLA" MODELLAZIONE NUMERICA DEL SERBATOIO GEOTERMICO DEL PR "CORTOLLA"	0	2

**Figura 2.1a**      *Layout di progetto.*

**Tabella 2.1a**      *Caratteristiche tecnico-progettuali.*

Caratteristiche di produzione	
Portata totale	750 t/h
Temperatura di produzione	140 °C
Temperatura di reiniezione	70 °C
Pozzi produttivi	N° 3
Portata di ciascun pozzo produttivo	250 t/h
Pozzi reiniettivi	N° 3
Distanza media tra le zone di serbatoio produttive e reiniettive	1,5 km
Quota della postazione di produzione	485 m slm
Quota della postazione di reiniezione	540 m slm
Profondità pozzi verticali	3000 m
Pozzi deviati	
Profondità verticale	3000 m
Profondità deviato	3614 m
Scostamento dalla verticale	600-1700 m
Tratti open hole	
Pozzo verticale	1550-3000 m pc
Pozzo deviato	1685-3000 m pc

### 3 SINTESI DEI DATI

#### 3.1 DATI GEOLOGICI

L'area in esame infatti si trova al margine nord-occidentale dell'area geotermica tradizionale di Larderello. Quest'area è stata oggetto di un'intensa attività di ricerca fin dagli anni '50, prevalentemente ai fini geotermici da parte di ENEL ma anche per la ricerca di idrocarburi nonché da parte di altri enti di ricerca universitari. Con il procedere delle perforazioni di pozzi e con il conseguente inizio della coltivazione geotermica nell'area, nell'arco di oltre 60 anni si è accumulata una gran quantità di dati di vario tipo.

Ad oggi quindi l'area è caratterizzata da una conoscenza del sottosuolo estremamente elevata testimoniata dalle numerose pubblicazioni riguardanti il contesto geologico, i rilievi gravimetrici effettuati e la loro interpretazione sulla base di modelli di sottosuolo, i rilievi sismici e magnetici che hanno permesso di migliorare l'affidabilità nell'individuazione dei target geotermici e di ricostruire l'andamento del sottosuolo anche tridimensionalmente (vedi bibliografia).

L'area di Montecatini Val di Cecina, situata nei pressi dell'omonima cittadina, a nord della valle del Fiume Cecina, ricade, da un punto di vista geologico, nella zona di confine tra due importanti strutture originatesi durante la tettonica estensionale del Miocene Superiore – Pliocene, rappresentate, rispettivamente, dal bordo occidentale del Bacino di Volterra e dal margine orientale dei Monti di Castellina Marittima.

Nello specifico l'area geotermica di Cortolla si colloca in corrispondenza dell'alto strutturale delimitato da questi bacini ed è costituito prevalentemente dai depositi afferenti alla successione delle Unità Liguri sulle quali sono posti i depositi neogenici di riempimento dei bacini sedimentari (Figura 3.1a, Figura 3.1b).



PROGETTO

P16\_RNW\_041

TITOLO

RENEWEM SRL:

IMPIANTO PILOTA GEOTERMICO "CORTOLLA"

MODELLAZIONE NUMERICA DEL SERBATOIO GEOTERMICO DEL PR "CORTOLLA"

REV.

0

Pagina

4



**Figura 3.1a** Stralcio della carta geologica 1:50.000 CARG, Fogli 295 e 285. La legenda è mostrata in Figura 3.1b.

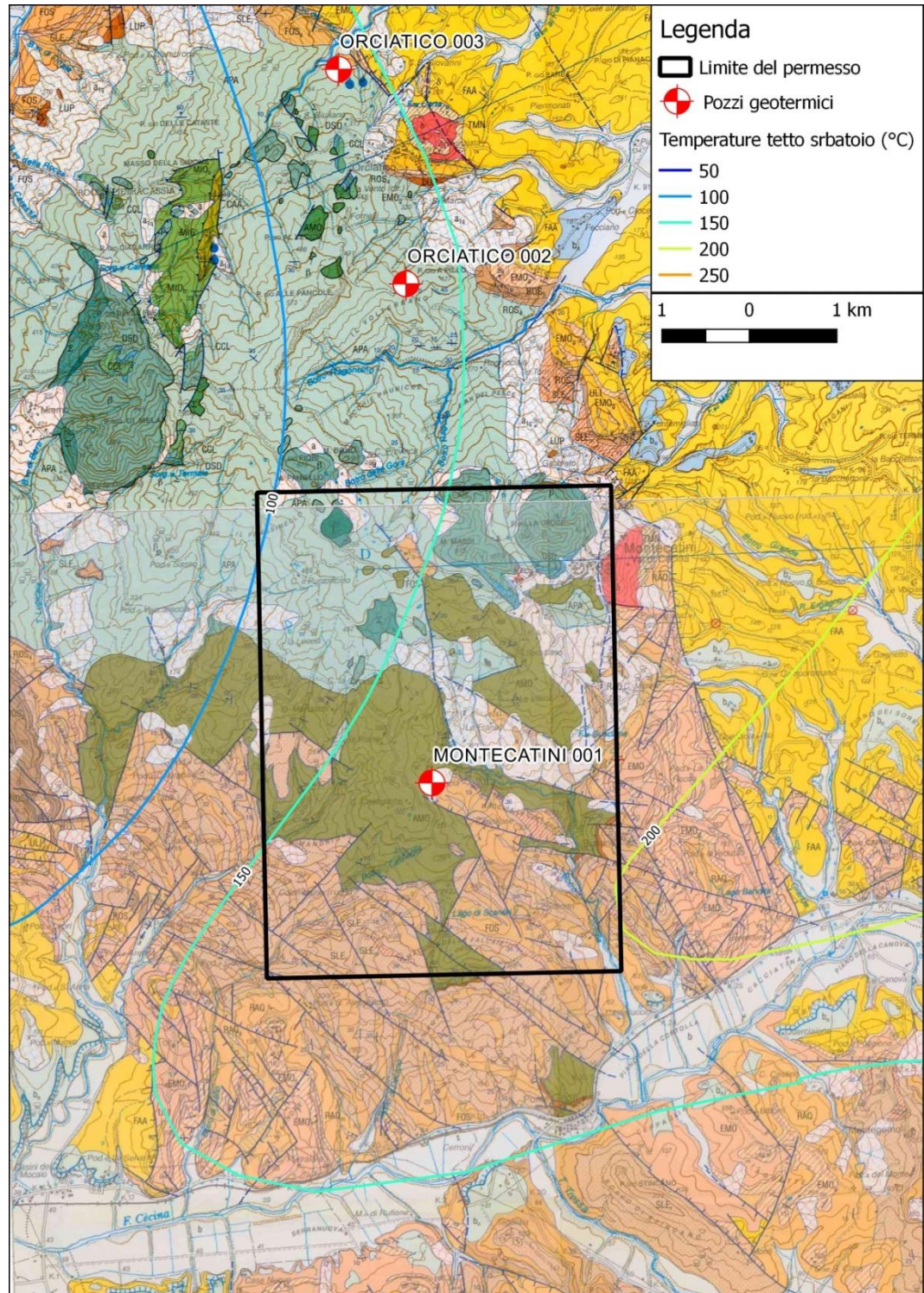
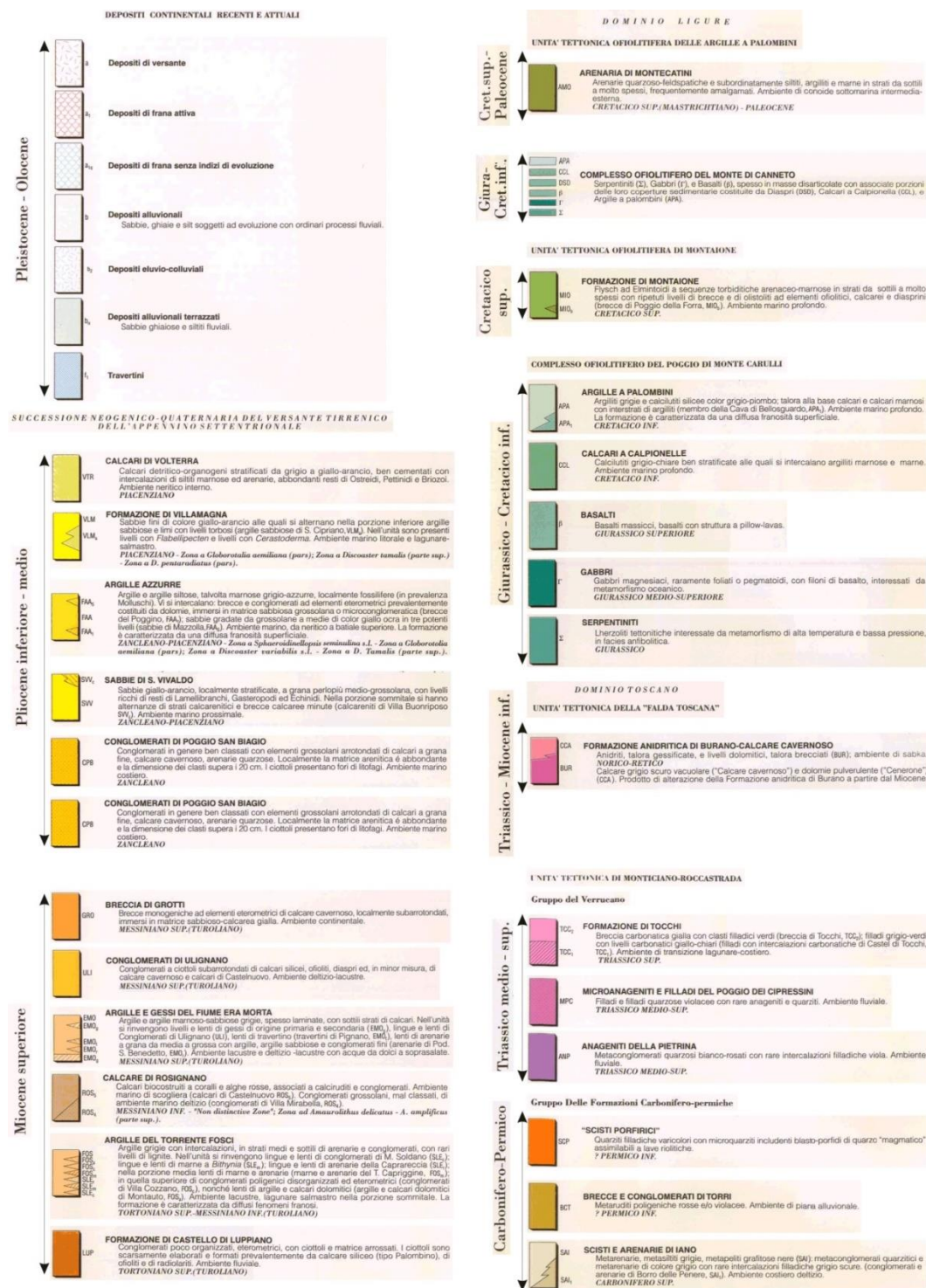
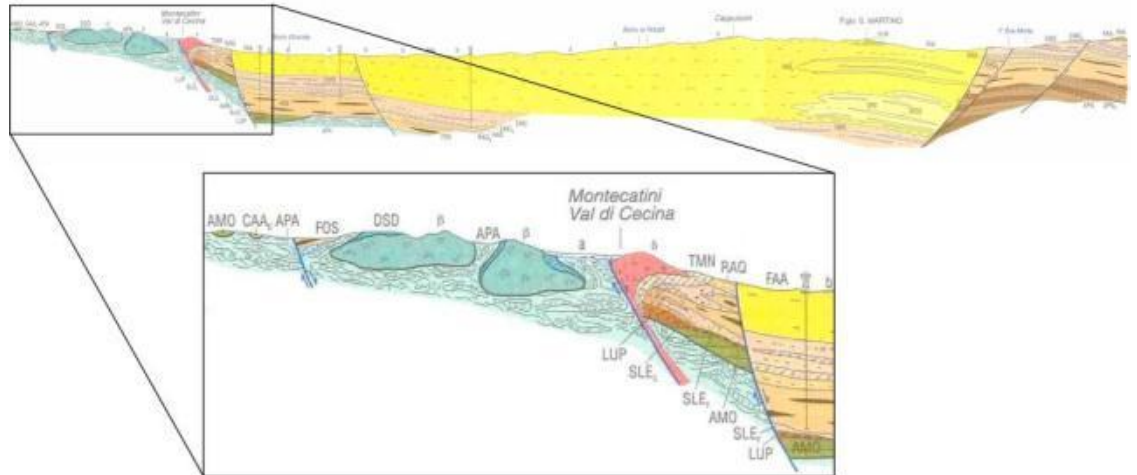




Figura 3.1b **Legenda della carta geologica Fogli 285 e 295.**



**Figura 3.1c** Sezione geologica della carta geologica 1:50.000 Carg Foglio 295 (per l'ubicazione si rimanda alla Figura 3-1a).

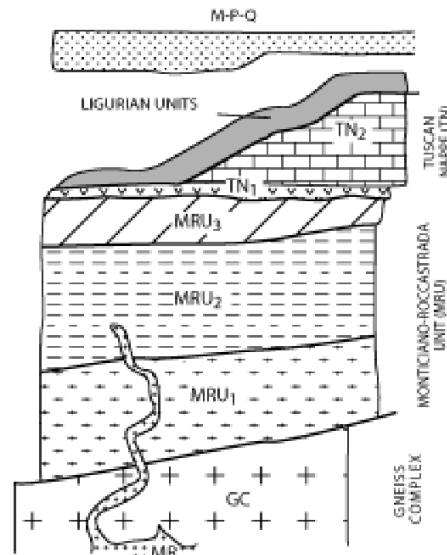


La successione stratigrafico-strutturale del permesso di ricerca rispecchia quello generale della toscana meridionale (Batini et alii, 2003) e precisamente dalle seguenti unità dall'alto verso il basso (Figura 3.1d):

- Complesso Quaternario e Neogenico, rappresentato da depositi alluvionali e alluvionali terrazzati e depositi marini Pliocenici e Miocenici.
- Unità Liguri, sono rappresentate da frammenti della sequenza ofiolitica giurassica e da successioni sedimentarie Giurassiche e Eoceniche. Nella zona del Permesso di Ricerca le unità appartenenti alle Unità Liguri sono l'Unità Tettonica ofiolitifera delle Argille a Palombini e le Arenaria di Montecatini.
- Unità della Falda Toscana, si tratta delle formazioni della successione toscana non metamorfica scollata dal suo substrato lungo l'orizzonte delle evaporiti Triassiche. La successione stratigrafica è composta dal basso verso l'alto da: evaporiti (Triassico Superiore), carbonati (Triassico superiore-Cretaceo Inferiore).
- Basamento Metamorfico, costituito dalle Unità triassico-paleozoiche di Monticiano-Roccastrada (Gruppo del Verrucano, Complesso delle Filladi e Complesso dei Micascisti) e degli Gneiss.

All'interno del complesso Metamorfico Toscano, sulla base delle stratigrafie dei pozzi geotermici perforati da ENEL, è stata ipotizzata la presenza di una grande massa intrusiva anatectica.

**Figura 3.1d Ricostruzione della struttura geologica della Toscana Meridionale sulla base delle successioni affioranti e dei sondaggi nel campo geotermico di Larderello. Q-P-M: Successione sedimentaria Quaternaria, Pliocenica e Miocenica; MR: Rocce magmatiche; Falda Toscana (TN): TN<sub>2</sub>: Successione carbonatica, Scaglia Toscana e Macigno; TN<sub>1</sub>: Calcare Cavernoso Anidriti di Burano; Unità di Monticiano – Roccastrada (MRU): MRU<sub>3</sub>: Verrucano triassico; MRU<sub>2</sub>: gruppo delle filladi e quarziti; MRU<sub>1</sub>: gruppo dei Micascisti; GC: Complesso degli gneiss (Batini et alii, 2003).**



L'assetto stratigrafico e geotermico dell'area del permesso di ricerca è stata definita grazie alla presenza di alcuni pozzi geotermici presenti nell'area di studio e nelle aree vicine.

Tali pozzi hanno fornito, grazie ai risultati delle prove di produzione e di reiniezione nonché dei log di temperatura e pressione eseguiti da ENEL, indicazioni sulla stratigrafia, le temperature e le pressioni del serbatoio geotermico. Inoltre questi dati hanno contribuito alla conoscenza dell'assetto geologico e strutturale profondo in quanto rappresentano dei punti fissi sulla base dei quali realizzare il modello geologico strutturale dell'area.

Buona parte dei sondaggi sono presenti nell'area tradizionale di Larderello, all'interno delle concessioni ENEL attualmente in fase di coltivazione, ma diversi pozzi sono presenti anche all'interno dell'area di interesse e nelle sue immediate vicinanze (Figura 3.1e).

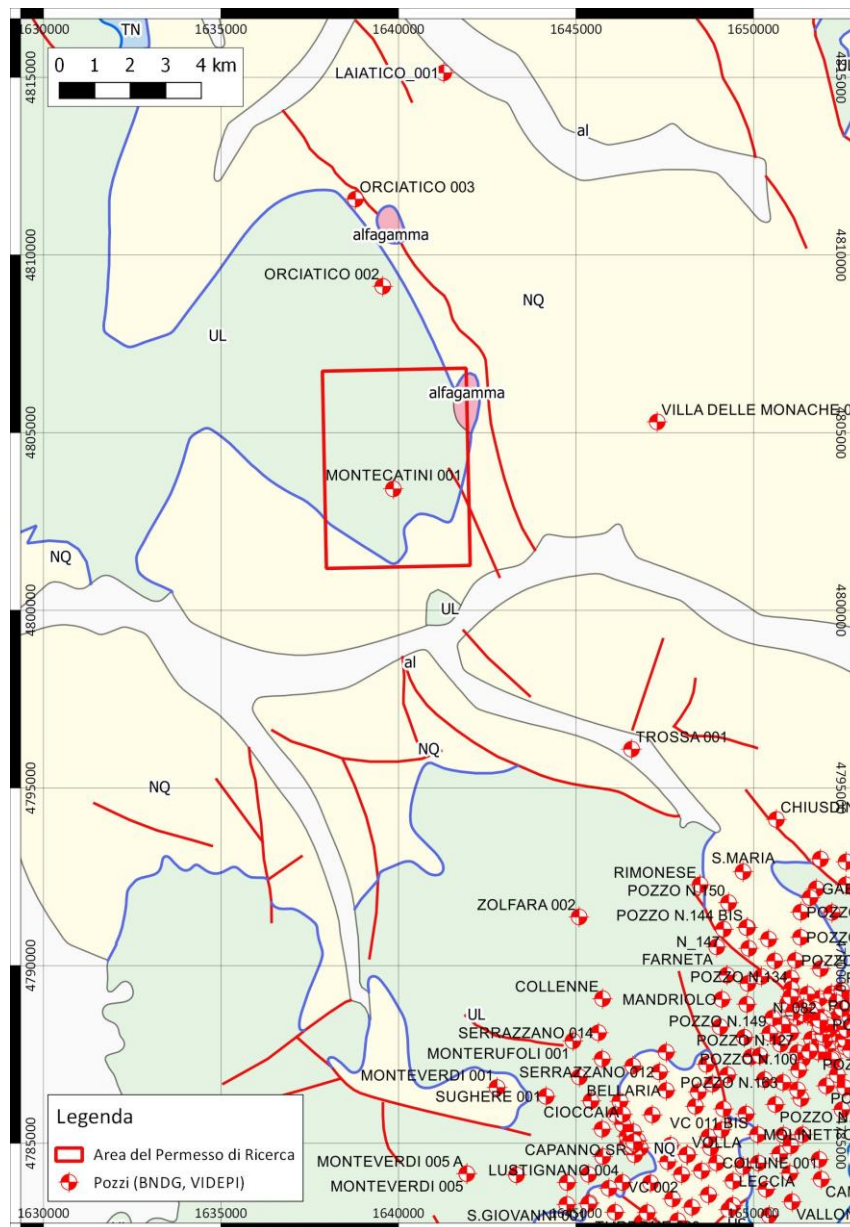
Tra questi, 5 sono stati di fondamentale importanza per le informazioni fornite sull'assetto del sottosuolo nell'area (Figura 3.1f).

I pozzi Lajatico 1 e Villa delle Monache sono stati perforati in pieno bacino neogenico e hanno permesso quindi di caratterizzarne la stratigrafia e gli spessori, considerando anche il fatto che il Lajatico 1 dopo aver attraversato le formazioni del bacino rinviene alla sua base le unità del dominio Ligure.

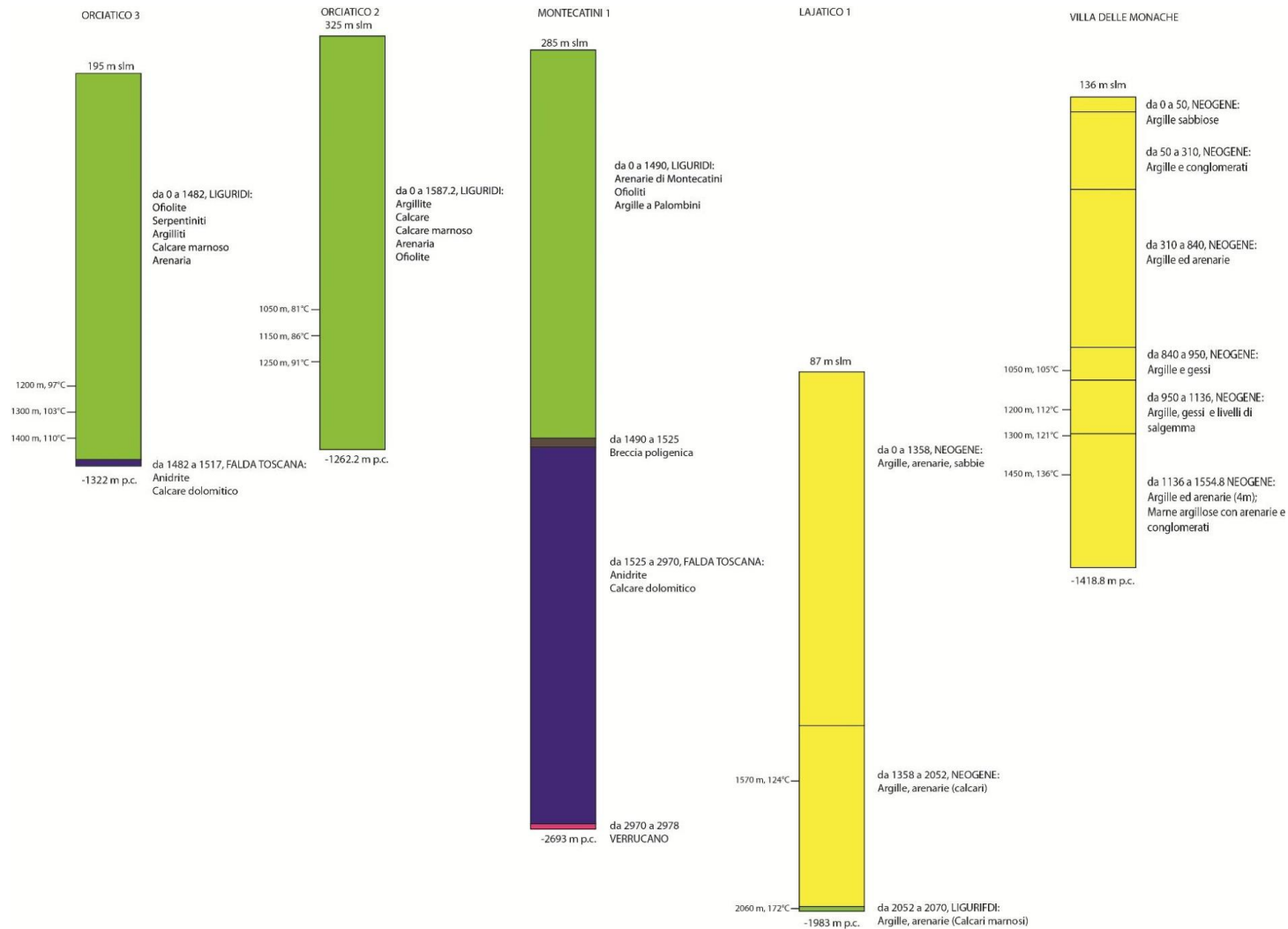


I sondaggi di maggiore interesse ai fini della ricostruzione delle unità geologiche profonde del serbatoio geotermico sono invece i pozzi Orciatico 2 e Orciatico 3 e il pozzo Montecatini 1. Questi pozzi mettono in evidenza la presenza di importanti spessori afferenti alle unità liguri (circa 1300-1500 m) che costituiscono la copertura impermeabile del sistema geotermico, al disotto delle quali si vengono a trovare le unità della Falda Toscana, in questa sede in particolare della sua serie ridotta, e pertanto le unità Liguri si trovano direttamente a contatto con le Unità del Calcare Cavernoso e delle Anidriti di Burano. Queste, come ben evidenziato dal sondaggio profondo Montecatini 1 sono caratterizzate da importanti spessori di circa 1400-1500 m. Al disotto di queste il pozzo Montecatini 1 ha rinvenuto le unità del basamento metamorfico.

**Figura 3.1e** Ubicazione dei pozzi presenti nell'area del progetto e nelle sue vicinanze (fonte: *Inventario delle risorse geotermiche nazionali, progetto VIDEPI*).



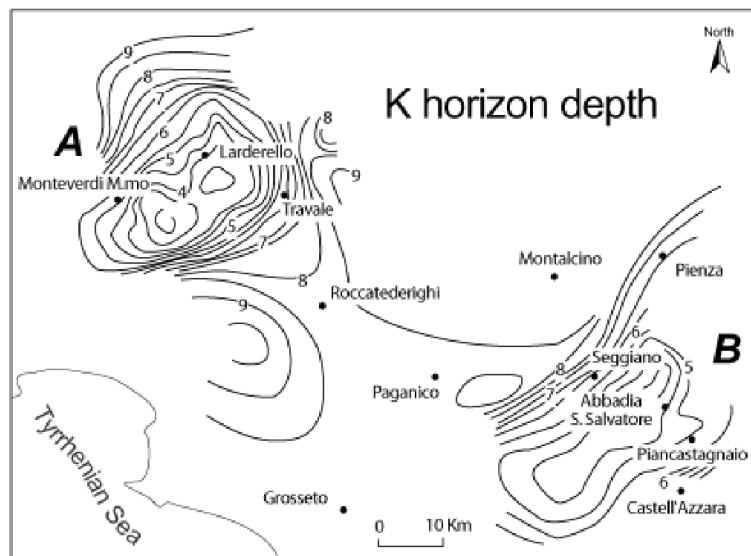
**Figura 3.1f Stratigrafia dei Pozzi geotermici presenti nel Permesso di ricerca e nelle aree limitrofe. (Inventario delle risorse geotermiche nazionali, ENEL-ENI-AGIP-CNR-ENEA, 1987; Bertini et al, 2000 Progetto VIDEPI. Le ubicazioni sono mostrate in Figura 3.1e.**



Oltre alle importanti informazioni di tipo geologico-strutturale, questi sondaggi hanno fornito importanti dati sull'assetto termico dell'area e sulle condizioni del reservoir geotermico. Le temperature misurate al tetto del serbatoio geotermico nel sondaggio Orciatico 3 sono dell'ordine dei 110-120°C, mentre nel Montecatini 1 sono state misurate temperature di 140 °C, nello stesso pozzo Montecatini 1 a fondo pozzo sono state misurate temperature di oltre 200°C.

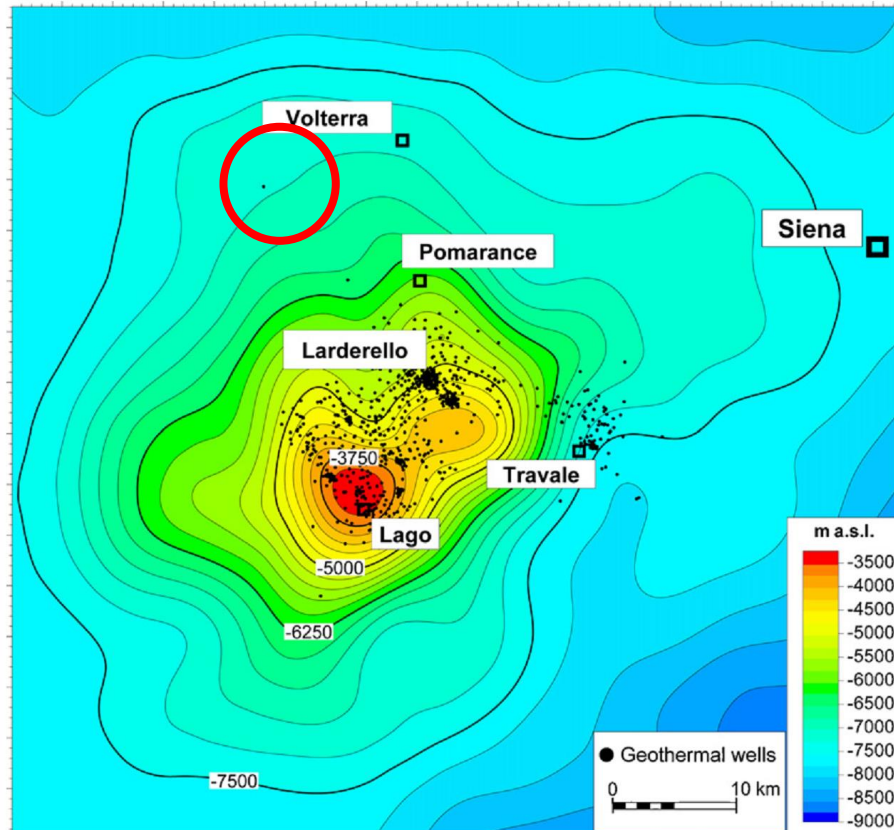
Diversi studi sull'area di Larderello hanno messo in evidenza la presenza di un marker sismico continuo definito come marker "K" (Batini et alii, 1979; Cameli et alii, 1993; Decandia et alii, 1998; Batini et alii, 2003; Brogi et alii, 2003). Questo orizzonte K presenta una culminazione al di sotto dei campi geotermici di Larderello-Travale dove raggiunge la profondità di 4000 m e tende ad approfondirsi verso le aree più esterne del campo (5000 – 7000 m) (Figura 3-1g). Si suppone che tale marker possa corrispondere alla parte superiore di una intrusione granitica (Batini et alii, 2003).

**Figura 3.1g** *Andamento dell'orizzonte K nella aree geotermiche di Larderello-Travale e Monte Amiata (Batini et alii, 2003).*



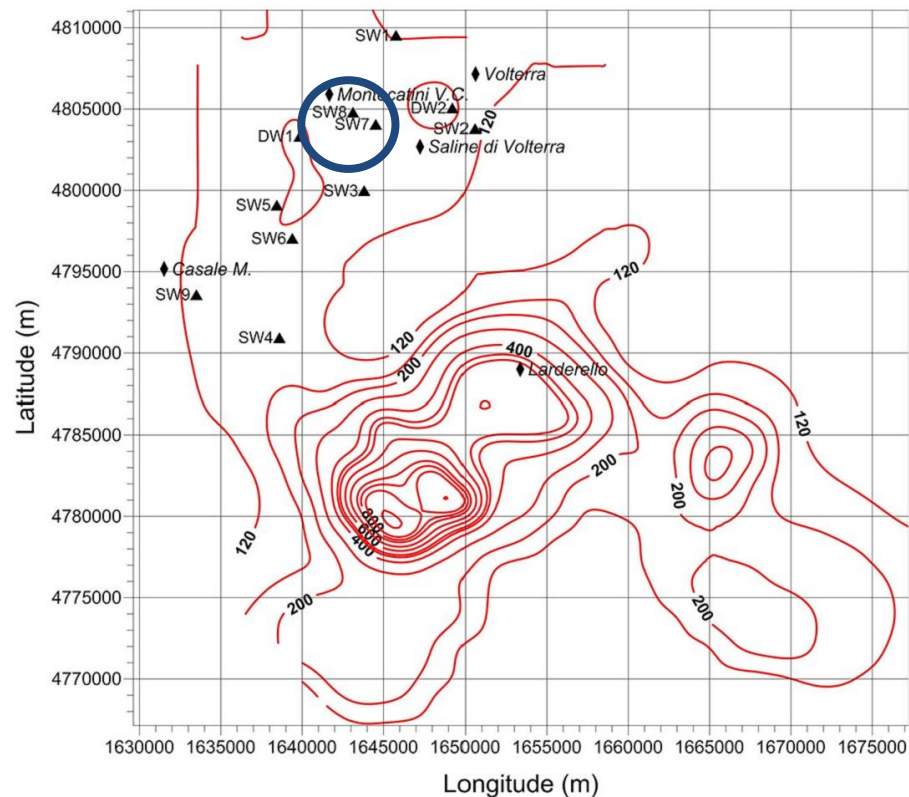
L'andamento dell'orizzonte K nell'area di progetto è estrapolabile dalla carta dell'orizzonte K presente nel lavoro di Romagnoli et alii (2010) dalla quale risulta che, nell'area di progetto, l'orizzonte K si trova a profondità di 6000 – 7000 m slm (Figura 3.1h).

**Figura 3.1h** Mappa dell'orizzonte K (m s.l.m.) (Romagnoli et alii, 2010). In rosso l'area di progetto.



L'andamento dell'orizzonte K e la presenza di una anomalia gravimetrica in corrispondenza di una vasta intrusione magmatica in raffreddamento con dimensioni grossomodo coincidenti con in campi geotermici di Larderello-Travale, testimoniano la presenza effettiva in profondità di una estesa sorgente termica profonda i cui effetti si risentono lateralmente anche nella zona del progetto Cortolla. Infatti osservando l'andamento del flusso di calore di Figura 3-1i si osserva che la linea di isoflusso dei 120 mW/m<sup>2</sup> comprende tutto il sistema dei campi geotermici di Larderello-Travale e anche l'area del progetto Cortolla.

**Figura 3.1** *Andamento del flusso di calore (mW/m<sup>2</sup>) per i campi geotermici di Larderello-Travale e per le aree circostanti (Bellani et alii, 2013). In blu l'area di progetto.*



### 3.2

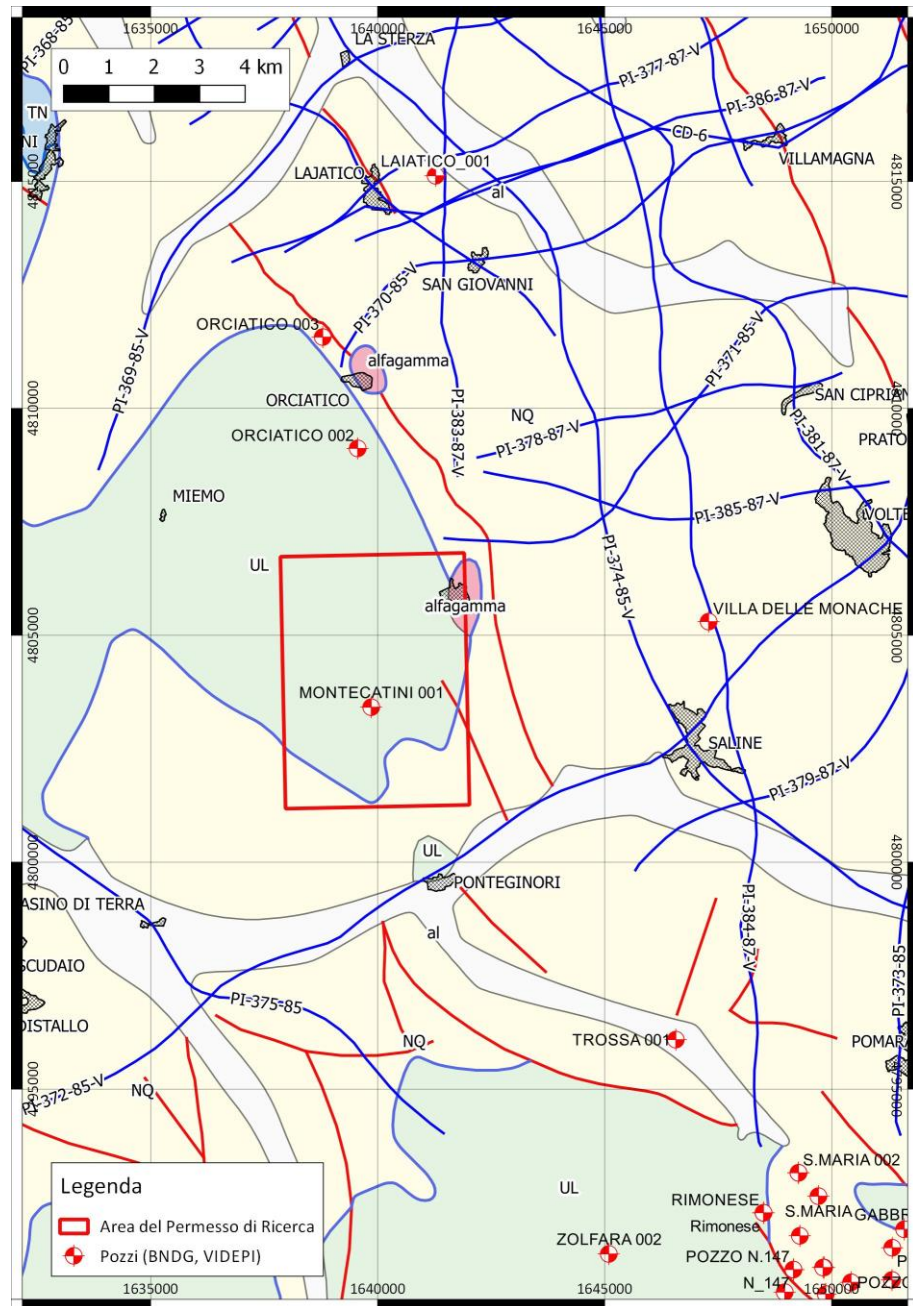
#### **DATI SISMICI**

Altre informazioni in merito all'assetto geologico-strutturale dell'area derivano dai profili sismici realizzati nell'area dall'AGIP nell'ambito del permesso di ricerca per idrocarburi denominato Volterra. Questi profili sono disponibili tramite il progetto VIDEPI (Visibilità dei dati afferenti all'attività di esplorazione petrolifera in Italia) e tramite pubblicazioni di carattere scientifico.

Come è visibile dalla Figura 3.2a l'area di progetto è interessata da diversi profili sismici tra i quali PI-383-87V, PI-371-85V e PI-369-85V.

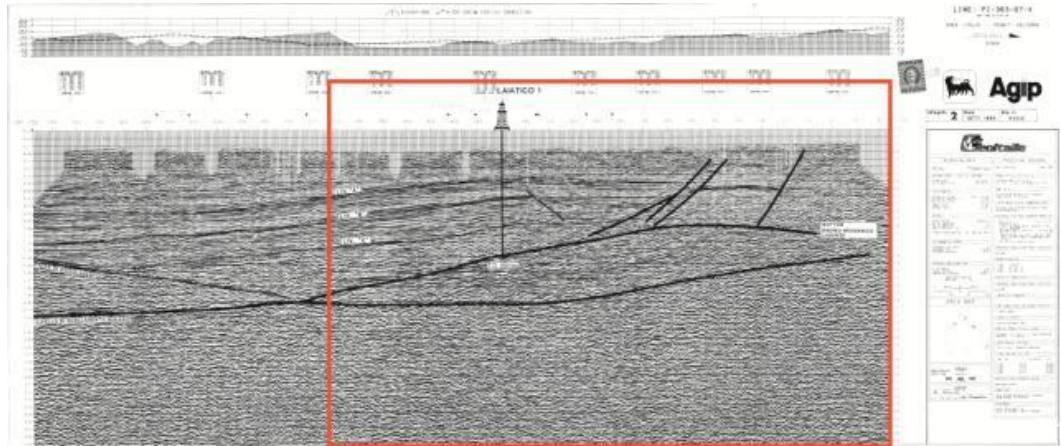


**Figura 3.2a** Ubicazione dei profili sismici acquisiti da AGIP.



Il profilo della linea sismica PI-383-87V (Figura 3.2b) definisce bene le geometrie del bacino neogenico con al di sotto le Unità afferenti al Dominio Ligure.

**Figura 3.2b** Linea sismica PI-383-87V (Progetto VIDEPI). In rosso è evidenziato il tratto della linea visibile in Figura 3.2a.

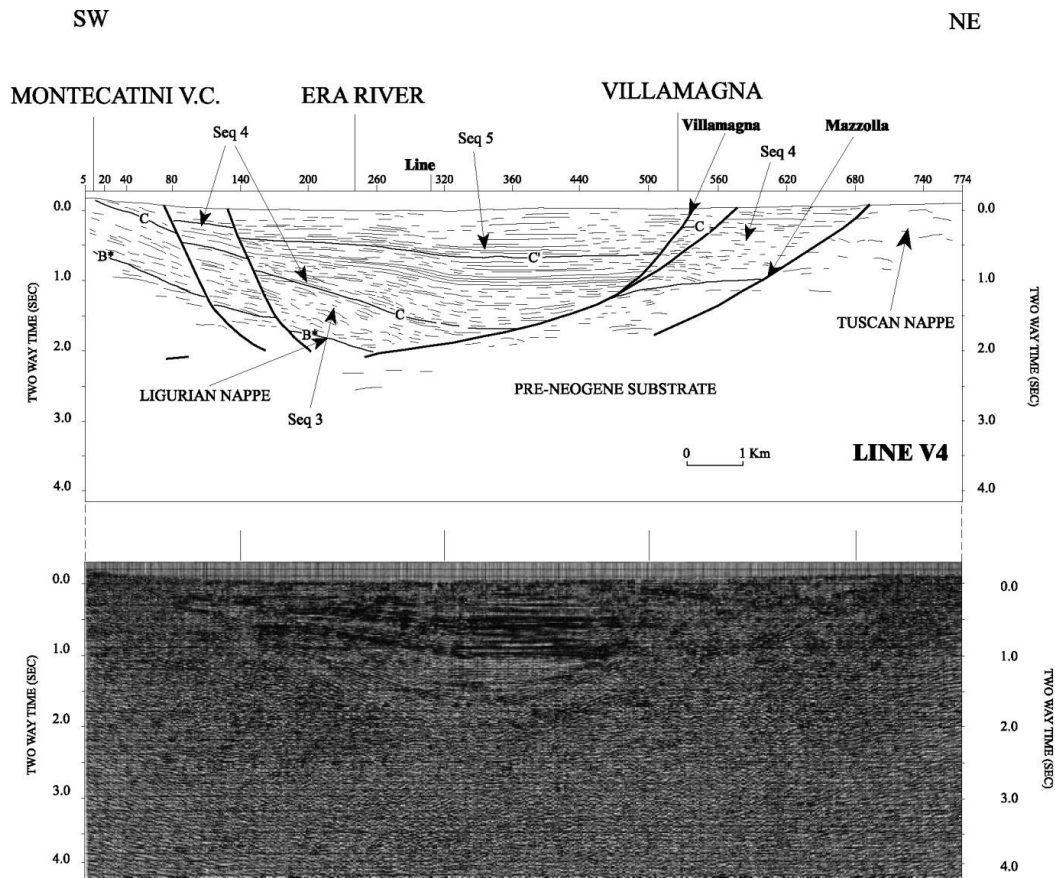


Il profilo sismico mostra un andamento monoclinale del tetto del serbatoio. In prossimità del pozzo Lajatico 1 tale orizzonte è stato evidenziato a 2 ms (TWT) indicativamente corrispondenti a circa 3000 m p.c. mentre al limite sud della linea tale orizzonte risale fino a 1,4 ms (circa 2000 m p.c.).

Lo stesso assetto è confermato dal profilo sismico PI-371-85V (Figura 3.2c) estratta da Pascucci et alii (1999). La linea sismica mette bene in evidenza le strutture che sono comunque ben riconoscibili nel profilo sismico migrato. In particolare è ben visibile la geometria listrica della faglia c.d. di Mazzolla che delimita il bacino neogenico ad est, mentre delle strutture sempre di tipo distensivo ma con geometria più verticale delimitano il bacino nella sua parte occidentale, al margine con l'area di interesse.

Nel settore occidentale, in prossimità dell'abitato di Montecatini Val di Cecina è ben visibile come al disotto della coltre neogenica siano presenti le unità del dominio ligure che degradano verso est da circa 0.5 s (TWT) fino a raggiungere i 2 s (TWT) all'interno del bacino.

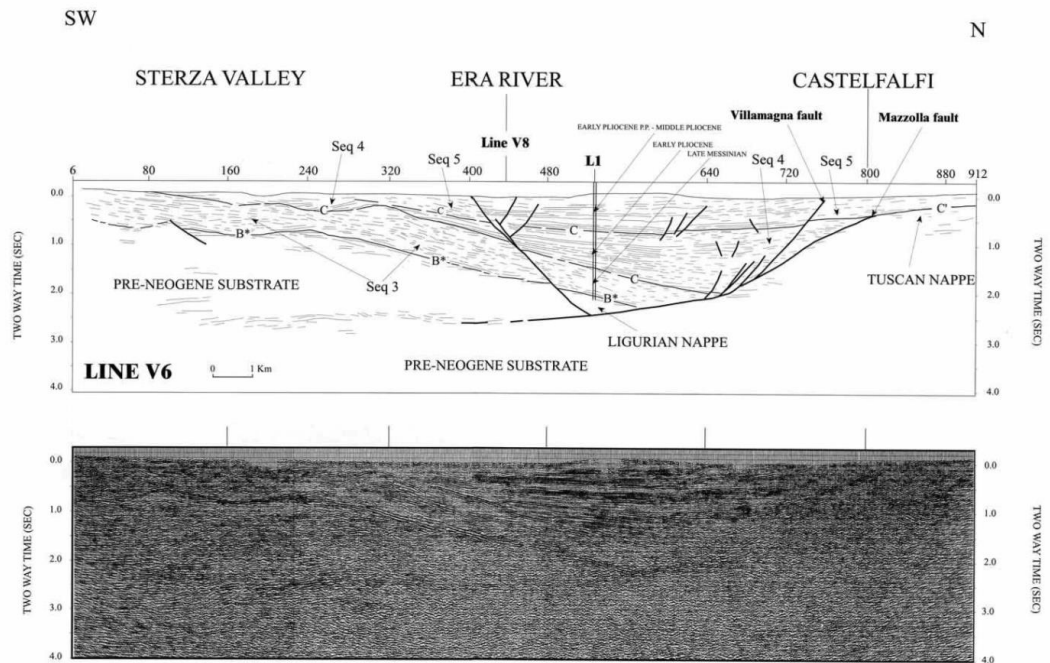
**Figura 3.2c** Line drawing e profilo sismico migrato della linea sismica PI-371-85V (Pascucci et al., 1999).



Similmente al precedente il profilo PI-369-85V (Figura 3.2d) pur collocandosi più a nord rispetto al precedente mette in evidenza la struttura del bacino neogenico con le strutture distensive che ne delimitano i margini. A differenza del profilo PI-371-85V sono ben riconoscibili nella porzione esterna al bacino i contrasti di impedenza acustica che evidenziano le formazioni del substrato pre-neogenico e nello specifico delle unità liguri e della serie Toscana carbonatico-anidritica.

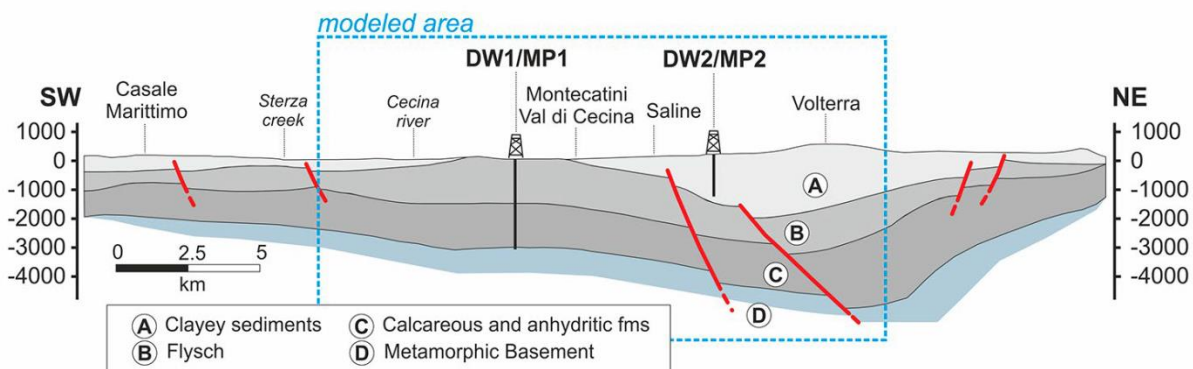


**Figura 3.2d** Line drawing e profilo sismico migrato della linea sismica PI-369-85V (Pascucci et al., 1999)



Ulteriori informazioni sull'area di studio derivano da Bellani e Gherardi (2013) che propongono una sezione geologica dell'area di studio derivata unendo le linee sismiche di AGIP con altri profili sismici disponibili in Pascucci et alii (1999). La sezione mostra bene l'assetto geologico e strutturale dell'area di Montecatini Val di Cecina e quindi del Permesso di Ricerca "Cortolla" (Figura 3.2e).

**Figura 3.2e** Sezione geologica dell'area di studio ottenuta dall'interpretazione delle linee sismiche AGIP pubblicata in Pascucci et al. (1999), aggiornata e ridisegnata. I pozzi Geotermici (DW1 e DW2) sono rispettivamente il pozzo Montecatini 1 e il pozzo Villa delle monache (Bellani and Gherardi, 2013).



I vari profili sismici qui riportati e quelli disponibili in varie pubblicazioni (Pascucci et alii, 1999) mettono bene in evidenza l'approfondimento e la continuità del serbatoio geotermico di Larderello verso l'area di progetto e la prosecuzione, senza soluzione di continuità, verso nord-ovest dell'assetto strutturale profondo.



## 4

**MODELLO GEOLOGICO-STRUTTURALE**

I dati di superficie e profondi disponibili per l'area di progetto hanno permesso di ricostruire con sufficiente dettaglio l'assetto stratigrafico-strutturale dell'area del permesso pilota Cortolla.

L'area del permesso di ricerca è caratterizzata dalla seguente stratigrafia derivata dalle stratigrafie dei pozzi geotermici Orciatico 2, Orciatico 3 e Montecatini 1.

**Tabella 4a Assetto Stratigrafico PR "Cortolla"**

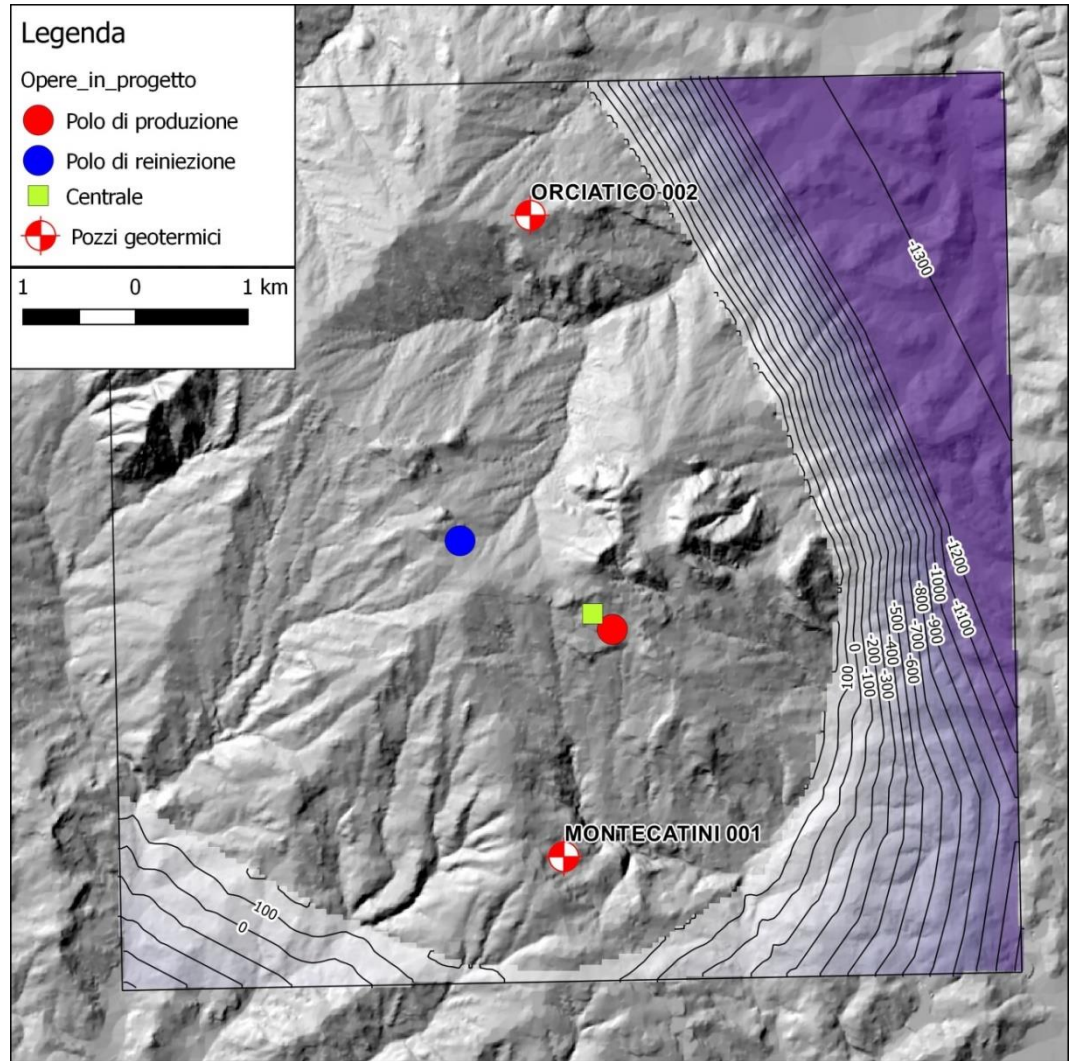
Unità	Da (m pc)	A (m pc)	Modello del campo geotermico
Neogene	0	200-1200	Unità di copertura
Unità Liguri	0	1400-1500	Unità di copertura
Unità della Flada Toscana (Calcere Cavernoso Anidriti di Burano)	1400-1500	3000	Serbatoio geotermico
Basamento metamorfico	3000	6000	Base del serbatoio

## 4.1

**SUPERFICI**

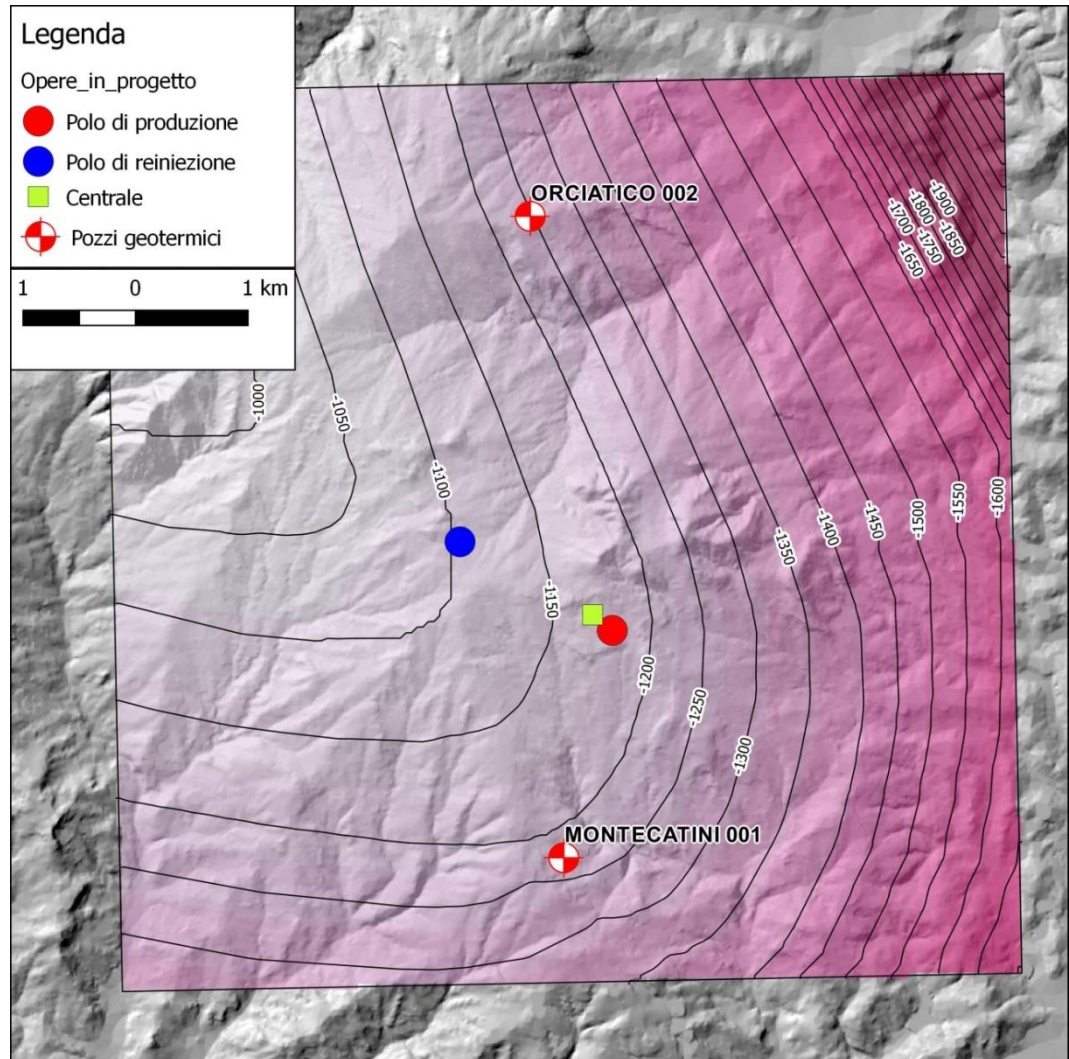
Sulla base dell'analisi integrata dei dati geologici, geofisici, stratigrafici e strutturali disponibili in molte pubblicazioni è stato possibile ricostruire l'andamento delle superfici che delimitano le unità di copertura (Figura 4.1a), il serbatoio geotermico (Figura 4.1b) e il basamento metamorfico (Figura 4.1c) di una vasta area comprendente anche quella del progetto Cortolla.

**Figura 4.1a** *Andamento della Base del Neogene (m slm).*

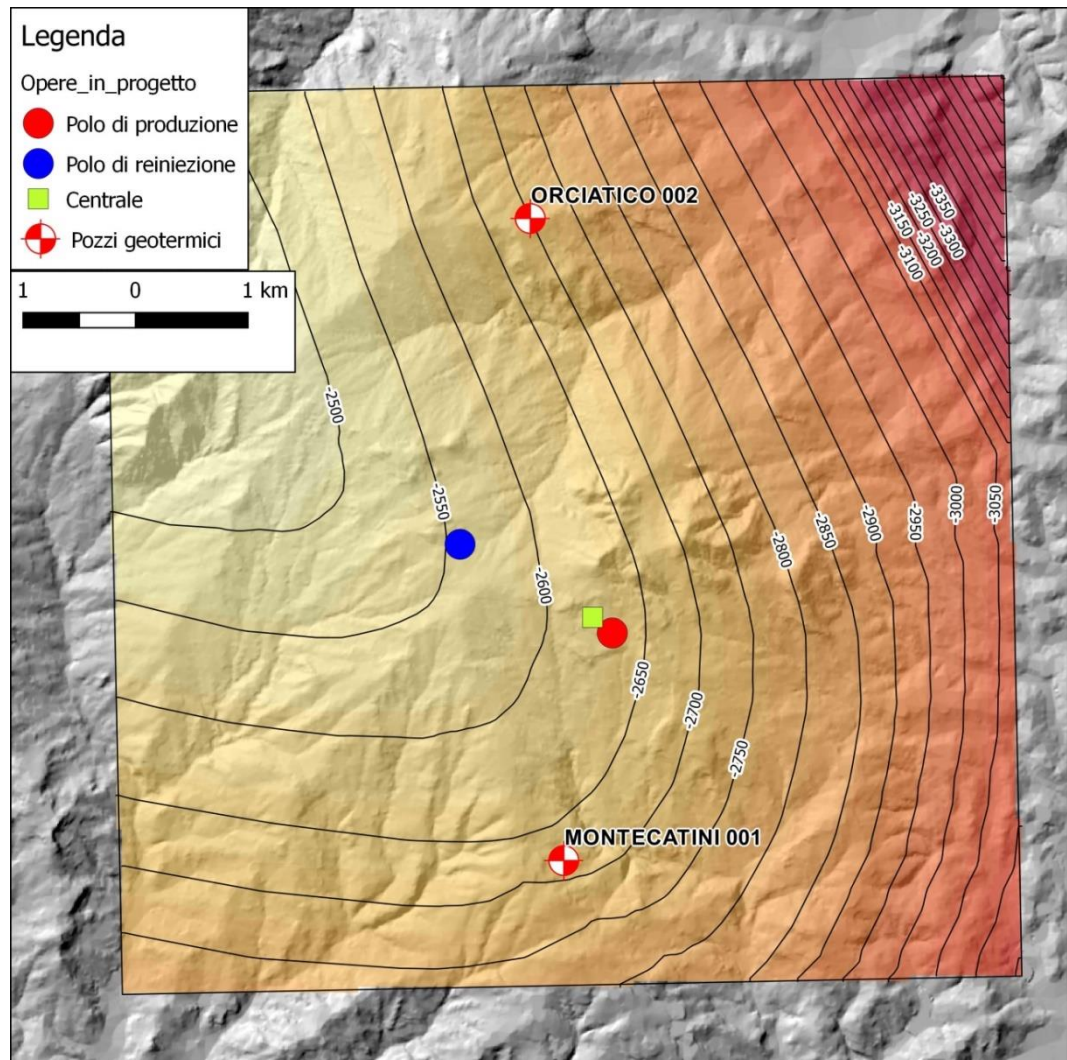




**Figura 4.1b** *Andamento della Base delle Unità Liguri- Tetto delle Anidriti di Burano Calcare Cavernoso (serbatoio geotermico) (m slm).*



**Figura 4.1c** *Andamento della Base delle Anidriti di Burano Calcare Cavernoso (Serbatoio geotermico)-Tetto del Basamento metamorfico (m slm).*



## 4.2

### **MODELLO TERMICO**

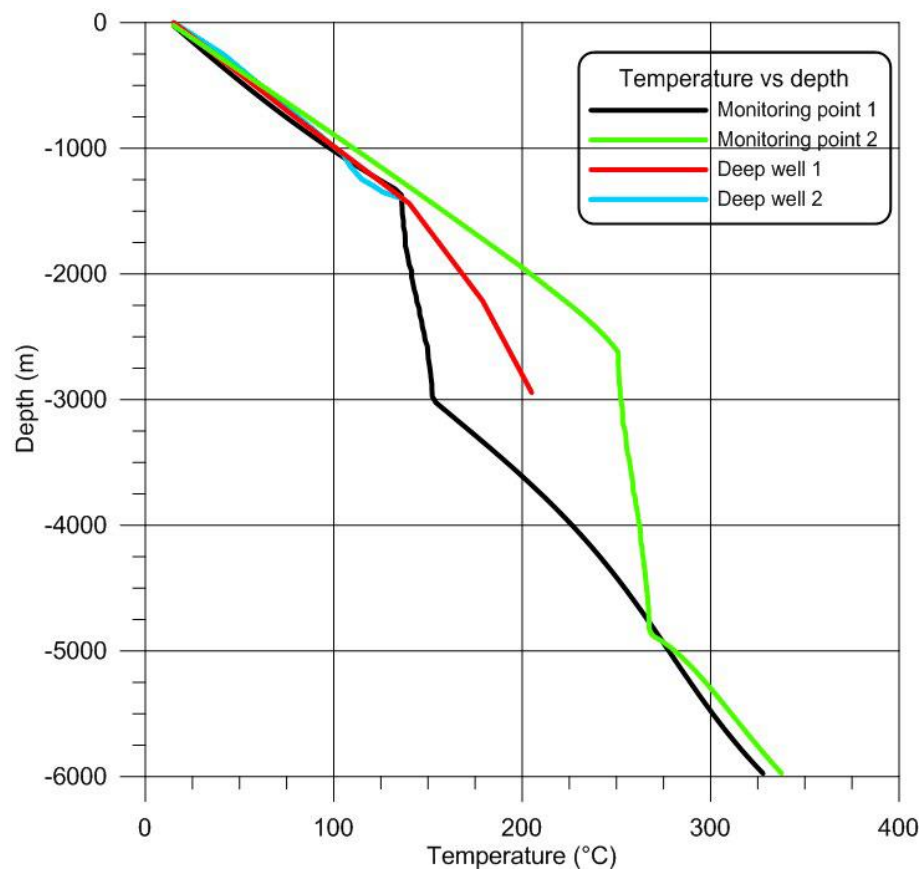
Per la ricostruzione del modello termico di sottosuolo è risultata di particolare interesse la documentazione di Romagnoli et alii (2010) e Bellani & Gherardi (2013) nonché i dati estrapolabili dai pozzi Orciatico 2, Orciatico 3 e Montecatini 1.

In queste pubblicazioni oltre alla ricostruzione dell'andamento del tetto del serbatoio geotermico, è stata ricostruita la distribuzione delle temperature sia nelle formazioni di copertura che nel serbatoio geotermico. La documentazione prodotta in Romagnoli et alii (2010) e in Bellani & Ghelardi (2013) contiene carte, ricavate da modelli matematici, relative alla distribuzione della temperatura in profondità. Dalla mappa della distribuzione delle temperature risulta che a -1500 m si ha una temperatura per l'area di progetto di circa 140 °C.

Inoltre il lavoro di Bellani & Gherardi (2013), attraverso l'esecuzione di alcune simulazioni numeriche, dimostra che nell'area del progetto pilota Cortolla è presente un serbatoio geotermico a medio-alta entalpia con formazione di moti convettivi lungo le strutture distensive e temperature di oltre 200 °C.

Il profilo termico del pozzo Montecatini 1 (Figura 4.2b) permette invece di stimare un gradiente geotermico superficiale di circa 90 °C/km mentre a partire da circa 1450 m pc, all'interno del serbatoio geotermico, il gradiente si riduce a circa 30 °C/km fino a fondo pozzo (2950 m pc).

**Figura 4.2b Profilo Temperatura vs Profondità dei pozzi profondi Montecatini 1 (Deep Well 1) e Villa delle Monache (Deep Well 2) confrontati con i corrispondenti punti di monitoraggio sul modello (Bellani & Gherardi, 2013).**



Utilizzando questi dati si prevede che al tetto del serbatoio geotermico siano presenti temperature di 130-140 °C mentre alla base del serbatoio, in analogia a quanto avviene nel pozzo Montecatini 1, si prevedono temperature di 200 °C (3000 m pc). Secondo queste assunzioni è possibile stimare alla profondità di 6000 m, in corrispondenza dell'orizzonte K, temperature di circa 350°C.

Sulla base di quanto sopra per l'area di progetto si prevede l'assetto tettonico-stratigrafico e termico di Tabella 4.2a.

**Tabella 4.2a** *Assetto tettonico-stratigrafico e termico dell'area del permesso di ricerca Cortolla.*

da (m p.c.)	a (m p.c.)	Stratigrafia	Spessore medio (m)	T tetto (°C)	T base (°C)
0	1500	Neogene+Unit à Liguri	1300	15	130-140
1500	3000	F. Anidriti di Burano	1500	130-140	200
3000	6000	Basamento metamorfico	3000	200	350

### 4.3

#### **PARAMETRI**

Per quanto riguarda i parametri petrofisici delle varie tipologie di rocce si è fatto riferimento a quanto pubblicato da Della Vedova et alii (2007), Romagnoli et alii (2010) e Bellani & Gherardi (2013). Per l'area del progetto Cortolla si è ritenuto corretto utilizzare i parametri di Tabella 4.3a.

**Tabella 4.3a** *Parametri petrofisici per le unità rocciose.*

Unità	Permeabilità k	Porosità	Densità	Calore specifico
	m <sup>2</sup>	%	kg/m <sup>3</sup>	J/kg°C
Unità di copertura	5*E <sup>-18</sup>	10	2400	1000
Serbatoio geotermico	5*E <sup>-14</sup>	2	2600	1000
Basamento metamorfico	5*E <sup>-17</sup>	1.5	2650	1000

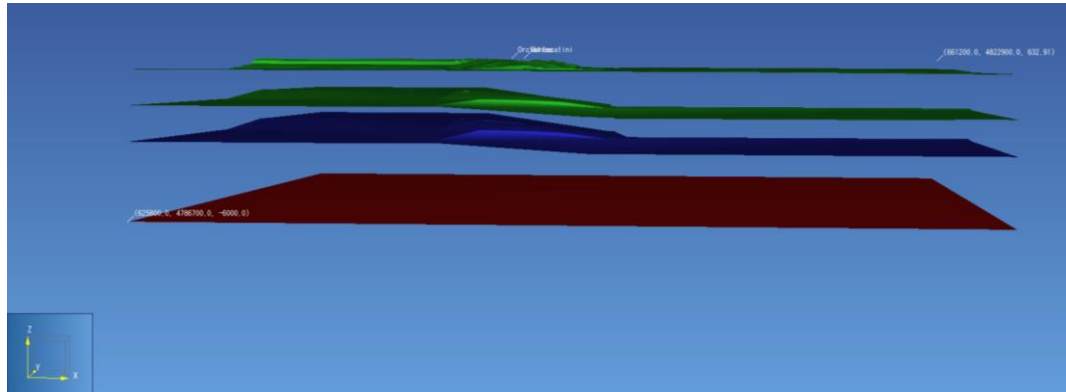
### 4.4

#### **MODELLO GEOLOGICO TRIDIMENSIONALE**

Le superfici ricostruite sulla base dei dati a disposizione sono state inserite all'interno del software di modellazione in modo da ricostruire tridimensionalmente l'andamento della geologia di sottosuolo (Figura 4.4a).

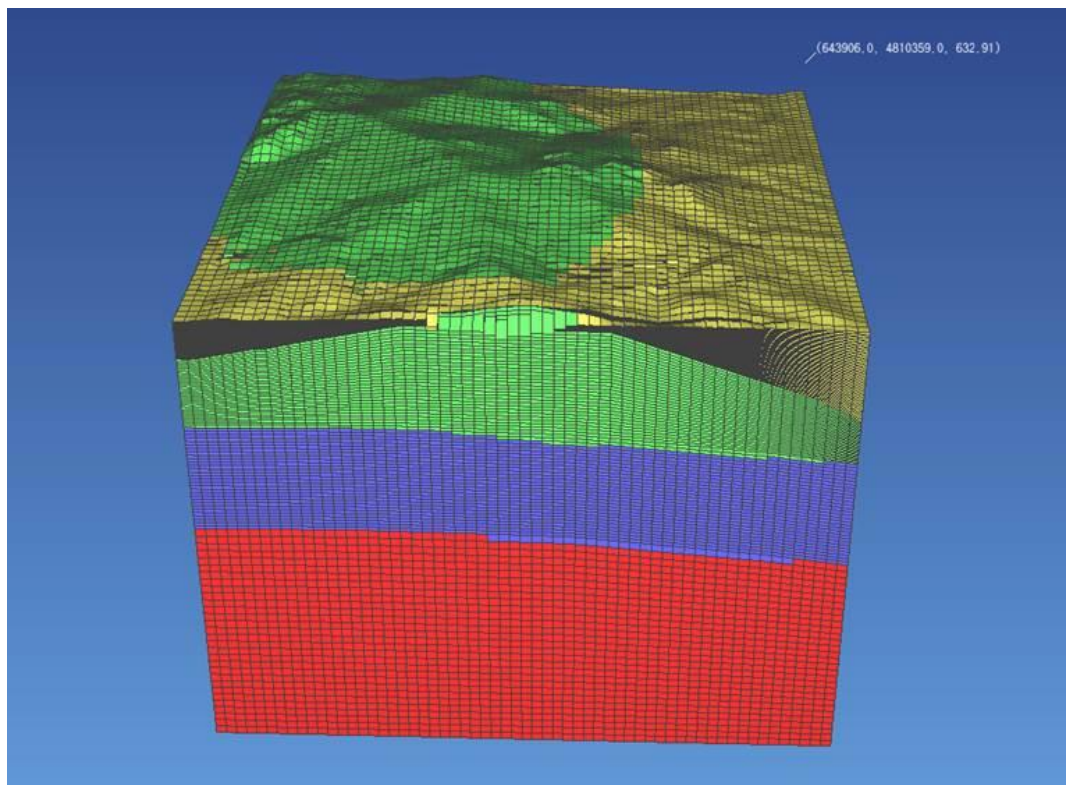


**Figura 4.4a** Vista delle superfici utilizzate per la realizzazione del Modello Geologico Tridimensionale.



Tali superfici sono state utilizzate per l'assegnazione, alle celle della mesh, delle rispettive formazioni e delle relative proprietà. In questo modo sono stati ricostruiti i volumi delle unità di copertura, del serbatoio geotermico e del basamento metamorfico (Figura 4.4b).

**Figura 4.4b** Vista da SUD vs NORD del Modello Geologico Tridimensionale. In Giallo = Neogene; Verde = Unità Liguri; Blu = Formazione di Burano; Rosso = Basamento Metamorfico.

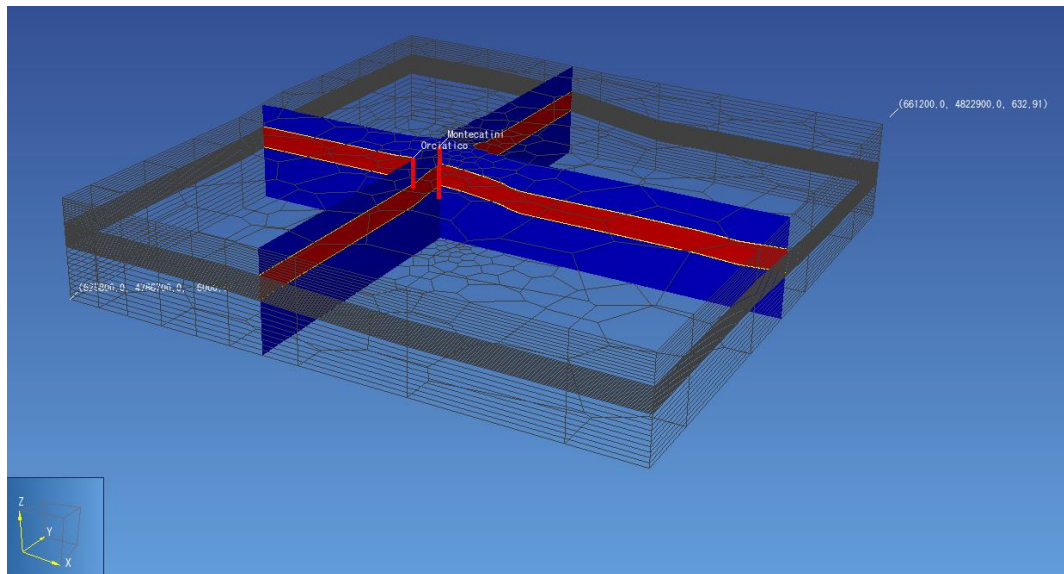


Nella realizzazione della mesh si è proceduto a impostare le dimensioni delle celle con un volume minore in prossimità dei pozzi previsti in progetto in modo da

aumentare il dettaglio della simulazione senza andare ad appesantire eccessivamente il calcolo.

La mesh utilizzata è quindi costituita da 8055 celle di varia forma, a seconda della distanza dai pozzi in progetto, e con un volume minimo di  $5 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  (idealmente corrispondente ad un cubo di 500 m di lato). In Figura 4.4c è rappresentato in sezione l'andamento del serbatoio geologico all'interno del dominio di simulazione e la distribuzione della dimensione, in pianta, delle celle.

**Figura 4.4c** *Rappresentazione con sezioni Nord-Sud ed Est-Ovest passanti per i pozzi noti di Orciatico e Montecatini. In Rosso il Serbatoio Geotermico. È rappresentata anche la discretizzazione delle celle.*



Sulla base del modello geologico tridimensionale è stata eseguita la simulazione numerica.

## SIMULAZIONI NUMERICHE E MODELING TERMODINAMICO DEL SERBATOIO GEOTERMICO

Ai fini di una valutazione quantitativa degli effetti termodinamici indotti dall'emungimento e dalla reiniezione dei fluidi dal/nel reservoir geotermico in esame, è stato eseguito un set di simulazioni numeriche sulla base del modello geologico concettuale dell'area di Cortolla.

Le simulazioni effettuate riproducono le variazioni di pressione e di temperatura indotte sia nella zona di emungimento che di reiniezione.

Le simulazioni sono eseguite utilizzando il codice di calcolo numerico TOUGH2®.

TOUGH2 permette il calcolo degli scambi di massa e di calore, dovuti al flusso tridimensionale di miscele multifase (gas e liquidi) di varie specie chimiche, all'interno di un mezzo poroso con permeabilità assegnata, assumendo l'equilibrio locale tra fluidi e matrice rocciosa.

Le equazioni di conservazione della massa e dell'energia, che descrivono le condizioni termodinamiche del sistema, vengono discretizzate nella loro forma integrale, in uno schema detto metodo delle differenze finite integrali (Edwards, 1972). Le soluzioni consistono in un insieme di valori di due variabili termodinamiche indipendenti (nel nostro caso pressione  $P$  e temperatura  $T$ ) che definiscono univocamente lo stato del sistema. Queste variabili vengono stimate, in funzione del tempo, nei centri delle celle in cui il volume discretizzato è stato suddiviso. I flussi di fluidi sono descritti tramite l'equazione di Darcy, espressa in una forma multifase e multicomponente:

$$\mathbf{F} = -K \frac{\rho}{\mu} (\nabla P - \rho \mathbf{g}) \quad (\text{equazione di Darcy})$$

$$F_{\beta} = -K \frac{k_{r\beta} \rho_{\beta}}{\mu_{\beta}} (\nabla P_{\beta} - \rho_{\beta} \mathbf{g}) \quad (\text{equazione di Darcy multicomponente})$$

dove  $F$  è il rate del flusso di massa attraverso l'unità di superficie,  $K$  è la permeabilità assoluta,  $\mu$  la viscosità,  $\rho$  la densità,  $\nabla P$  il gradiente di pressione e  $\mathbf{g}$  l'accelerazione di gravità. Nell'equazione multicomponente  $\beta$  indica la fase liquida o gassosa, il coefficiente  $k_{r\beta}$  rappresenta un fattore di riduzione della permeabilità effettiva all'interno dei pori nei quali è presente la fase  $\beta$ . La permeabilità relativa è funzione della frazione dei pori occupata dalla fase fluida.

Il flusso di calore viene descritto considerando termini conduttivi e convettivi. La natura e le proprietà delle miscele di fluidi che scorrono nel mezzo poroso vengono considerate nelle equazioni attraverso i parametri fisici (densità,

viscosità ed entalpia), calcolati in funzione delle condizioni termodinamiche stimate.

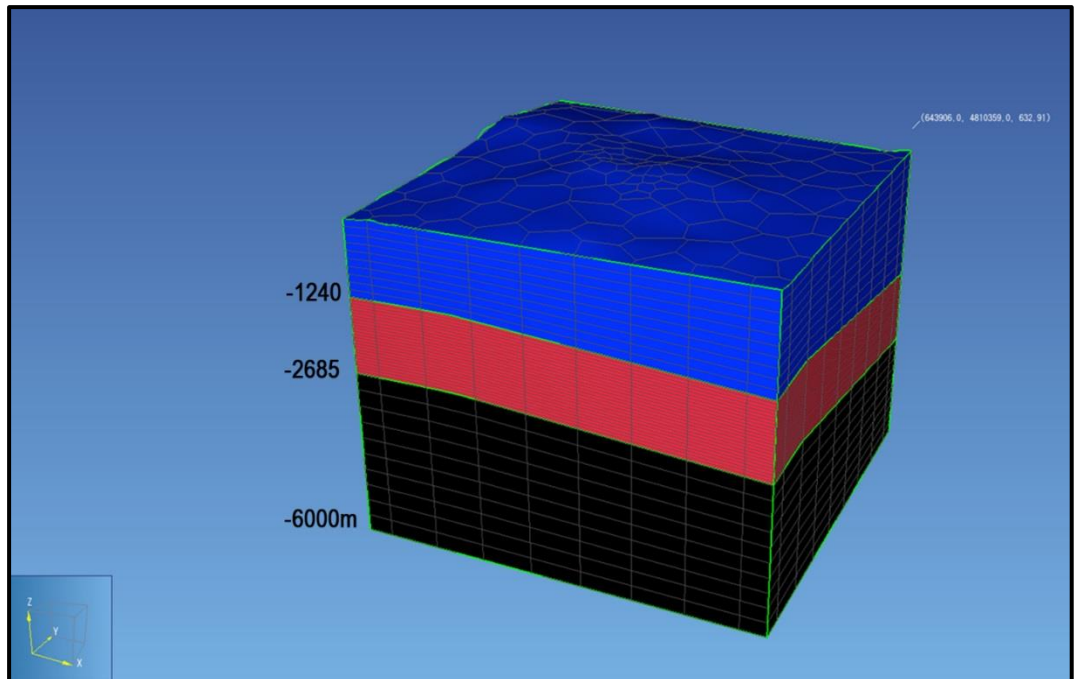
## 5.1 MODELLO FISICO

Il modello fisico di base di Cortolla per l'esecuzione della simulazione è stato ricavato sulla base del modello geologico di cui al paragrafo 4 fornito dal committente.

Ai fini della modellazione fisica l'area è stata delimitata considerando un dominio con una superficie complessiva approssimativamente di 8 km \* 8 km ed uno spessore di 6 km. In particolare, la superficie topografica è stata modellata tramite un'estrapolazione 3D del modello digitale del terreno mentre il sistema è stato approssimato come una sequenza di tre strati rappresentanti rispettivamente un *cap* impermeabile, il reservoir vero e proprio ed un basamento sottostante (*Figura 5.1a*).

Il tetto del serbatoio geotermico è previsto ad una profondità di circa 1.240 m dal livello del mare; tale serbatoio presenta una temperatura media di circa 170°C. Il serbatoio ha uno spessore di circa 1.500 m al di sotto del quale è presente uno strato a bassa permeabilità con un gradiente termico tale da permettere un incremento della temperatura fino a circa 300 °C, a profondità di 6.000 m.

**Figura 5.1a** *Modello tridimensionale di riferimento utilizzato durante le simulazioni numeriche. Il dominio considerato consta di un prisma di 8 km \* 8 km \* 6 km, le quote sono riferite al l.m.m..*



Il volume così composto è stato suddiviso in una griglia con celle trapezoidali, di dimensioni accettabili da un punto di vista computazionale, ridotte in prossimità dei pozzi per poter apprezzare i risultati.

Il sistema di riferimento considerato prevede l'asse x in direzione WE, l'asse y in direzione SN e l'asse z orientato verso l'alto.

Per la determinazione dei valori di input da inserire all'interno del codice di numerico Tough2 (Permeabilità, Densità, Porosità e Conducibilità Termica) da attribuire ad ogni singolo layer considerato, sono stati revisionati i recenti lavori presenti in bibliografia (*Enel, 2009; Bellani & Gherardi, 2009, 2013; Magro et al., 2009*).

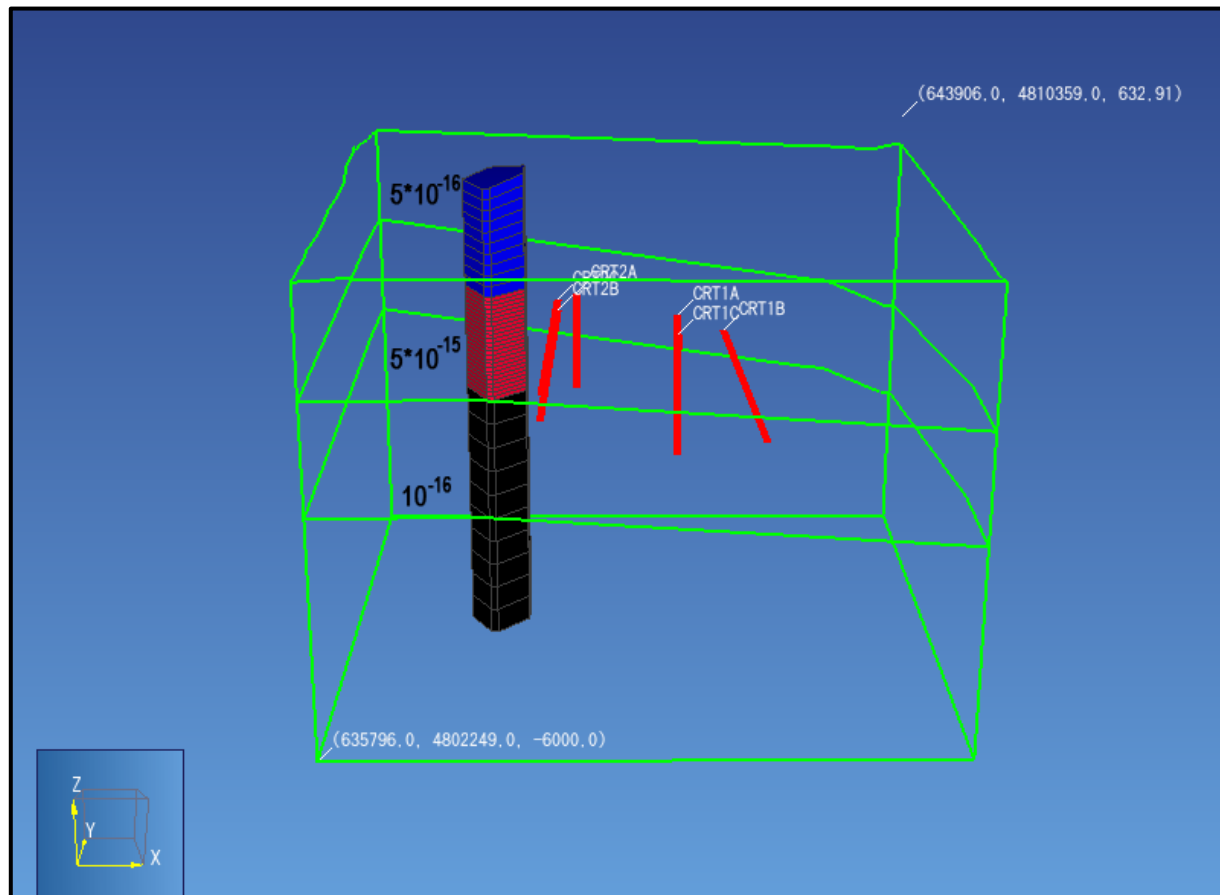
I tre strati geologici in cui è stata suddiviso il volume vengono caratterizzati da una permeabilità pari, rispettivamente, a  $5 \cdot 10^{-18} \text{ m}^2$ ,  $5 \cdot 10^{-14} \text{ m}^2$  e  $5 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$  (*Figura 5.1b*) e da una porosità del 10%, 2% e 1.5% rispettivamente. La conducibilità termica della matrice rocciosa in ogni strato è stata considerata rispettivamente pari a 2.3, 5 e  $3.25 \text{ Wm}^{-1}\text{C}^{-1}$ . La densità della matrice rocciosa è stata considerata pari rispettivamente a 2400, 2600 e  $2650 \text{ kg/m}^3$ .

Il calore specifico è stato considerato pari a  $1.000 \text{ Jkg}^{-1}\text{C}^{-1}$ . Le condizioni al bordo prevedono che temperatura e pressione siano fissate in superficie e sul fondo del volume considerato nel modello.

La simulazione tiene conto della traiettoria dei pozzi, così configurati: n° 3 pozzi di emungimento (CRT1A, CRT1B e CRT1C) con profondità verticale massima di 3000 m dal p. c.; n° 3 pozzi di reiniezione (CRT2A, CRT2B e CRT2C) con le stesse caratteristiche.

La configurazione dei pozzi è riportata in *Figura 5.1b*. I pozzi di emungimento avranno una zona di pescaggio dal reservoir (casing finestrato) tra 1.200 m e 2.500 m di profondità rispetto al livello del mare, i pozzi di re-iniezione avranno lo stesso range di profondità di reiniezione in serbatoio dei fluidi. La simulazione è stata condotta con un  $\Delta T = 70^\circ\text{C}$  tra temperatura di produzione e quella di reiniezione.

Figura 5.1b Valori di permeabilità (in  $m^2$ ) attribuiti ai 3 differenti strati del modello considerato e traiettorie dei tratti finestrati dei pozzi.





## 5.2

**RISULTATI DELLA MODELLAZIONE**

In condizioni indisturbate, un serbatoio geotermico presenta condizioni termodinamiche costanti nel tempo e generalmente dipendenti dalla profondità. La prima parte della modellazione ha avuto l'obiettivo di ricostruire tale stato 'imperturbato' del sistema, inteso come condizione di quasi equilibrio (stato stazionario) in cui gli andamenti della pressione e della temperatura siano compatibili con quelli previsti prima dell'inizio dello sfruttamento geotermico dei pozzi.

Le condizioni che caratterizzano lo stato stazionario sono riportate in *Figura 5.2a* per la Pressione ed in *Figura 5.2b* per la Temperatura. La differenza di temperatura tra i dati noti disponibili dei pozzi esistenti e quelli ottenuti con la simulazione risulta compatibile con una buona affidabilità dei risultati.

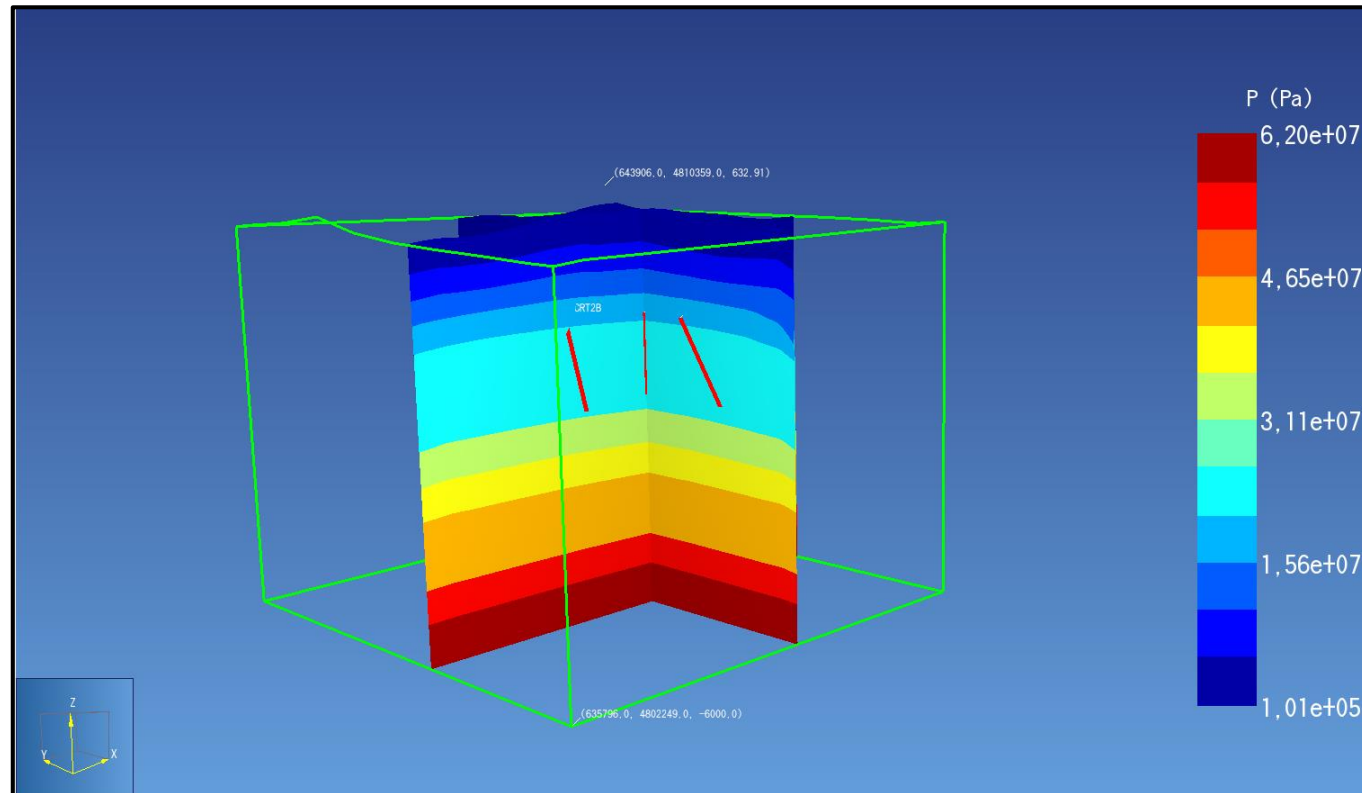
Partendo dalla soluzione stazionaria, sono stati introdotti nel modello i pozzi di produzione e re-iniezione previsti nel progetto pilota denominato "Cortolla", per valutare la sostenibilità di coltivazione del campo mediante impianti geotermoelettrici a re-iniezione totale del fluido. Ogni volta che un serbatoio subisce l'iniezione o l'estrazione di fluido si innesca una reazione nel campo di pressione.

Tale reazione è composta da due fasi consecutive. La prima fase è detta di regime transitorio (non stazionario) mentre la seconda fase è detta di regime stazionario o pseudo-stazionario a seconda delle condizioni al contorno. Le portate di prelievo imposte, come previste dal progetto, sono state di 70 l/sec (250 t/h) per ciascun pozzo di prelievo e di 70 l/sec per i pozzi di re-iniezione.

Il tempo simulato è di 100 milioni di anni, che rappresenta il tempo in cui vengono ripristinate condizioni stazionarie. Tuttavia, considerato il tempo di vita media dell'impianto pari a 30 anni, sono stati presi i valori di variazione di pressione e temperatura che avvengono nell'arco di 30 anni.

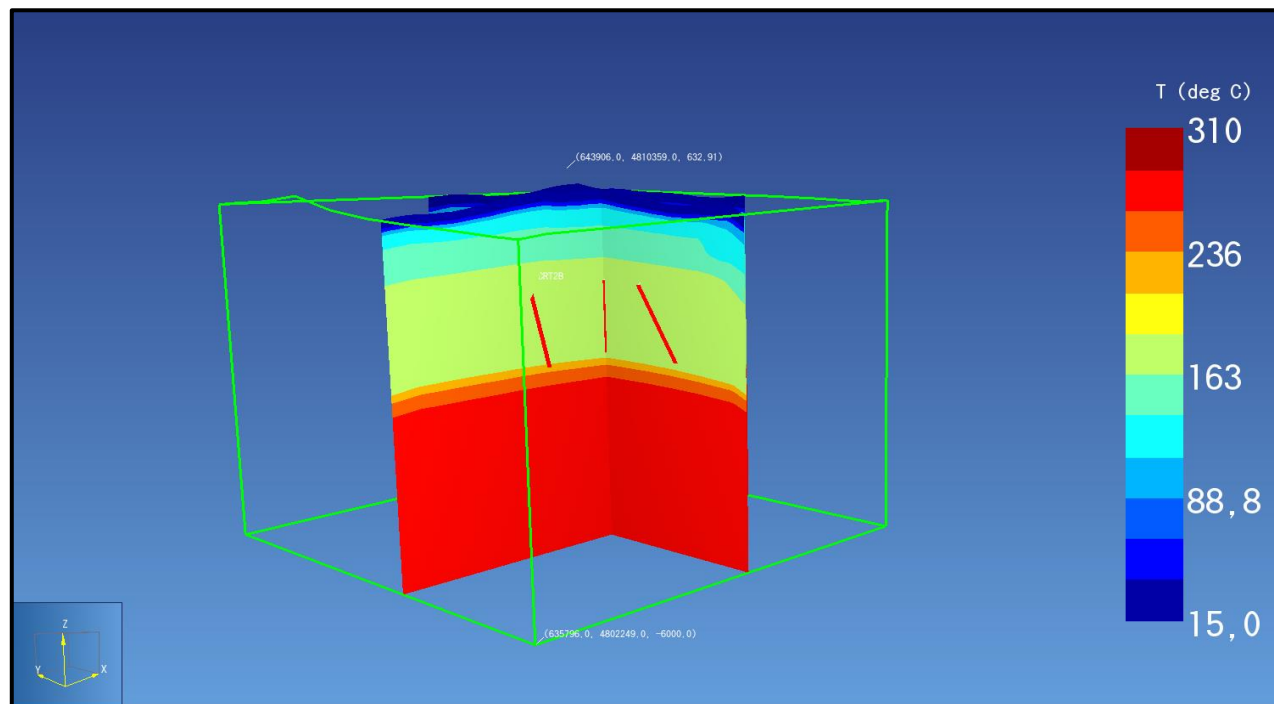


**Figura 5.2a** *Andamento caratteristico delle isobare, nel dominio di calcolo considerato, allo stato stazionario (tempo simulato 100 milioni di anni).*



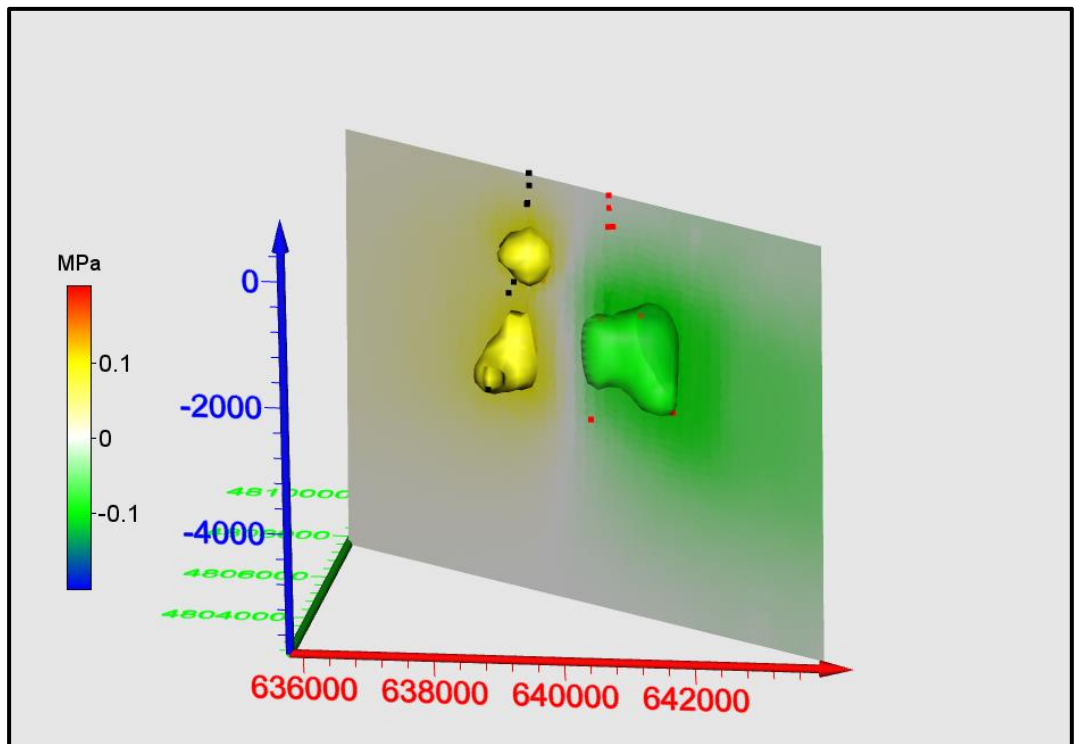


**Figura 5.2b** *Andamento delle isoterme, all'interno del dominio di calcolo considerato, allo stato stazionario (tempo simulato 100 milioni di anni).*



Gli effetti del ciclo simulato di iniezione/emungimento di fluidi nel sistema sono sintetizzati nelle figure successive. In particolare, in Figura 5.2c sono stati riportati gli effetti della coltivazione del reservoir in termini di variazione di pressione. In Figura 5.2d la sezione di variazione di pressione evidenzia una variazione dell'ordine massimo di 1 bar. Nella figura sono evidenziate le isosuperfici di variazione di pressione corrispondenti rispettivamente ai valori di +1 bar e di -1 bar. I volumi relativi a tali isosuperfici sono rispettivamente pari a:  $9 \cdot 10^9 \text{ m}^3$  nella zona di re-iniezione e  $1.9 \cdot 10^9 \text{ m}^3$  nella zona di produzione.

**Figura 5.2c** *Variazione della pressione del fluido relativa ad un piano passante per le zone di prelievo e re-iniezione in corrispondenza di un periodo di coltivazione della risorsa pari a 30 anni. In aggiunta, sono riportate le isosuperfici delle variazioni di pressione relative a +1 bar (volume in giallo) e -1 bar (volume in verde). E' indicata la traccia dei pozzi. Valori degli assi in m.*



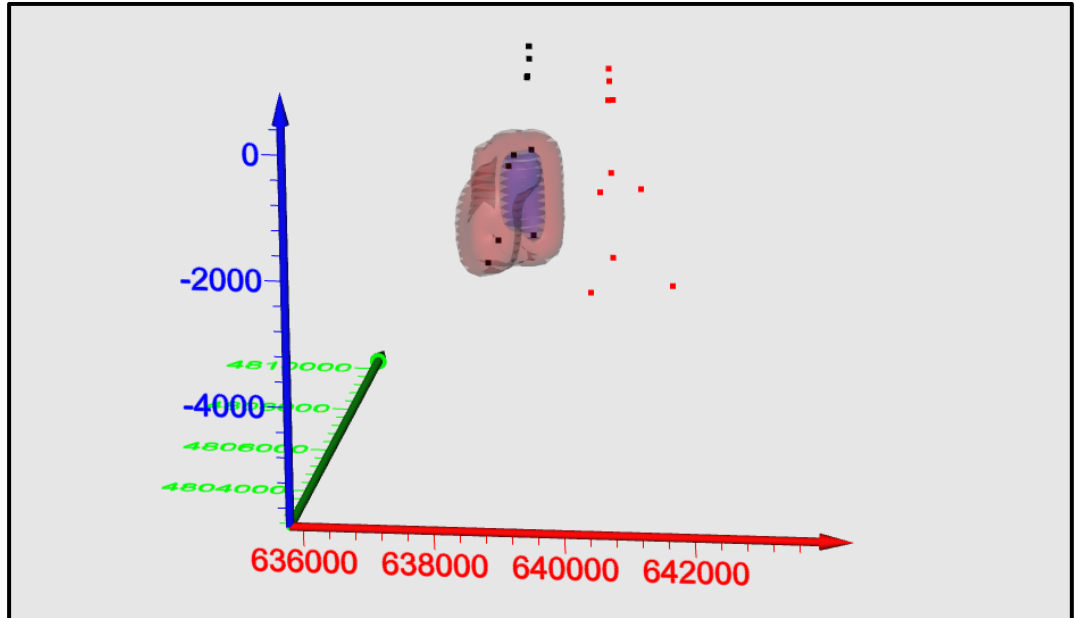
Nella successiva *Figura 5.2f* viene rappresentato l'evoluzione nel tempo, durante i 30 anni di esercizio simulati, delle variazioni di pressione nelle celle interessate dalle traiettorie dei tratti finestrati dei pozzi, sia di produzione che di re-immissione, che corrispondono alle zone di massima variazione.

Le variazioni massime, pari a circa 1 bar, avvengono a fondo pozzo ed interessano in sostanza soltanto la base di ogni pozzo, in volumi estremamente piccoli e trascurabili.

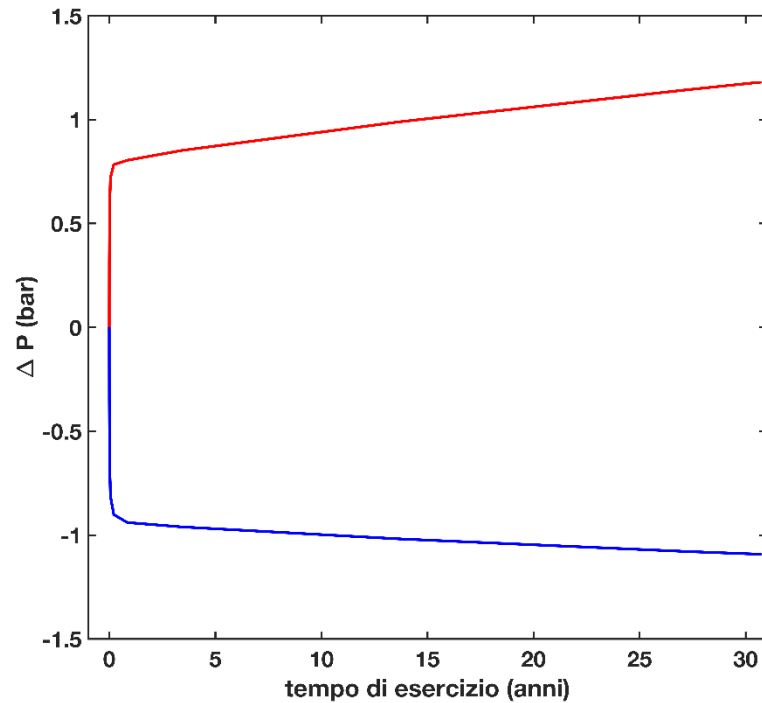
In *Figura 5.2g* si mostra l'evoluzione nel tempo, durante il primo anno di esercizio simulato, delle variazioni di pressione nelle zone più prossime ai tratti finestrati dei pozzi, sia di produzione (linea rossa) che di re-iniezione (linea blu), che corrispondono alle zone di massima variazione. Come si evince, il tempo

necessario per la conclusione della fase transitoria che consente l'instaurarsi di un regime di flusso stazionario nell'intorno dei pozzi di produzione e di reiniezione è pari a circa 1/10 anno.

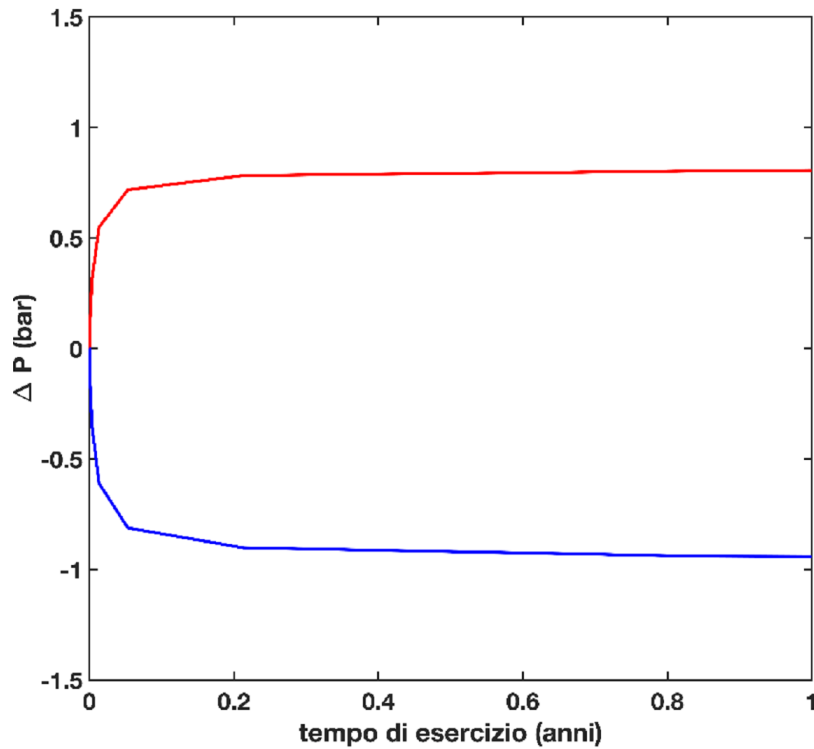
**Figura 5.2d** *Isosuperfici di variazione della temperatura. Periodo di coltivazione della risorsa pari a 30 anni. È evidenziata l'isosuperficie relativa a -25°C (in blu) e quella relativa a -5°C (in rosso). Valori degli assi in m.*



**Figura 5.2f** Simulazione dopo 30 anni dell'andamento della variazione di pressione nelle celle interessate dal tratto finestrato dei pozzi di emungimento (blu) e di re-iniezione (rosso).



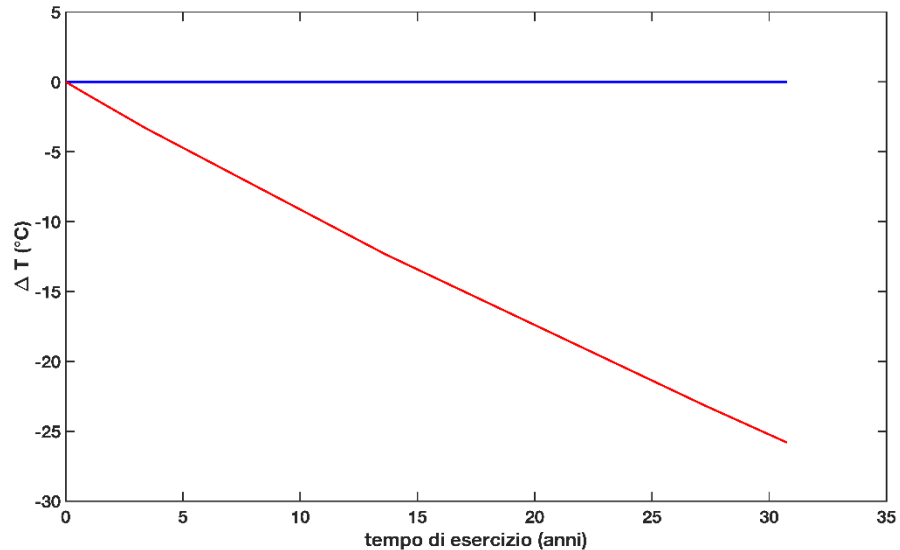
**Figura 5.2g** Simulazione dopo 1 anno dell'andamento della variazione di pressione nelle celle interessate dal tratto finestrato dei pozzi di emungimento (rosso) e di re-iniezione (blu).



In *Figura 5.2h*, sotto riportata, si mostra l'evoluzione nel tempo, durante i 30 anni di esercizio simulati, delle variazioni di temperatura nelle celle intercettate dalla traiettoria del tratto finestrato dei pozzi in oggetto, sia di produzione che di reimmissione, che corrispondono anche in questo caso alle zone di massima variazione.



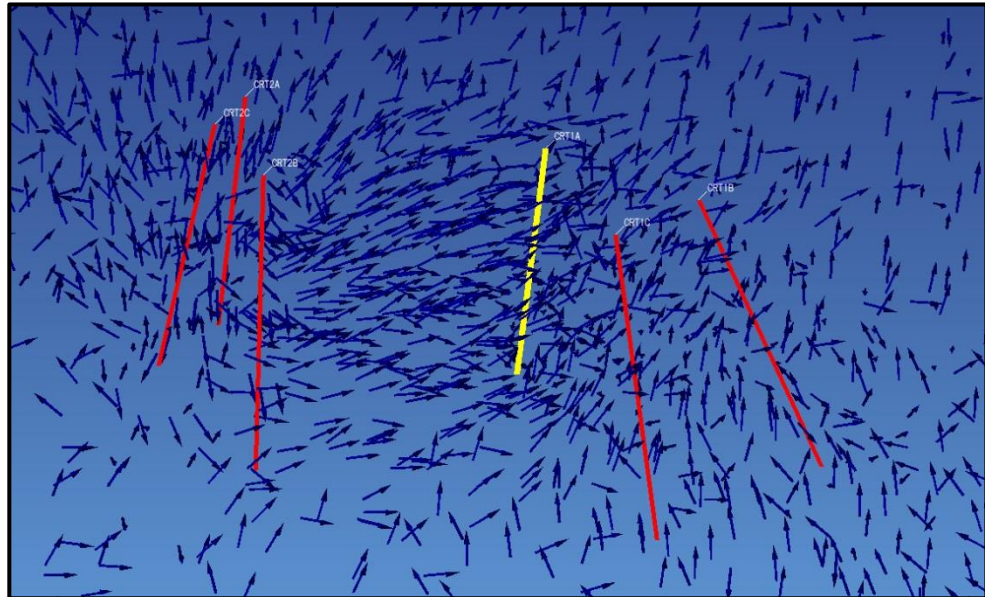
**Figura 5.2h** Simulazione dell'andamento della temperatura assoluta nelle celle interessate dal tratto finestrato della zona di emungimento (blu) e di reiniezione dei condensati (rosso)



All'instaurarsi del regime stazionario, il flusso di fluidi (*Figura 5.2i*) tra i pozzi di produzione e di reiniezione raggiunge un comportamento asintotico. In *Figura 5.2i* viene riportato l'andamento delle linee di flusso (vettori) all'interno del volume di calcolo considerato: i vettori si allontanano (a meno di errori computazionali afferibili al codice di calcolo) dai pozzi di reiniezione CRTA, CRTB e CRTC, e invece vengono richiamati dal tratto finestrato dei pozzi produttivi CRT1A, CRT1B e CRT1C.

A scopo esplicativo di tale andamento si riporta nella *Figura 5.2l* l'andamento delle linee di flusso ortogonali ad un piano verticale disposto tra le zone di produzione e di reimmissione. Il valor medio del flusso lungo tale direzione è pari a  $3 \cdot 10^{-5} \text{ kg}/(\text{s} \cdot \text{m}^2)$ .

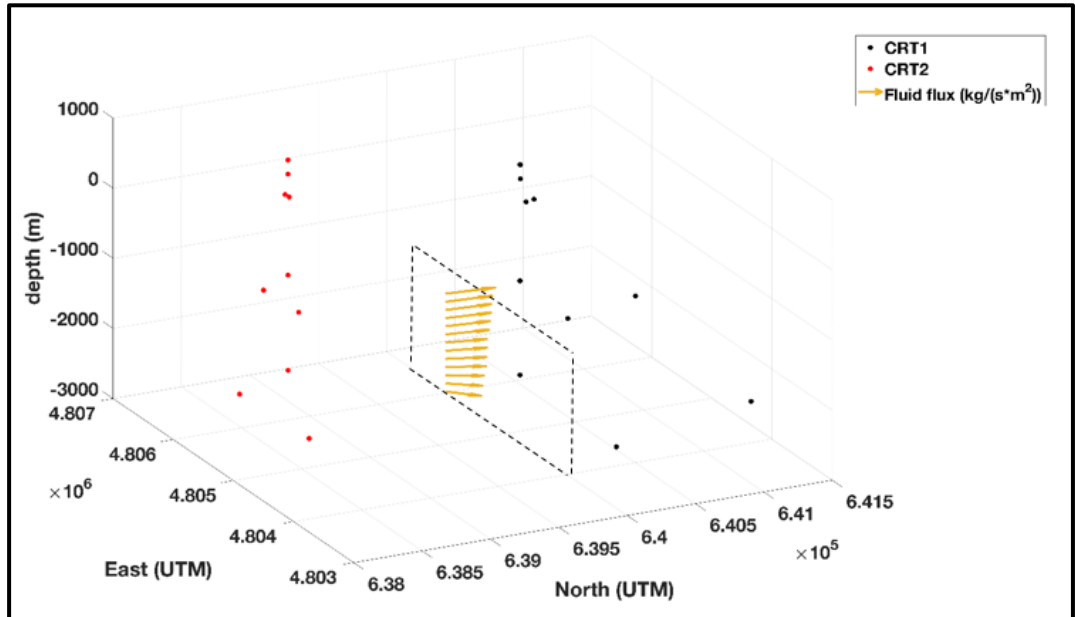
**Figura 5.2i Andamento Indicativo delle linee di Flusso all'interno del Serbatoio, restituite dalla modellazione, tra Polo Reiniettivo (pozzi CRT2A, CRT2B e CRT2C) e Polo Produttivo (pozzi CRT1A, CRT1B e CRT1C).**



Assumendo questo valore di “flusso dei fluidi” rappresentativo di quello di tutta la zona congiungente i pozzi di emungimento e re-iniezione e considerando che il reservoir ha uno spessore medio di circa 1.500 m, ne risulta che attraverso una superficie di circa  $1.500 \times 4.000 \text{ m}^2$  transiterà una quantità di fluido pari al 90% del totale iniettato. Infatti, risulta che per la superficie sopra considerata passa una portata pari a 189 l/s, contro i 210 l/s di progetto.

Tale risultato appare pienamente compatibile con l'architettura dei pozzi.

**Figura 5.2|Andamento delle linee di flusso attraverso un piano verticale disposta tra le zone di produzione e di reimmissione**



**CONCLUSIONI**

Le simulazioni condotte sono state finalizzate a valutare le variazioni termodinamiche del sistema geotermale del serbatoio geotermico di Cortolla, a seguito dell'attività di emungimento di fluidi caldi e reiniezione totale del fluido, con una variazione di temperatura tra produzione e reiniezione di 70 °C, dal/nel reservoir geotermico, con portate di 70 l/sec per ogni pozzo, per una portata totale di 210 l/s.

Le simulazioni sono state basate sul modello geologico-termico, ricavato dai dati geologici e geofisici riportati nel Progetto Definitivo.

I risultati principali delle simulazioni, eseguite per un periodo di coltivazione della risorsa di 30 anni, possono così essere sintetizzati:

- nel dominio interessato dei pozzi di produzione e dei pozzi di re-iniezione la coltivazione induce un regime transitorio, della durata di circa 1/10 di anno, seguito da una condizione quasi-stazionaria;
- un incremento di pressione ( $> +1$  bar) si osserva nel dominio del pozzo reiniettivo, in un volume pari a  $9 \cdot 10^9$  m<sup>3</sup>
- l'aumento massimo di pressione, registrato in corrispondenza di ogni pozzo (nella zona di re-iniezione) è pari a circa 1 bar e interessa solo un ridottissimo spazio intorno ai tratti finestrati dei pozzi;
- un decremento di pressione ( $< -1$  bar) si osserva nel dominio dei pozzi di emungimento, in un volume pari a  $1.9 \cdot 10^9$  m<sup>3</sup>. Il decremento massimo (circa -1 bar) si osserva in corrispondenza dei pozzi di emungimento, in volumi estremamente piccoli;
- il campo termico mostra variazioni di temperatura trascurabili nel dominio dei pozzi di emungimento. Variazioni più significative si riscontrano invece nella zona dei pozzi di re-iniezione, a causa della bassa temperatura dei fluidi reiniettati;
- dalla ricostruzione delle linee di flusso, e da una veloce stima, è risultato che i pozzi di produzione richiamano circa il 90 % dei fluidi immessi nel serbatoio geotermico dai pozzi reiniettivi.

## BIBLIOGRAFIA

Barelli A., G. Bertini, G. Buonasorte, G. Cappetti and A. Fiordelisi, 2000. "Recent deep exploration results at the margins of the Larderello-Travale geothermal system". *Proceedings World Geothermal Congress, Kyushu-Tohoku, Japan, 965-970.*

Barelli, A., Cei, M., Lovari, F., & Romagnoli, P. (2010). Numerical modeling for the Larderello-Travale geothermal system, Italy. In *Proceedings world geothermal congress.*

Batini F., Burgassi P.D., Cameli G.M., Nicolich R., Squarci P. (1979). Contribution to the study of the deep lithospheric profiles: deep reflecting horizon in Larderello-Travale geothermal Field. *Mem. Soc. Geol. It., Vol. 19, pp. 477-484.*

Batini F., A. Fiordelisi, F. Graziano, M. Nafi Toksöz, 1995. "Earthquake and Tomography in the Larderello Geothermal Area: Geothermal Anomalies and Structural Features of Southern Tuscany". – *Proceedings World Geothermal Congress, Florence, Italy, 817-820.*

Bellani S., A. Brogi, A. Lazzarotto, D. Liotta and G. Ranalli, 2004. "Heat flow, deep temperatures and extensional structures in the Larderello geothermal field (Italy): constraints on geothermal fluid flow". *Journal of Volcanology and Geothermal Research, 132, 15-29.*

Bellani S., Gherardi F., (2009). *Thermal Modeling of an Area West of the Mt. Amiata Geothermal Field, Italy - GRC, Transactions, Vol. 33;*

Bellani S., Gherardi F., (2013). *Thermal Overview of an Area NW of the Larderello Geothermal Field, Italy - GRC, Transactions, Vol. 37;*

Bertini G., Cameli G.M., Costantini A., Decandia F.A., Di Filippo M., Dini L., Elter F.M., Lazzarotto A., Liotta D., Pandeli E., Sandrelli F. & Toro B. (1991) - *Struttura geologica fra i Monti di Campiglia e Rapolano Terme (Toscana Meridionale): stato attuale delle conoscenze e problematiche. Studi Geol. Camerti, vol. spec. (1991/1), 155-178.*

Borsi S., Ferrara G. e Tongiorgi E., 1967. *Determinazione con il metodo K/ar della età delle rocce magmatiche della Toscana. Boll. Soc. Geol. It., 86, 403-410.*

Bossio A., Foresi L.M., Mazzei R., Salvatorini G., Sandrelli F., 1996. *Evoluzione tettonico-sedimentaria neogenica lungo una trasversale ai bacini di Volterra e della Val d'Elsa. Studi Geol. Camerti, Volume Speciale 1995/1: 93-104.*





Brogi A., Lazzarotto A., Liotta D., Nicolich R., Ranalli G. (2003). L'orizzonte K nella crosta dell'area geotermica di Larderello (Toscana meridionale). *Boll. Soc. Geol. It.*, Vol. 122, pp. 103-116.

Brogi A., A. Lazzarotto, D. Liotta and G. Ranalli, 2003. "Extensional Shear Zones as Imaged by Reflection Seismic Lines: the Larderello Geothermal Field (Central Italy)". – *Tectonophysics* 363, 127-139.

Brogi A., 2004. Miocene extension in the inner Northern Apennines: the Tuscan Nappe megaboudins in the Mt. Amiata geothermal area and their influence on Neogene sedimentation. *Boll. Soc. Geol. It.*, 123, 513-529, 10ff.

Cameli G.M., I. Dini and D. Liotta, 1993. "Upper Crustal Structure of the Larderello Geothermal Field as a Feature of Post-Collisional Extensional Tectonics (Southern Tuscany, Italy)". *Tectonophysics* 224, 413-423.

Constantini a., Lazzarotto A., Mazzanti R., Mazzei R., Salvatorini G., Sandrelli F., 2002. Note illustrative della Carta geologica d'Italia in scala 1:50.000, Foglio 285 – Volterra, LAC, Firenze: 149 pp.

Decandia F.A., Lazzarotto A., Liotta D., Cernobori L, Nicolich R. (1998). The Crop 03 traverse: insight on post-collisional evolution of northern Apennines. *Mem. Soc. Geol. It.*, Vol. 52, pp. 427-439.

Della Vedova B., C. Vecellio, S. Bellani and U. Tinivella (2007). "Thermal modelling of the Larderello geothermal field". *Int. J. Earth Sci.* 97, 317-332.

Doveri, M., Lelli, M., Marini, L., & Raco, B. (2010). Revision, calibration, and application of the volume method to evaluate the geothermal potential of some recent volcanic areas of Latium, Italy. *Geothermics*, 39(3), 260-269.

Edwards, A. L. (1972). *Trump: A Computer Program for Transient and Steady State Temperature Distributions in Multidimensional Systems*, National Technical Information Service, National Bureau of Standards, Springfield, Va.

Enel, (2009). *Acquiferi del Monte Amiata e Coltivazione Geotermica. Integrazioni Riassetto di Piancastagnaio*;

Magro G., Bellani S. & Della Vedova B., 2009. *The Deep Roots of the Larderello Geothermal Field (Italy) from Heat Flux and 3He Anomalies. Transactions - Geothermal Resources Council - January 2009.*

Marinelli G., Barberi F. & Cioni R. 1993. *Sollevamenti neogenici e intrusioni acide della Toscana e del Lazio Settentrionale. Mem. Soc. Geol. It.*, 49, 279-288.

Muffler, P., & Cataldi, R. (1978). *Methods for regional assessment of geothermal resources. Geothermics*, 7(2-4), 53-89.



*Pascucci V., S. Merlini and I.P. Martini, 1999. "Seismic stratigraphy of the Miocene-Pleistocene sedimentary basins of the Northern Tyrrhenian Sea and Western Tuscany (Italy)". Basin Research, 11, 337-356.*

*Pruess, K., 1991. TOUGH2 – A General Purpose Numerical Simulator for Multiphase Fluid and Heat Flow. L. B. L. Report. Berkeley, CA. LBL- 29400.*

*Pruess, K., Oldenburg, C. & Moridis, D., 1999. TOUGH2 User's Guide. Berkeley, California. LBNL-43134.*

*Carta Gravimetrica d'Italia 1:250000 APAT, Agenzia per la protezione dell'ambiente e per i servizi tecnici Dipartimento Difesa Del Suolo - Servizio Geologico d'Italia.*

*Inventario delle risorse geotermiche nazionali, ENEL, ENI-AGIP, CNR e ENEA con il coordinamento del Ministero dello Sviluppo Economico, 1986,;*

*Progetto VIDEPI Visibilità dei dati afferenti all'attività di esplorazione petrolifera in Italia. Ministero per lo Sviluppo Economico/UNMIG, Assomineraria e Società Geologica Italiana. 2009-2016.*



PROGETTO

P16\_RNW\_041

TITOLO

RENEWEM SRL:

IMPIANTO PILOTA GEOTERMICO "CORTOLLA"

MODELLAZIONE NUMERICA DEL SERBATOIO GEOTERMICO DEL PR "CORTOLLA"

REV.

0

Pagina

33