

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

COMUNE DI RADICONDOLI – PROVINCIA DI SIENA

PROPONENTE:

Lucignano Pilot Project S.r.l.



## PROGETTO DEFINITIVO

NUMERO ELABORATO:

**LCG-RP01-A12-V00**

TITOLO:

**MODELLO GEOLOGICO E NUMERICO**

DATA:

Aprile 2017

PROGETTISTI:

**RENEWEM S.r.l**

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

UFFICI:

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

### REVISIONE

	DATA	NOTE
REV1		
REV2		
REV3		



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

COMUNE DI RADICONOLI – PROVINCIA DI SIENA

**PROCEDURA DI VALUTAZIONE DI IMPATTO AMBIENTALE**

## **MODELLO GEOLOGICO E NUMERICO**

2

### **LPP S.R.L.**

*Modello Geologico:*

Dott. W. Luperini

Dott. F. Martini

Dott. N. Sannino

*Modello Numerico:*

Steam Srl



# **Impianto Pilota Geotermico “LUCIGNANO”**

## **Modellazione Numerica del Serbatoio Geotermico del PR “Lucignano”**

*Preparato per:*  
**Lucignano Pilot Project S.r.l.**

Aprile 2017

*Codice Progetto:*  
P17\_RNW\_004

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.*

# **Impianto Pilota Geotermico “LUCIGNANO”**

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



---

*Geol. Paolo Basile*

<b>Progetto</b>	<b>Rev</b>	<b>Preparato da</b>	<b>Rivisto da</b>	<b>Approvato da</b>	<b>Data</b>
P17_RNW_004		PB - GB	GB	RC, WL, FM	07/04/2017

## INDICE

<b>1</b>	<b>PREMESSA</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>ARCHITETTURA DEL PROGETTO E CARATTERISTICHE TECNICHE-PROGETTUALI</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>SINTESI DEI DATI</b>	<b>4</b>
<b>3.1</b>	<b>DATI GEOLOGICI</b>	<b>4</b>
<b>3.2</b>	<b>DATI SISMICI</b>	<b>4</b>
<b>4</b>	<b>MODELLO GEOLOGICO-STRUTTURALE</b>	<b>9</b>
<b>4.1</b>	<b>SUPERFICI</b>	<b>9</b>
<b>4.2</b>	<b>MODELLO TERMICO</b>	<b>12</b>
<b>4.3</b>	<b>PARAMETRI</b>	<b>16</b>
<b>4.4</b>	<b>MODELLO GEOLOGICO TRIDIMENSIONALE</b>	<b>16</b>
<b>5</b>	<b>SIMULAZIONI NUMERICHE E MODELING TERMODINAMICO DEL SERBATOIO GEOTERMICO</b>	<b>20</b>
<b>5.1</b>	<b>MODELLO FISICO</b>	<b>21</b>
<b>5.2</b>	<b>RISULTATI DELLA MODELLAZIONE</b>	<b>25</b>
<b>5.2.1</b>	<b>Stato Stazionario</b>	<b>25</b>
<b>5.2.2</b>	<b>Stato Transitorio e Pseudo-Stazionario</b>	<b>26</b>
<b>6</b>	<b>CONCLUSIONI</b>	<b>30</b>
	<b>BIBLIOGRAFIA</b>	<b>31</b>

## 1

**PREMESSA**

L'area interessata dal progetto di Impianto Pilota Sperimentale di Lucignano è situata immediatamente a Nord-Est della grande area geotermica di Larderello-Travale.

L'area geotermica di Larderello-Travale 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 Scapernata, Casalone, Radicondoli 15 e Radicondoli 19 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, per un'area molto più vasta e comprendente anche quella del Permesso "Lucignano", hanno permesso di ricostruire un modello geologico e geotermico. Le modellazioni sono state condotte per l'area del Permesso di Ricerca Lucignano partendo dalla constatazione della loro appartenenza allo stesso grande sistema geotermico di Larderello-Travale.

Il modello geologico strutturale e termico, di seguito mostrato, è stato sviluppato prevalentemente da Lucignano Pilot Project srl, 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 "Lucignano" è finalizzato all'utilizzo delle risorse geotermiche presenti in un'area della Toscana centro-meridionale, ubicata a sud del centro abitato di Radicondoli (SI), 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 "Lucignano" 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;
- 2) 3 pozzi di produzione del fluido geotermico (realizzati in corrispondenza di 1 piazzola di perforazione);
- 3) 2 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;

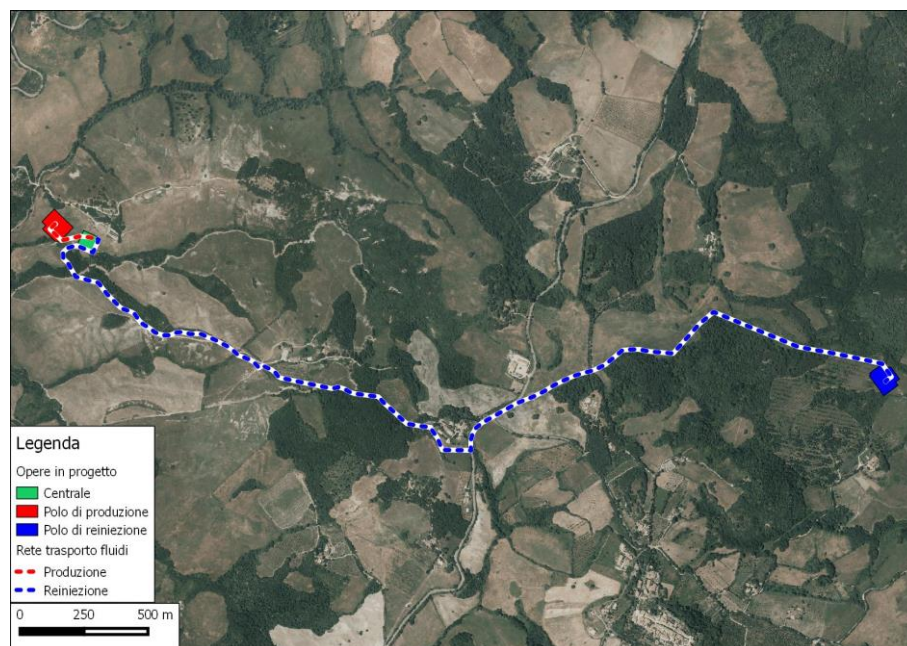
Completano il layout, con riferimento alla centrale:

- 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
 STEAM	P17_RNW_004	LUCIGNANO PILOT PROJECT SRL: IMPIANTO PILOTA GEOTERMICO "LUCIGNANO" MODELLAZIONE NUMERICA DEL SERBATOIO GEOTERMICO DEL PR "LUCIGNANO"	0	2



**Figura 2.1a** *Layout di progetto.***Tabella 2.1a** *Caratteristiche tecnico-progettuali.*

Caratteristiche di produzione	
Portata totale	180 t/h
Temperatura di produzione	180 °C
Temperatura di reiniezione	70 °C
Pozzi produttivi	N° 3
Portata di ciascun pozzo produttivo	60 t/h
Pozzi reiniettivi	N° 2
Distanza media tra le zone di serbatoio produttive e reiniettive	3 km
Quota della postazione di produzione	276 m slm
Quota della postazione di reiniezione	376 m slm
Profondità pozzi verticali	3800 m
Pozzi deviati	
Profondità verticale	3800 m
Profondità deviato	4016 m
Scostamento dalla verticale	700-900 m
Tratti open hole	
Pozzo verticale produzione	2500-3800 m pc
Pozzo deviato produzione	2500-3800 m pc
Pozzo verticale reiniezione	1700-3800 m pc
Pozzo deviato reiniezione	1700-3800 m pc

### 3 SINTESI DEI DATI

#### 3.1 DATI GEOLOGICI

L'area in esame si trova al margine orientale dell'area geotermica tradizionale di Larderello-Travale. 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 studio ricade all'interno del Bacino di Radicondoli, uno dei principali bacini sedimentari medio-tardo-Miocenici della Toscana meridionale. Questo bacino, delimitato ad oriente dal Middle Tuscan Range ed ad occidente dalle Colline Metallifere, consiste in una depressione tettonica orientata NNW-SSE lunga circa 60 Km e larga 14-18 Km. Il Bacino di Radicondoli è una depressione strutturale con una forma concava verso l'alto come documentato dai dati dei sondaggi e dalle linee di sismica a riflessione. Questa depressione è stata colmata da sedimenti Miocenici affioranti principalmente nel settore meridionale del bacino e sepolti dai sedimenti Pliocenici del Bacino di Volterra a Nord e dai sedimenti Pliocenici e Villafranchiani a Sud. Nell'area del Permesso di Ricerca affiorano, oltre ai sedimenti Miocenici e Pliocenici, le unità relative al Dominio Ligure ed in particolare la Formazione di Monteverdi Marittimo. I dati stratigrafici profondi permettono la ricostruzione dei rapporti tra le unità tettono-stratigrafiche costituenti il substrato del Bacino di Radicondoli. Da questi dati emerge che le Liguridi appaiono tettonicamente assottigliate mentre la Falda Toscana ed il gruppo del Verrucano risultano lateralmente discontinui. Questo assetto è derivato dall'attività di faglie dirette mediotardo-Mioceniche correlate al susseguirsi di due eventi estensionali. Il primo ha prodotto la segmentazione laterale delle Liguridi e della Falda Toscana mentre il Gruppo del Verrucano è stato interessato da faglie dirette soltanto durante la seconda fase deformativa. A questi eventi si è sovrapposta, nel Pliocene inferiore e medio, una tettonica estensionale che ha portato alla formazione di bacini caratterizzati da una sedimentazione sin-tettonica (Brogi e Liotta, 2008) (Figura 3.1a, Figura 3.1b).



PROGETTO

P17\_RNW\_004

TITOLO

LUCIGNANO PILOT PROJECT SRL:

IMPIANTO PILOTA GEOTERMICO "LUCIGNANO"

MODELLAZIONE NUMERICA DEL SERBATOIO GEOTERMICO DEL PR "LUCIGNANO"

REV.

0

Pagina

4

**Figura 3.1a** Stralcio della carta geologica 1:50.000 CARG, Fogli 296. La legenda è mostrata in Figura 3.1b.

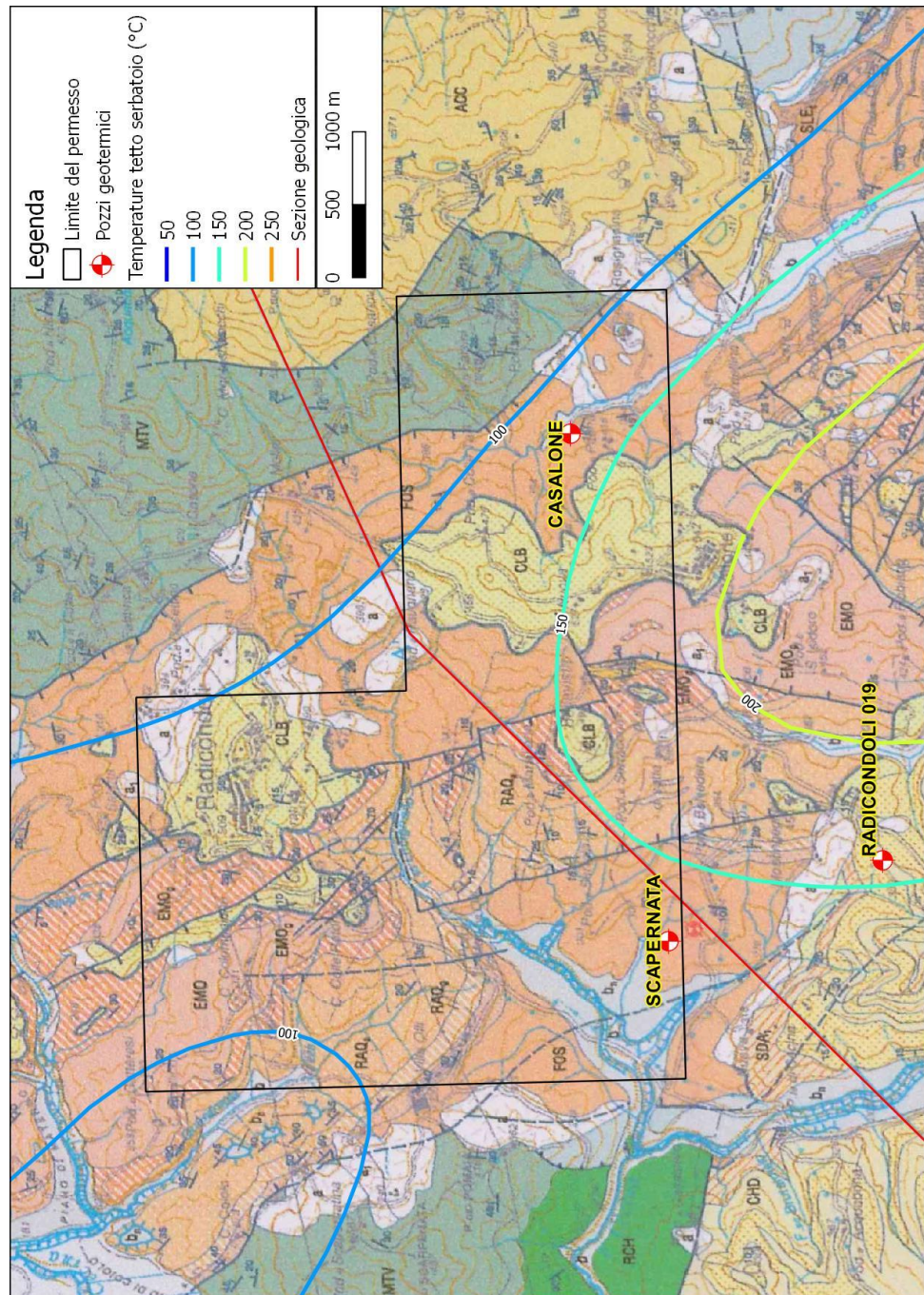


Figura 3.1b **Legenda della carta geologica Foglio 296.**

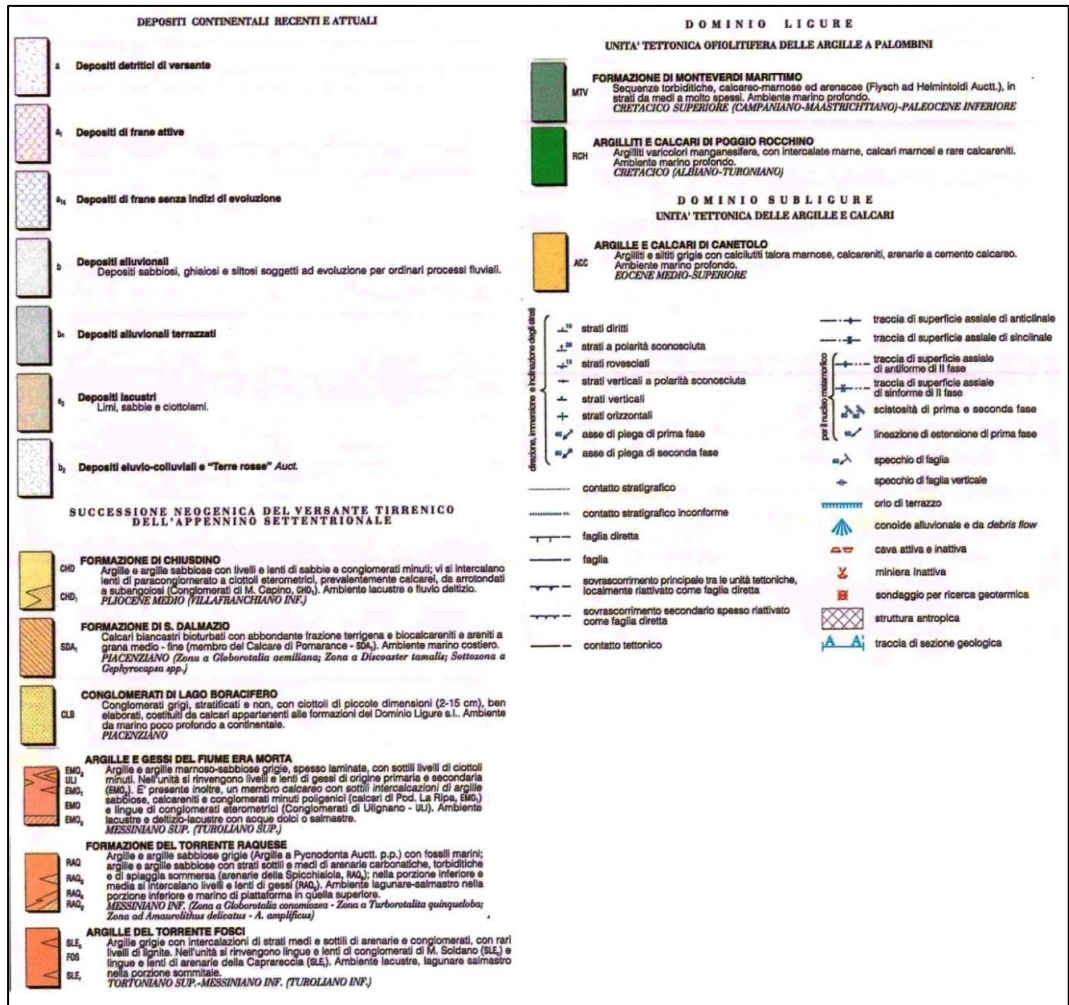
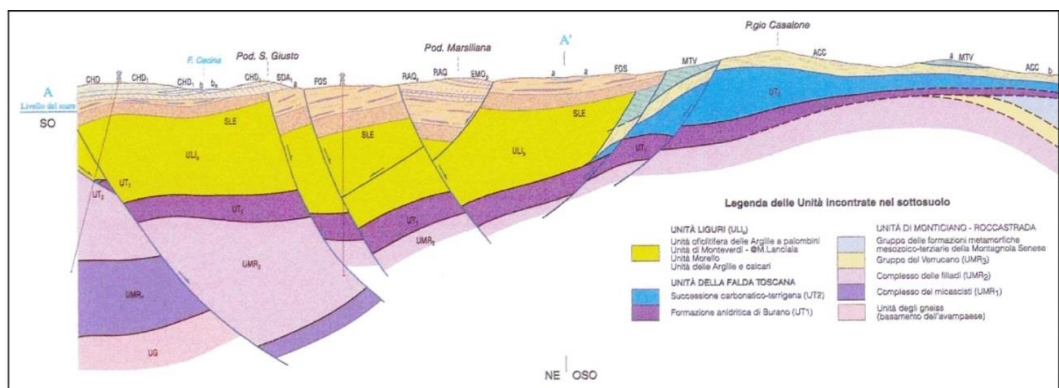


Figura 3.1c **Sezione geologica della carta geologica 1:50.000 Carg Foglio 296(per l'ubicazione si rimanda alla Figura 3-1a).**

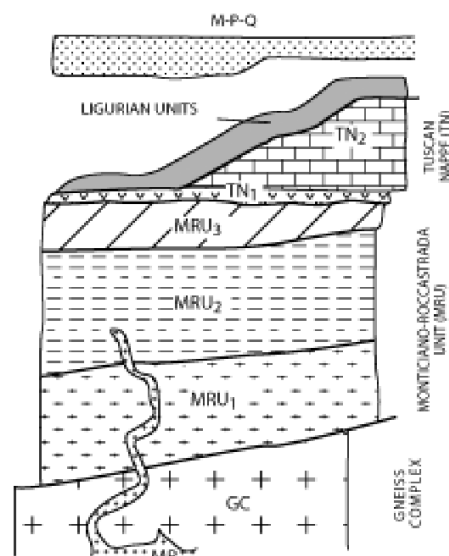


La successione stratigrafico-strutturale del permesso di ricerca rispecchia quello generale della toscana meridionale (Batini et alii, 2003) e precisamente dalle seguenti unità dall'alto verso il basso (Figura 3.1d):

- 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 Arenarie 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 prospezioni geofisiche e 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.

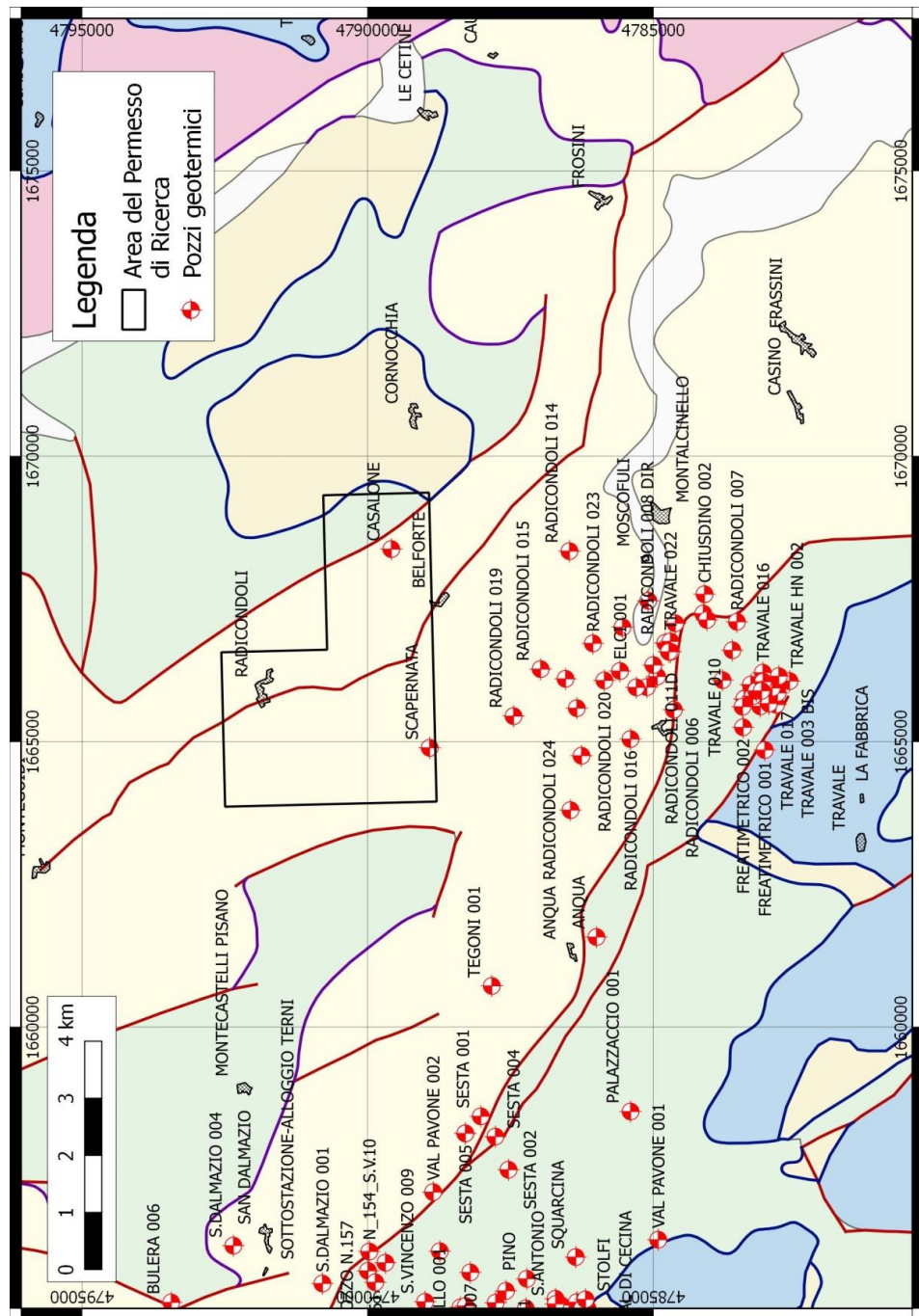
Buona parte dei sondaggi sono presenti nell'area tradizionale di Larderello-Travale, all'interno delle concessioni ENEL attualmente in fase di coltivazione, ma diversi pozzi sono presenti anche all'interno dell'area di interesse e nelle sue immediate vicinanze (Figura 3.1e).

Tra questi, 7 sono stati di fondamentale importanza per le informazioni fornite sull'assetto del sottosuolo nell'area (Figura 3.1f).

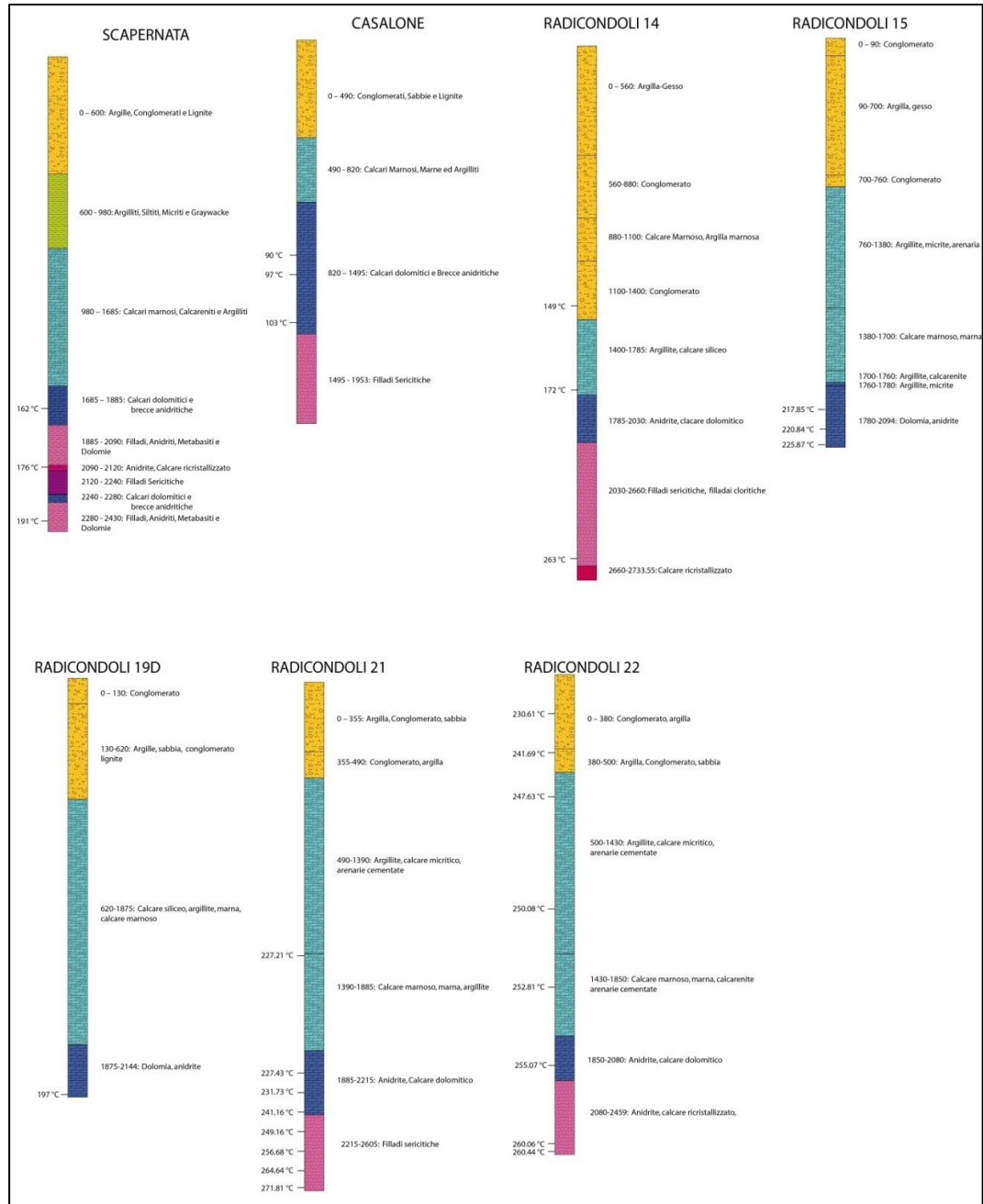
Dalla stratigrafia dei pozzi ENEL presenti in zona è stato innanzitutto possibile ricostruire l'andamento del tetto e dello spessore di quella parte del potenziale serbatoio geotermico costituito dalle Formazioni della Falda Toscana. Il pozzo Scapernata incontra il Calcare Cavernoso ad una profondità di 1685 m dal p.c. mentre, procedendo verso est, il tetto del serbatoio si rinviene a profondità inferiori. La stratigrafia del pozzo Casalone infatti evidenzia la presenza del Calcare Cavernoso ad una profondità di 820 m dal p.c..

I pozzi Radicondoli 14, 15, 19D, 21 e 22, ubicati a circa due chilometri a sud dell'area del permesso, ricadono all'interno del bacino di Radicondoli e permettono quindi una accurata ricostruzione dell'assetto geologico del sottosuolo. Questi pozzi incontrano il top del serbatoio a profondità comprese tra i 1700 ed i 1900 m evidenziando la continuità della struttura tra la parte meridionale e quella settentrionale.

**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.**

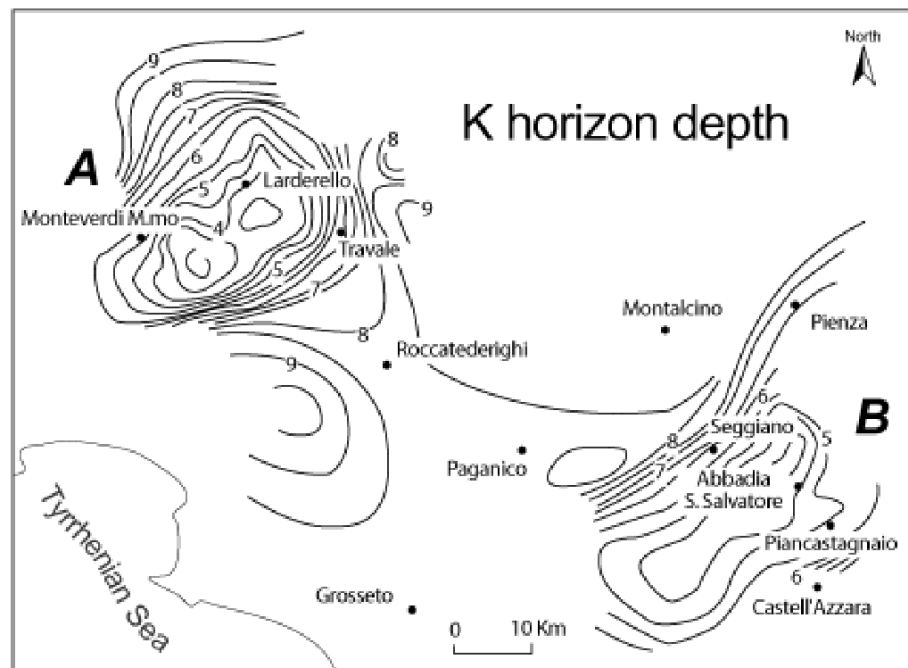


Oltre alle importanti informazioni di tipo geologico-strutturale, questi sondaggi hanno fornito importanti dati sull'assetto termico dell'area e sulle condizioni del reservoir geotermico. Le temperature misurate al tetto del serbatoio geotermico nel sondaggio Scapernata sono dell'ordine dei 160°C, mentre nel Radicondoli 19 sono state misurate temperature di 197 °C, temperature fino a 217 °C sono state rinvenute nel pozzo Radicondoli 15.



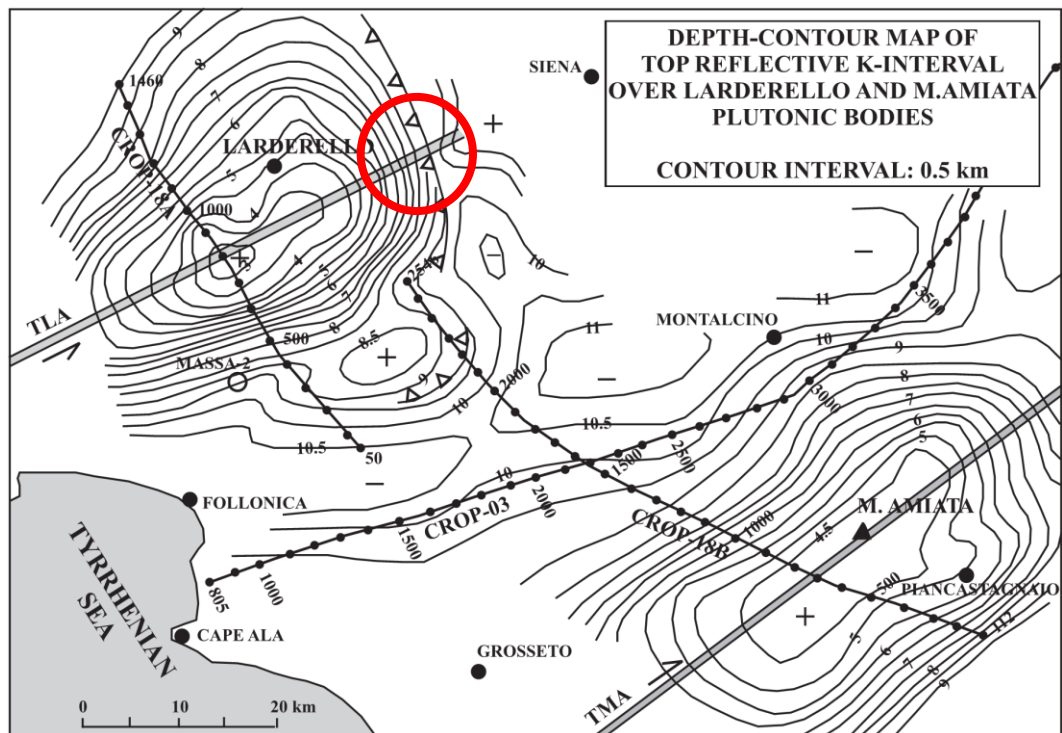
Diversi studi sull'area di Larderello-Travale hanno messo in evidenza la presenza di un marker sismico continuo definito come marker "K" (Batini et alii, 1979; Cameli et alii, 1993; Decandia et alii, 1998; Batini et alii, 2003; Brogi et alii, 2003). Questo orizzonte K presenta una culminazione al di 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).*



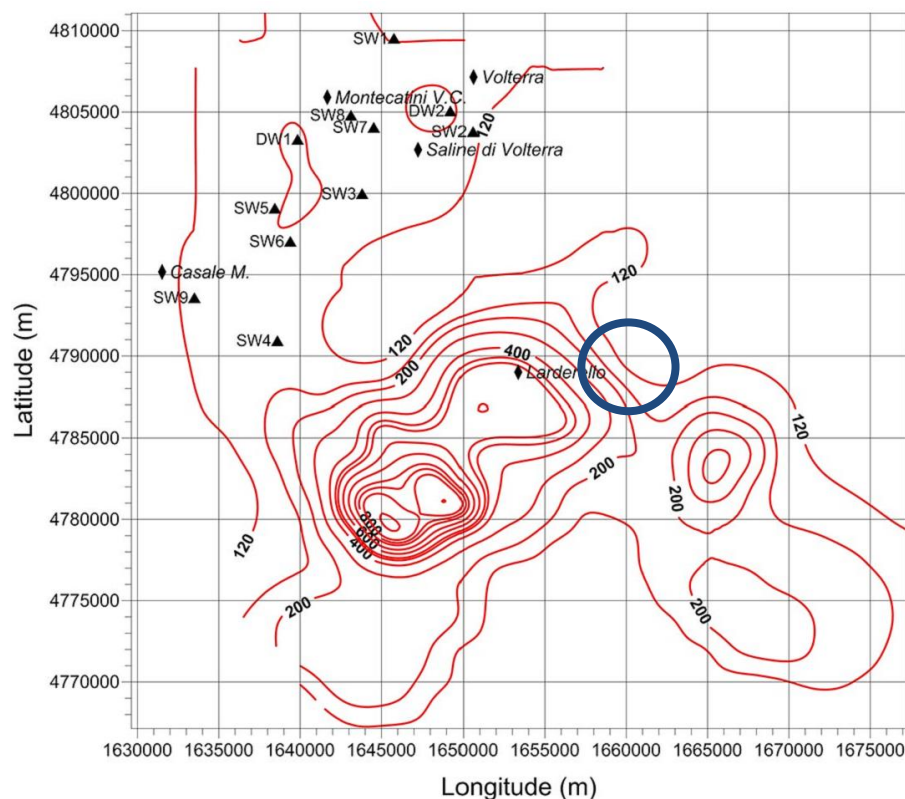
L'andamento dell'orizzonte K nell'area di progetto è estrapolabile dalla carta dell'orizzonte K presente nel lavoro di Finetti (2006) dalla quale risulta che, nell'area di progetto, l'orizzonte K si trova a profondità di 5.000 – 9.000 m s.l.m. (Figura 3.1h).

**Figura 3.1h** Mappa dell'orizzonte K (m s.l.m.) (Finetti, 2006). 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 Lucignano. Infatti osservando l'andamento del flusso di calore di Figura 3-1i si osserva che la linea di isoflusso dei  $120 \text{ mW/m}^2$  comprende tutto il sistema dei campi geotermici di Larderello-Travale e anche l'area del progetto Lucignano.

**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

Importanti informazioni sull'assetto geologico strutturale dell'area derivano dai rilievi sismici effettuati da ENEL nel corso dell'esplorazione dell'area di Travale-Radicondoli. In particolare nell'area geotermica di Travale-Radicondoli sono stati eseguiti negli anni moltissimi rilievi sismici 2D e 3D alcuni dei quali sono disponibili in letteratura. Nello specifico ricadono nell'area di interesse le linee sismiche LAR-7, LAR-37 e LAR-14 (non a disposizione in quanto non pubblicata) e ai margini la linea TR-2 (Figura 3.2a).

La bibliografia disponibile, oltre a mettere a disposizione questi dati, fornisce anche importanti indicazioni sulla interpretazione integrata delle conoscenze geologiche geofisiche e geotermiche del serbatoio in coltivazione da decenni. Si possono quindi estrapolare verso l'area di interesse correlazioni tra i profili sismici e i dati geologici di superficie e profondi nonché individuare marker geotermici quali gli orizzonti H e K.

L'esame di queste linee sismiche mostra abbastanza distintamente l'assetto strutturale del permesso. In particolare si distinguono: il riempimento clastico dei bacini estensionali neogenici e le unità tettoniche Mesozoico-Terziarie, sovrapposte ed impilate in seguito ad una tettonica polifasica (Fiordelisi et alii, 2005).

Il segnale ad alta riflettività delle unità carbonatiche evaporitiche (Calcere cavernose) triassiche mette in evidenza il passaggio dalla porzione superficiale sedimentaria alla parte metamorfica profonda della successione e rappresenta il top dell'obiettivo minerario dei pozzi previsti. Al di sotto dei carbonati le rocce paleozoiche sono caratterizzate da un metamorfismo che aumenta con la profondità variando da filladi a cornubianiti. Questa situazione della parte profonda è evidenziata nelle sezioni sismiche dalle riflessioni dell'orizzonte H poste come noto nel campo di Larderello all'interno delle cornubianiti. A maggiori profondità sono presenti le riflessioni profonde legate all'orizzonte K (Fiordelisi et alii, 2005).



PROGETTO

P17\_RNW\_004

TITOLO

LUCIGNANO PILOT PROJECT SRL:  
IMPIANTO PILOTA GEOTERMICO "LUCIGNANO"  
MODELLAZIONE NUMERICA DEL SERBATOIO GEOTERMICO DEL  
PR "LUCIGNANO"

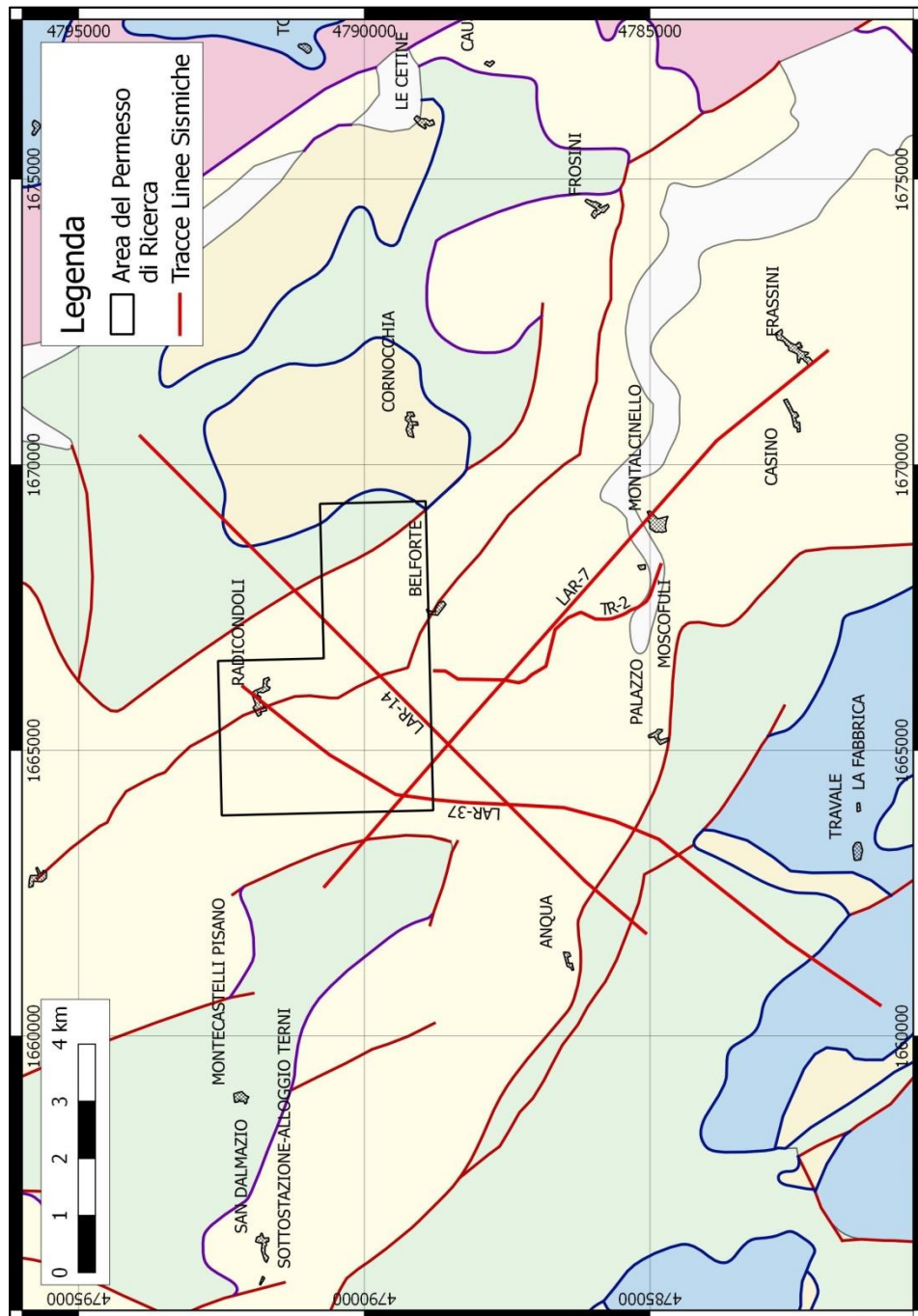
REV.

0

Pagina

5

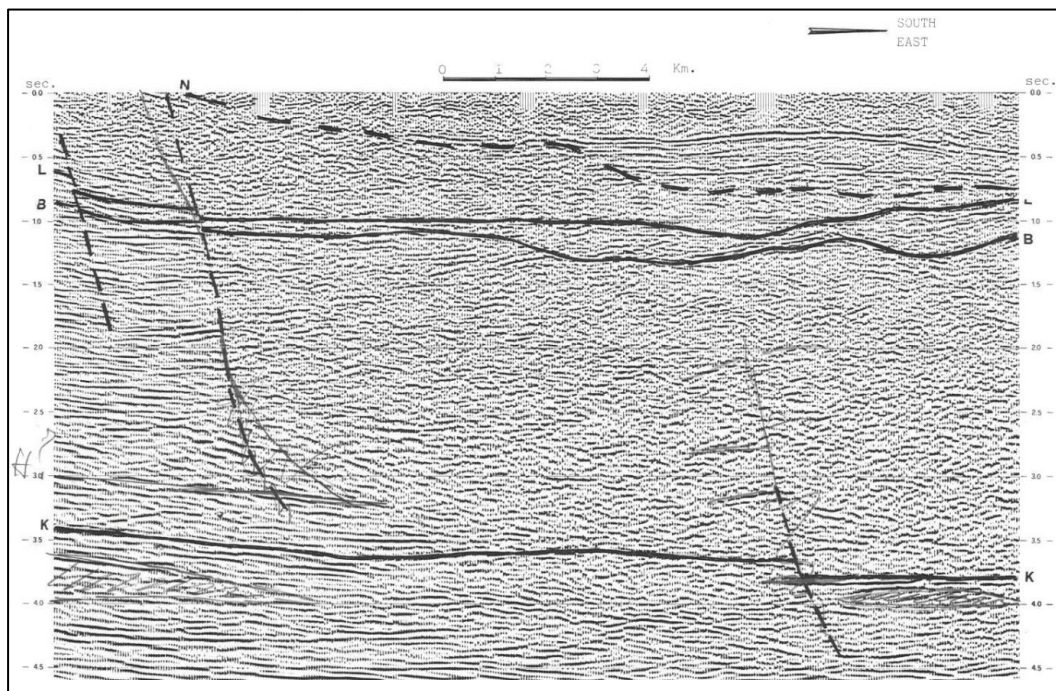
**Figura 3.2a** Tracce delle linee sismiche presenti nell'area del Permesso (Fiordelisi et alii, 2005; Bertini et alii, 2005; Batini e Nicolich, 1984; Batini e Nicolich, 1985).



La linea LAR-7 (Figura 3.2b) evidenzia considerevoli spessori di sedimenti Neogenici e dei flysch Liguri. La base delle Liguridi non è ben definita mentre il top del basamento è ben evidente nella parte centrale della sezione. L'orizzonte K è evidenziato da eventi ad elevata ampiezza. Dalla linea risulta evidente come l'intero basamento risulta essere interessato, soprattutto nella parte sinistra della

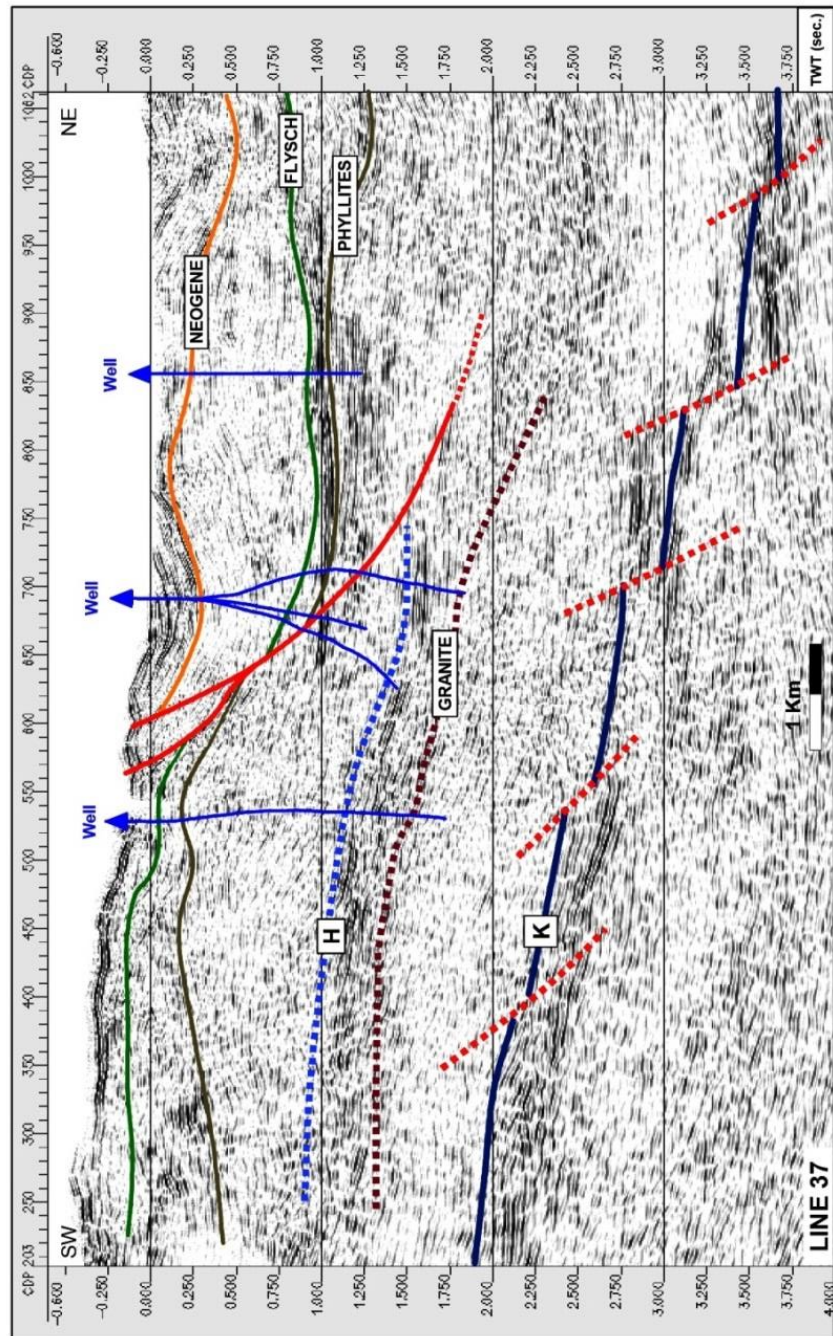
linea, da segmenti di riflessioni che, seppur discontinui, evidenziano elevate ampiezze (Batini e Nicolich, 1984).

**Figura 3.2b** Linea LAR7 migrata interpretata (Batini e Nicolich, 1984).



La LAR-37 (Figura 3.2c) evidenzia la presenza del marker K alla profondità di 6000-8000 m che si approfondisce gradualmente in direzione E-SE dove è caratterizzato da una minore ampiezza di segnale e da evidenti discontinuità. Queste hanno una direzione NW-SE che richiama l'andamento delle strutture superficiali. Il marker H è alla profondità di circa 4000 m e diversi pozzi hanno confermato la sua corrispondenza con i livelli di rocce termometamorfiche. Le perforazioni hanno raggiunto i livelli granitici ad una profondità di 4000 m, poche centinaia di metri al disotto dell'aureola termometamorfica. L'orizzonte H rappresenta inoltre un importante marker dove si concentrano i livelli più produttivi. Ulteriori livelli produttivi sono stati rinvenuti a profondità minori ma sempre nelle formazioni metamorfiche (Bertini et al., 2005).

**Figura 3.2c** Linea LAR37 riprocessata, migrata e interpretata con l'ausilio di alcuni pozzi (Fiordelisi et alii, 2005).



## 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 del sottosuolo dell'area del permesso pilota Lucignano.

La seguente stratigrafia, riportata in Tabella 4a, deriva dalle stratigrafie dei pozzi geotermici Scapernata, Casalone e Radicondoli 15 e Radicondoli 19.

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

Unità	Da (m pc)	A (m pc)	Modello del campo geotermico
Neogene	0	800	Unità di copertura
Unità Liguri	800	1600	Unità di copertura
Unità della Flada Toscana (Calcare Cavernoso Anidriti di Burano)	1600	2000	Serbatoio geotermico
Basamento metamorfico	2000	6000	Serbatoio geotermico

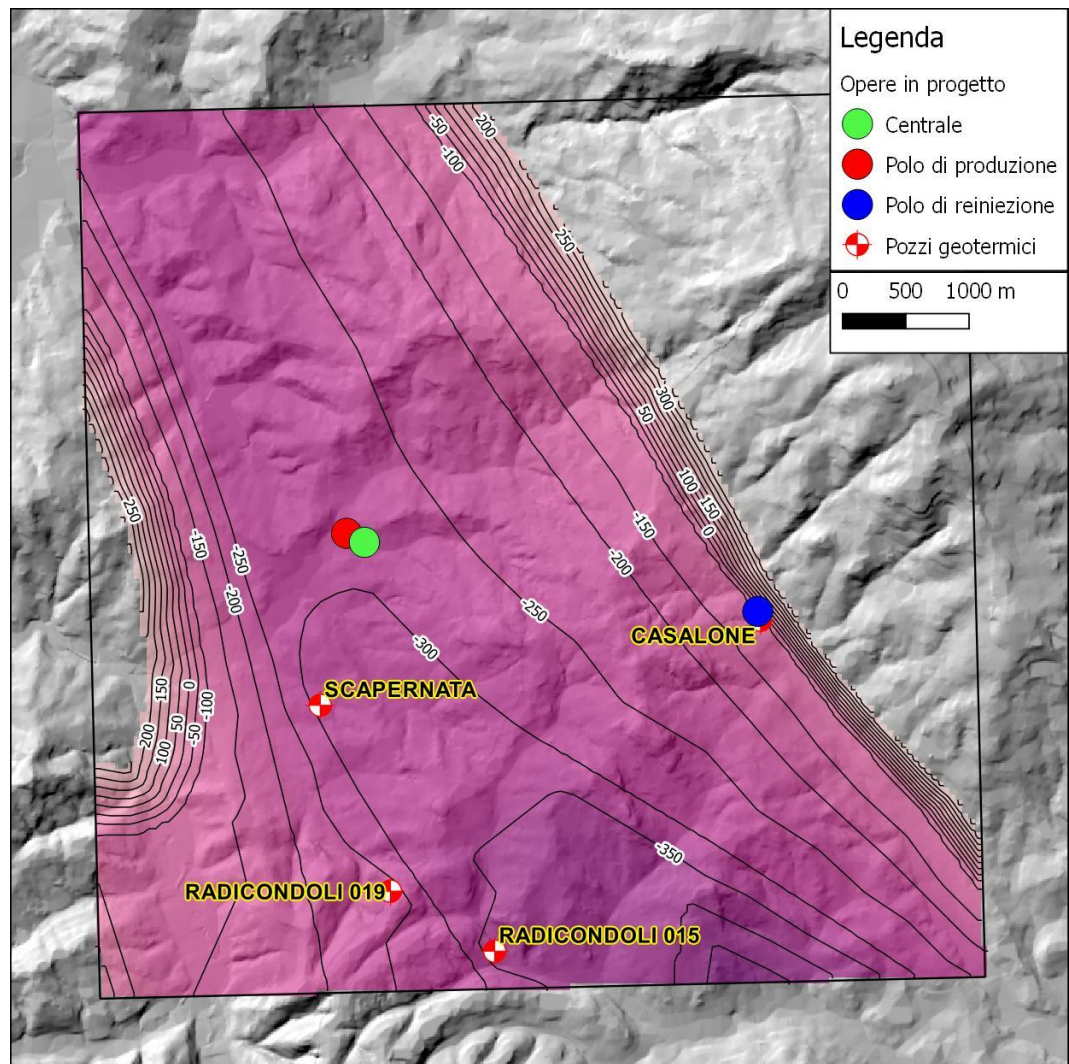
## 4.1

**SUPERFICI**

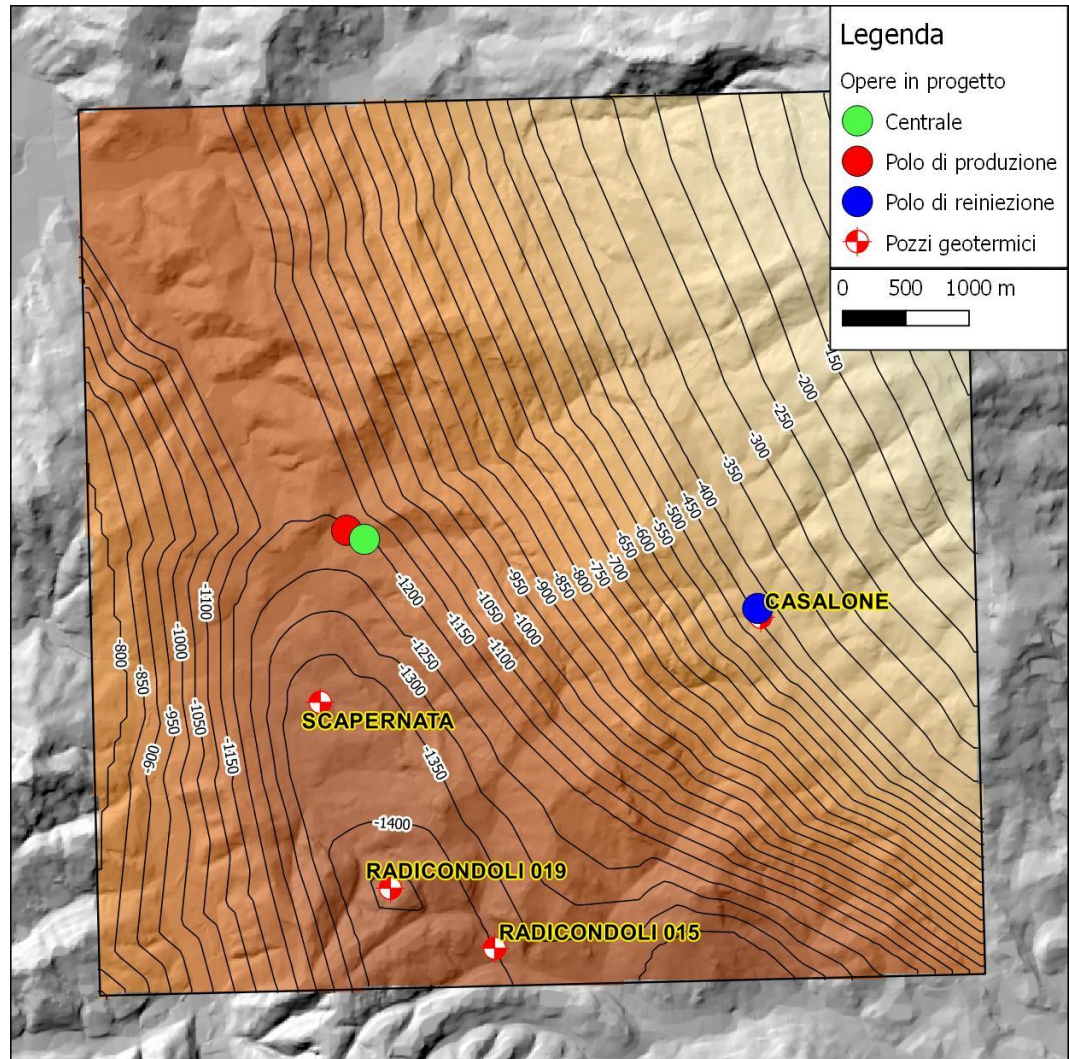
Sulla base dell'analisi integrata dei numerosi dati geologici, geofisici, stratigrafici e strutturali disponibili è stato possibile ricostruire l'andamento delle superfici che delimitano le unità di copertura (Figura 4.1a), il serbatoio geotermico (Figura 4.1b) e il basamento metamorfico (Figura 4.1c)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



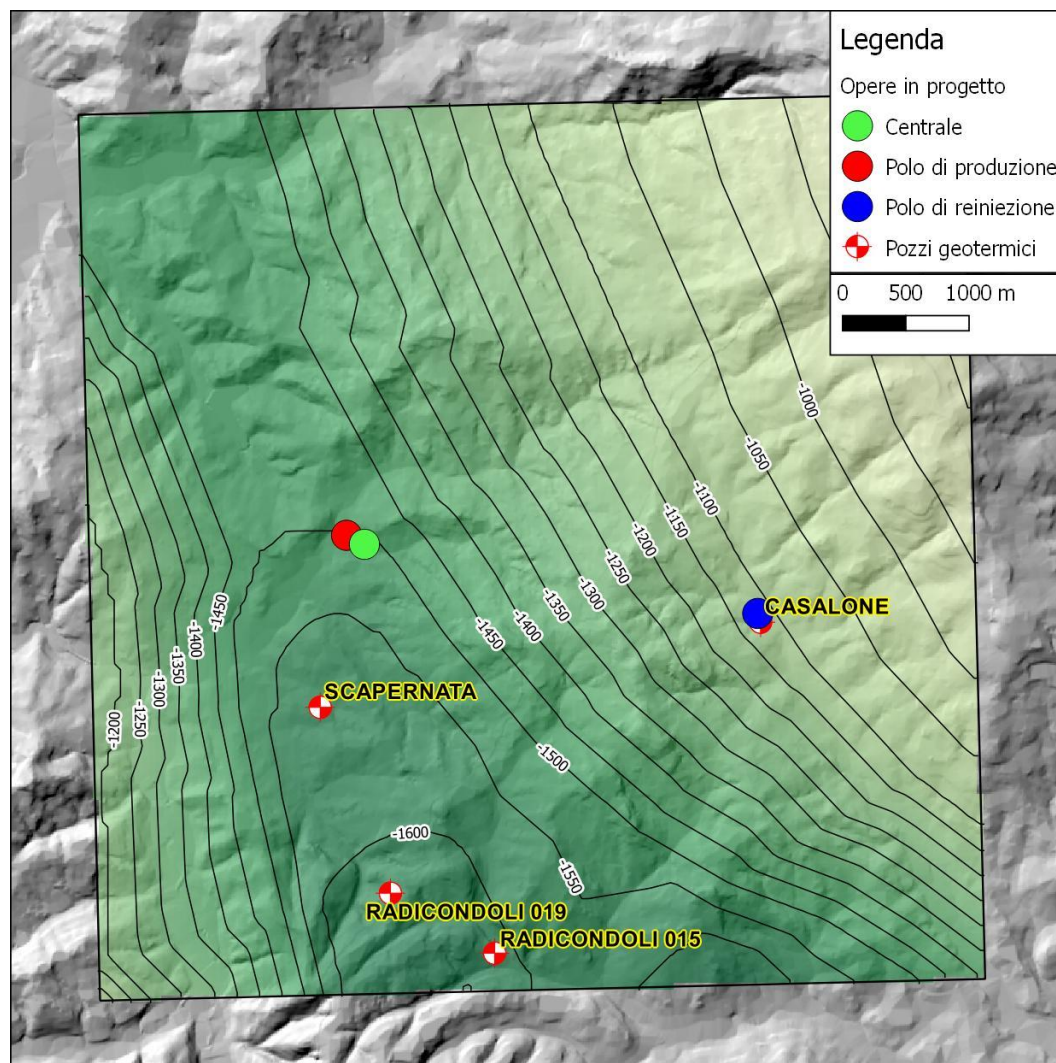
**Figura 4.1a** *Andamento della Base del Neogene (m slm).*



**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

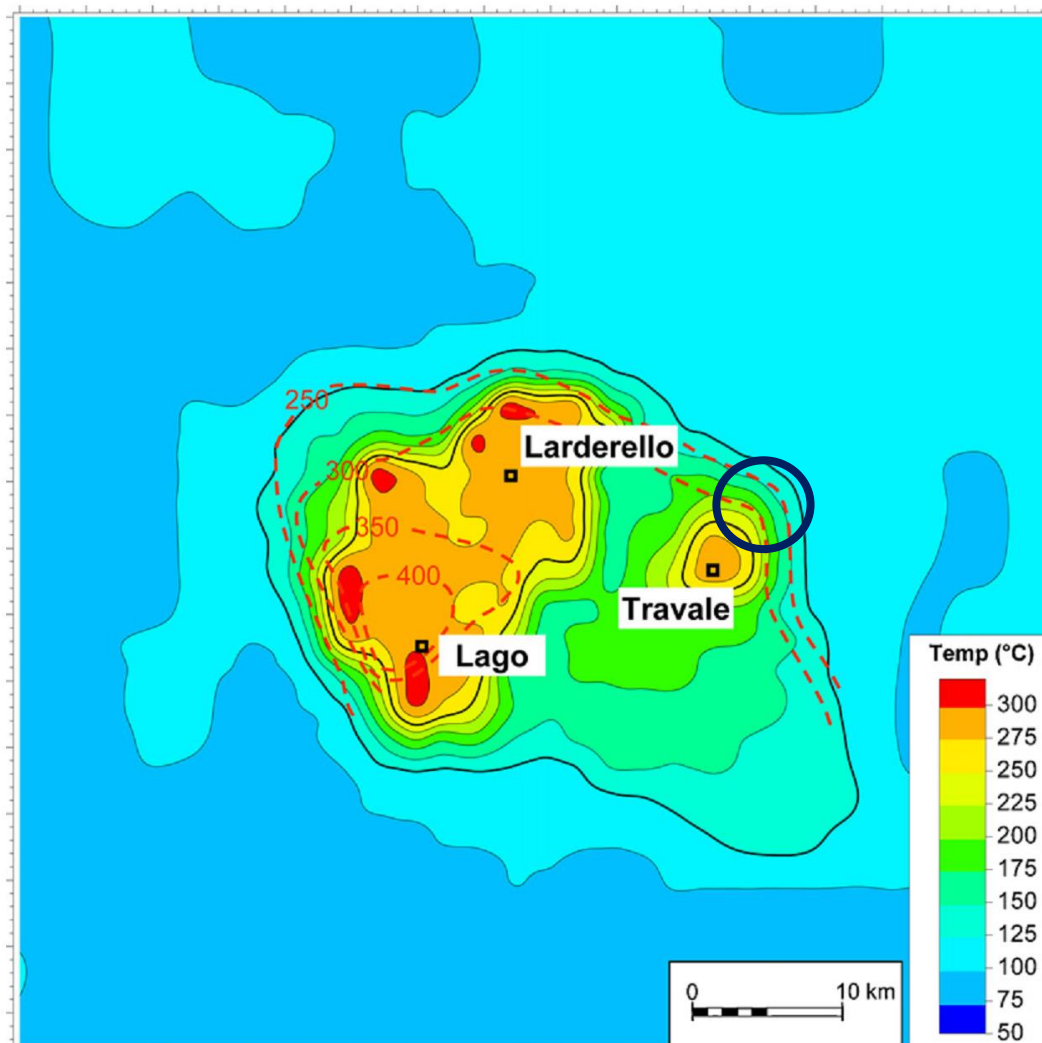
### MODELLO TERMICO

Per la ricostruzione del modello termico di sottosuolo è risultata di particolare interesse la documentazione di Romagnoli et alii (2010) nonché i dati estrapolabili dai pozzi Scapernata, Casalone, Radicondoli 15 e Radicondoli 19 oltre alle carte dell'andamento delle temperature nel sottosuolo presenti nell'Inventario delle Risorse Geotermiche Nazionali.

È stato quindi possibile ricostruire l'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) contiene carte, ricavate da modelli matematici, relative alla distribuzione della temperatura in profondità. Dalla mappa della distribuzione

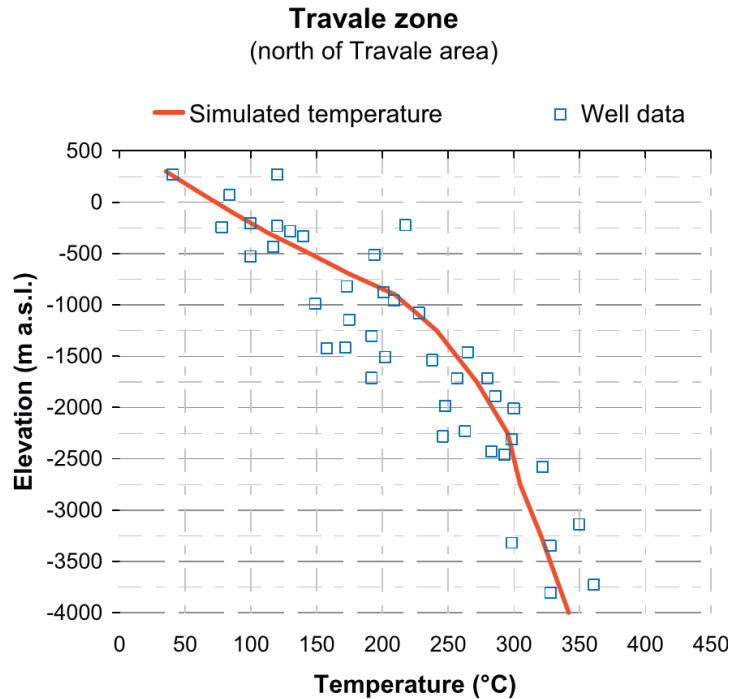
delle temperature risulta che a -3000 m s.l.m. si ha una temperatura per l'area di progetto di circa 250°C (Figura 4.1d).

**Figura 4.1d** *Andamento della distribuzione della temperatura nel sottosuolo. Linee tratteggiate: temperature osservate; linee continue: temperature simulate (Romagnoli et alii, 2010). In blu l'area di progetto.*



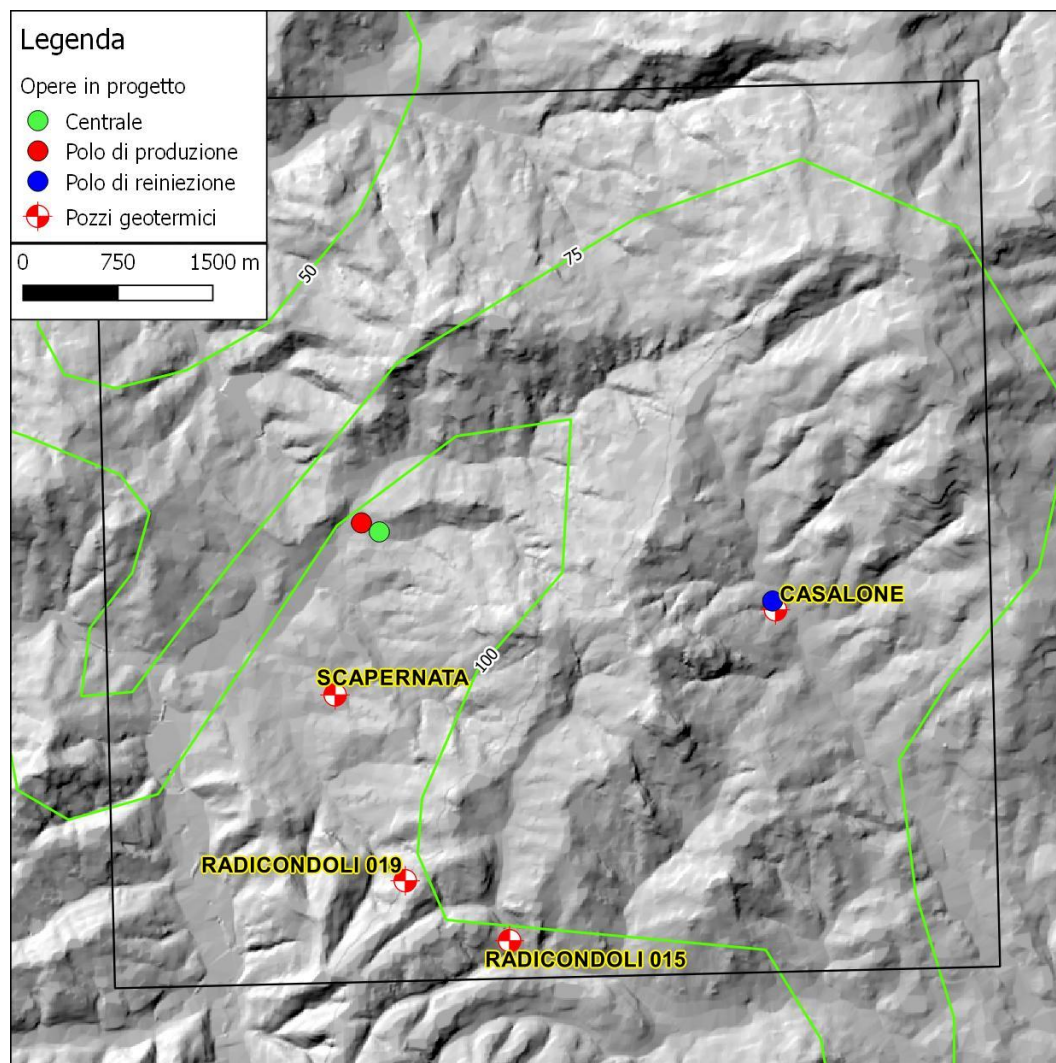
Sempre in Romagnoli et alii (2010) vengono presentati i dati delle temperature misurate in pozzo per l'area di Travale che permettono di stimare un gradiente geotermico superficiale di circa 130 °C/km mentre a partire da circa -1000 m s.l.m., all'interno del serbatoio geotermico, il gradiente si riduce a circa 30 °C/km fino a fondo pozzo.

**Figura 4.2b** Profili di temperatura per l'area di Travale (Romagnoli et alii, 2010).



Tali dati si riferiscono tuttavia al campo geotermico di Travale, il progetto Lucignano si trova al suo margine est, pertanto per questa area di può fare riferimento alla carta del gradiente geotermico di Baldi et alii (1994). Per l'area di progetto è stimato un gradiente di 75-100 °C/km (Figura 4.2c).

**Figura 4.2c**      **Mappa del gradiente geotermico (Baldi et alii, 1994).**



Utilizzando questi dati si prevede che al tetto del serbatoio geotermico siano presenti temperature di 100-160 °C mentre nel serbatoio geotermico si prevedono temperature di 250 °C (2600 m p.c.). Le stime delle temperature in profondità risultano essere coerenti con le temperature di circa 400 – 450 °C attribuite all'orizzonte K presente a circa 6.000 m di profondità dal p.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 Lucignano.*

da (m p.c.)	a (m p.c.)	Stratigrafia	Spessore medio (m)	T tetto (°C)	T base (°C)
0	1200-1600	Neogene+Unità Liguri	1200-1600	15	100-160
1200-1600	1600-2000	F. Anidriti di Burano	450-500	100-160	125-170
1600-2000	6000	Basamento metamorfico	4000-4350	125-170	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) e Romagnoli et alii (2010), *Enel (2009)*; *Bellani & Gherardi (2009 e 2013)*; *Magro et alii (2009)*. Per l'area del progetto Lucignano si è ritenuto corretto utilizzare i parametri di Tabella 4.3a.

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

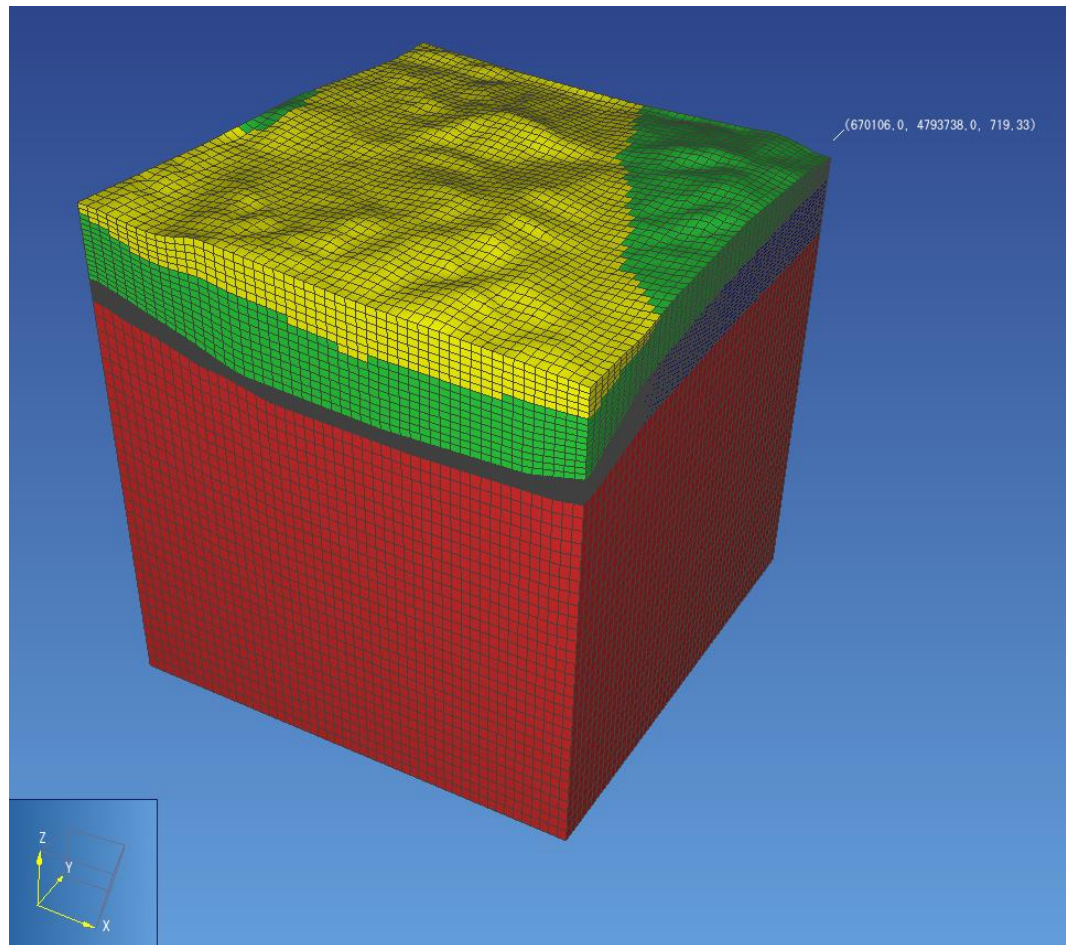
Unità	Permeabilità k	Porosità	Densità	Calore specifico
	m <sup>2</sup>	%	kg/m <sup>3</sup>	J/kg°C
Unità di copertura	5*E <sup>-17</sup>	10	2400	1000
Anidriti di Burano	5*E <sup>-15</sup>	2	2700	1000
Basamento metamorfico	1*E <sup>-15</sup>	1.5	2600	1000

### 4.4

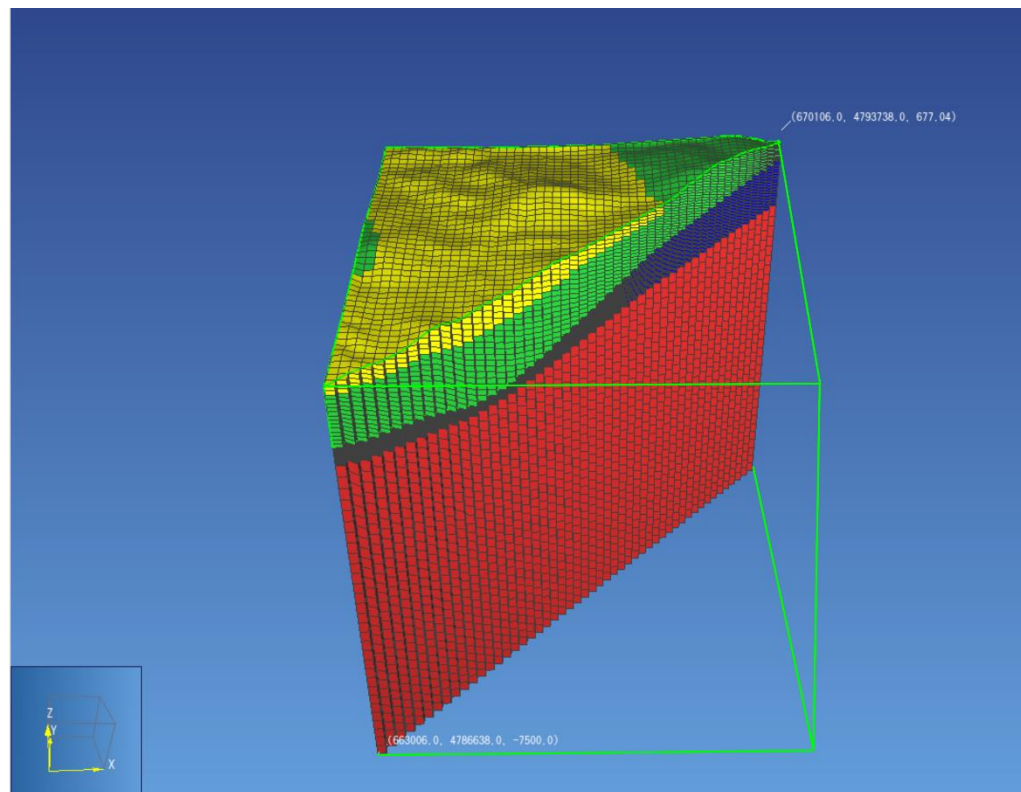
#### **MODELLO GEOLOGICO TRIDIMENSIONALE**

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, 4.4b*).

**Figura 4.4a** Vista delle superfici utilizzate per la realizzazione del Modello Geologico Tridimensionale. In Giallo = Neogene; Verde = Unità Liguri; Blu = Formazione di Burano; Rosso = Basamento Metamorfico.

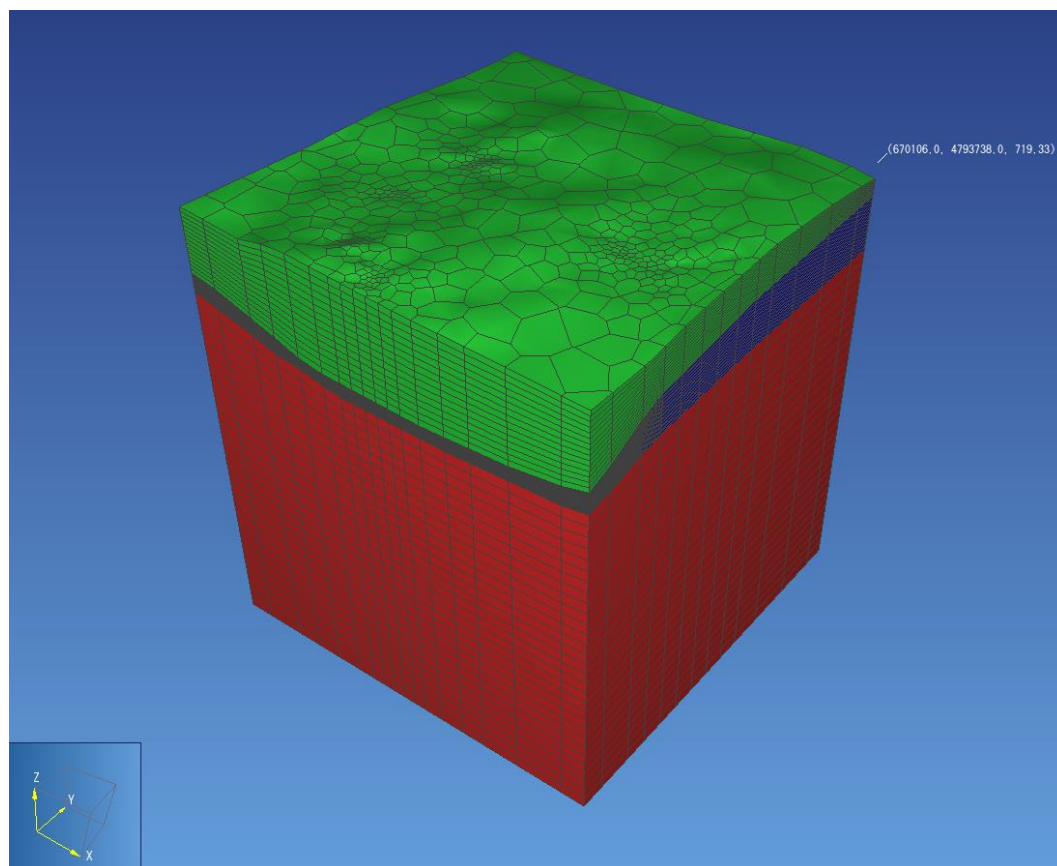




**Figura 4.4b** Sezione del modello geologico tridimensionale

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 4.4c).

**Figura 4.4c** Vista da Sud-Est vs Nord-Ovest del Modello Idrogeologico Tridimensionale. In Verde = Copertura; 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 33750 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.

Sulla base del modello geologico tridimensionale qui descritto 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 Lucignano.

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 multifase (gas e liquidi) di varie specie chimiche, all'interno di un mezzo poroso di volume noto 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 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  $g$  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 Lucignano è stato ricavato sulla base delle informazioni disponibili in letteratura, e dei pozzi prossimi all'area in esame, così come riportato nel Progetto Definitivo.

Da questi dati è stato dedotto il seguente quadro geologico-stratigrafico e termico, concordato con la committente:

- una copertura impermeabile del campo geotermico caratterizzata dai depositi neogenici e dalle formazioni appartenenti alle Unità Liguri a componente argillosa e argillitica, con spessori che variano da 1.200 a 1.600 m;
- un serbatoio caratterizzato nella parte più alta dalla formazione del Calcere Cavernoso-Anidriti di Burano ipotizzato dai dati geologici, geofisici e stratigrafici ad una profondità di circa 1.200 - 1.600 m p.c. con temperature previste di circa 100 - 160 °C al top del reservoir;
- tale serbatoio, senza soluzione di continuità e con simili caratteristiche, prosegue nel basamento sottostante, costituito da rocce metamorfiche (filladi, micascisti, gneiss e cornubianiti nella parte più bassa), il cui top ha una profondità variabile dai 1.600 – 2.000 m e si sviluppa verosimilmente fino a circa 6.000 m dal p.c. La parte più alta e più fratturata di questa formazione è quella in cui si verifica la circolazione di fluidi geotermali.
- all'interno del basamento metamorfico si localizza l'orizzonte K, alla cui profondità minima è stata prudenzialmente assegnata una temperatura di circa 350 °C.

I dati di sintesi relativi alla stratificazione geologica dell'area in oggetto sono riportati in *Tabella 5.1a*.

**Tabella 5.1a** *Assetto Termico-Stratigrafico*

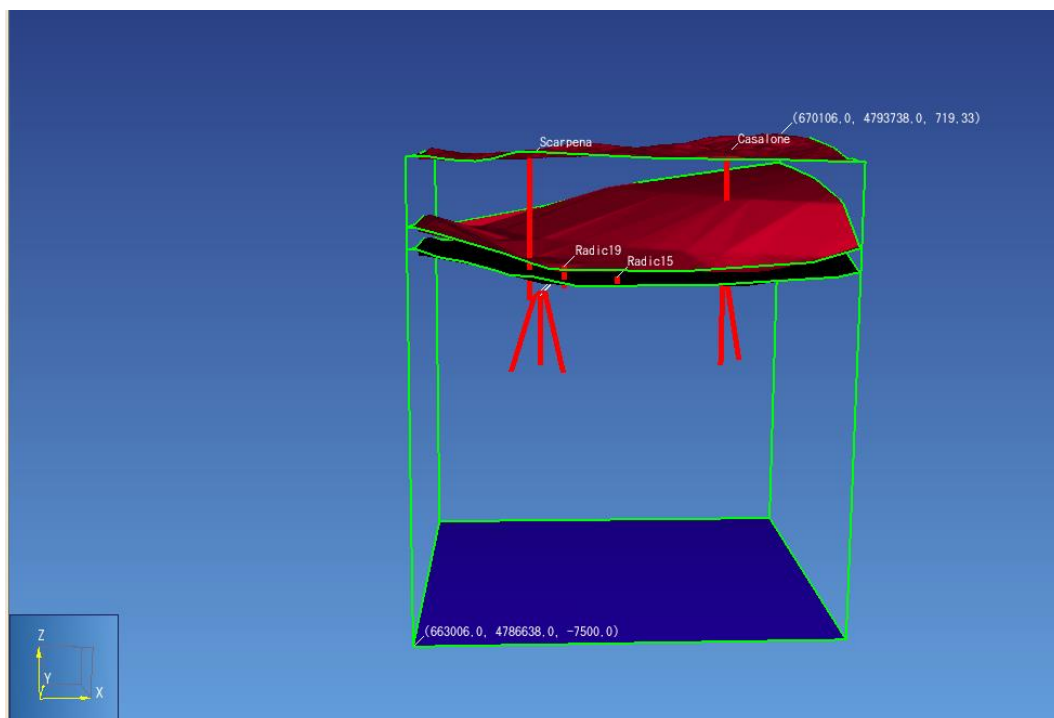
da (m p.c.)	a (m p.c.)	Stratigrafia	Spessore (m)	T tetto (°C)	T base (°C)
0	1200-1600	Neogene+Unità Liguri	1200-1600	15	100-160
1200-1600	1600-2000	F. Anidriti di Burano	450-500	100-160	125-170
1600-2000	6000	Basamento metamorfico	4000-4350	125-170	350
6000	9000	Orizzonte k		350	

Gli elementi geologici e geofisici oggi a disposizione testimoniano l'esistenza, nell'area di Lucignano, di un campo geotermico di interesse economico, caratterizzato da:

- un'anomalia termica elevata;
- presenza di formazioni di copertura con idonee caratteristiche di impermeabilità in grado di contenere efficacemente i sottostanti fluidi geotermici;
- presenza di un serbatoio geotermico le cui caratteristiche sembrano adeguate per la prevista coltivazione del campo e produzione di energia elettrica.

Ai fini della modellazione l'area è stata delimitata considerando un dominio con una superficie complessiva di 7 km \* 7 km e uno spessore di 9 km (questo ultimo valore espressamente suggerito dalle richieste di integrazione del MATTM). 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 e un basamento sottostante (*Figura 5.1a*).

**Figura 5.1a** *Modello tridimensionale di riferimento. Quote in m s.l.m.*



Come riportato nella descrizione geologico strutturale del sottosuolo dell'area del permesso Lucignano, i dati disponibili permettono una adeguata ricostruzione termico stratigrafica fino a poco oltre i 3.000 m; conseguentemente, i parametri termici ed idrodinamici attribuiti alle sottostanti rocce possono risultare meno attendibili.

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 della modellazione. 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 dedotti e rielaborati dai 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 modellato vengono caratterizzati da una permeabilità pari, rispettivamente (dall'alto verso il basso), a  $5 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$ ,  $5 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$  e  $1 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$  (*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 dei tre strati geologici è stata considerata pari rispettivamente a 2.400, 2.700 e  $2.600 \text{ kg/m}^3$ .

**Tabella 5.1b Parametri Idrodinamici**

Strato	Permeabilità k (m <sup>2</sup> )	Densità (kg/m <sup>3</sup> )	Porosità (%)
Copertura	$5 \cdot 10^{-17}$	2400	10
Anitriti	$5 \cdot 10^{-15}$	2700	2
Basamento	$1 \cdot 10^{-15}$	2600	1.5

Il calore specifico è stato considerato pari a  $1.000 \text{ Jkg}^{-1}\text{C}^{-1}$ .

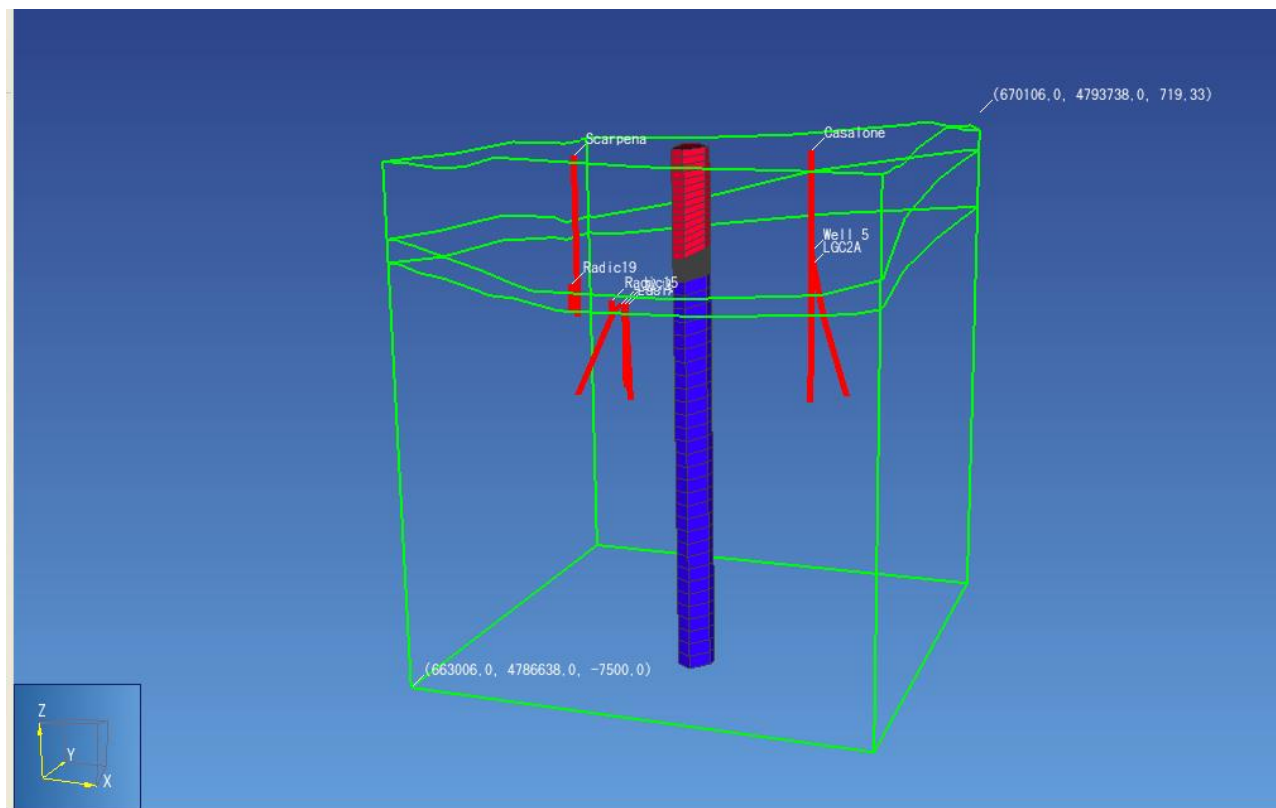
I dati puntuali di pressione disponibili sono solo quelli misurati nei pozzi di Scapernata e Casalone, ma questi possono non essere pienamente significativi, in quanto non sono note le condizioni di pozzo prima ed al momento della loro rilevazione.

Pertanto, sulla base delle simulazioni, illustrate in Romagnoli et alii (2010), relative al bordo della zona di Larderello - Travale, all'interno del quale ricade il domino modellato, sono stati considerati come condizioni al contorno i valori di pressione di 150 bar alla base del volume di riferimento e 1 bar alle celle del primo layer.

La simulazione terrà conto della traiettoria dei pozzi, così configurati: n° 3 pozzi di emungimento con profondità verticale massima di 3.800 m dal p.c.; n° 2 pozzi di reiniezione con le stesse caratteristiche.

La configurazione dei pozzi (verticali e direzionati) è riportata in *Figura 5.1b*.

**Figura 5.1b** Schema del modello con la colonna di permeabilità e indicazione dei pozzi di emungimento e reiniettivi. I valori di permeabilità della colonna di riferimento sono pari a:  $5 \cdot 10^{-17} \text{ m}^2$  (rosso),  $5 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$  (marrone) e  $1 \cdot 10^{-15} \text{ m}^2$  (blu).



## 5.2 RISULTATI DELLA MODELLAZIONE

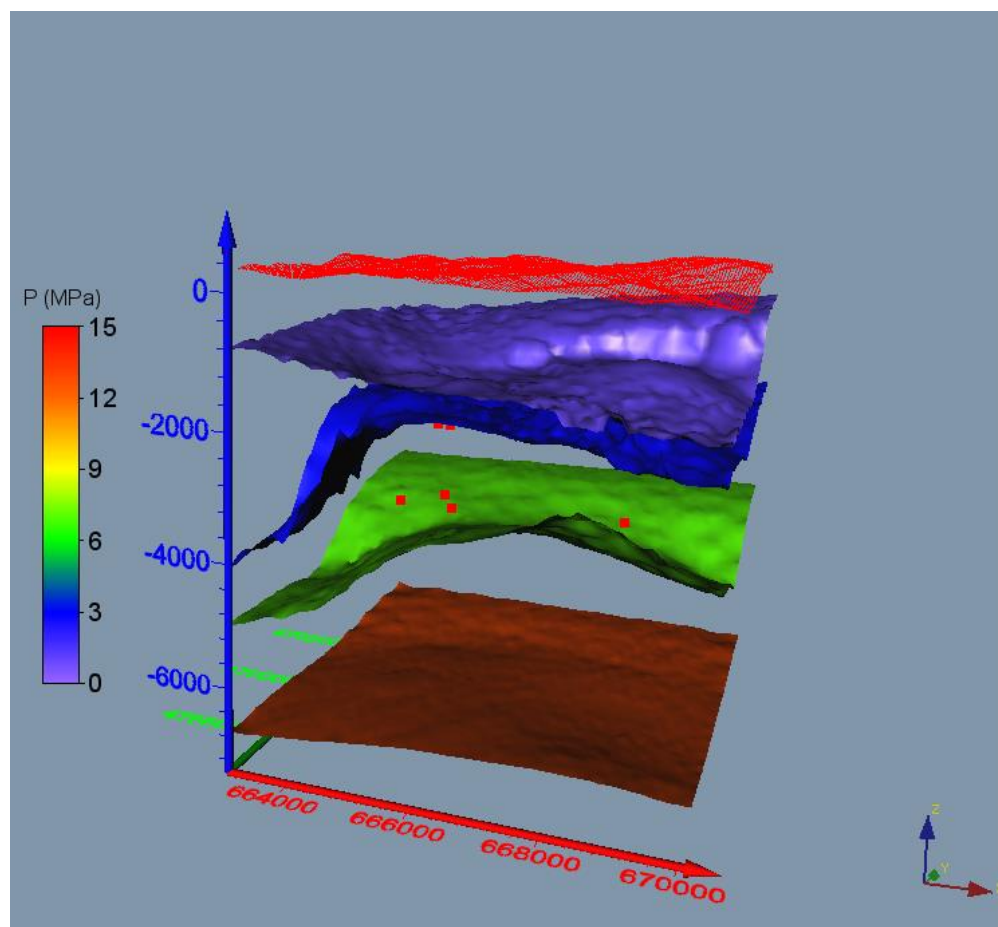
### 5.2.1 Stato Stazionario

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 "non perturbato" del sistema geotermico, 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 di pressione che caratterizzano lo stato stazionario, ottenute considerando i dati di input descritti nel precedente paragrafo, sono riportate in *Figura 5.2.1a*.

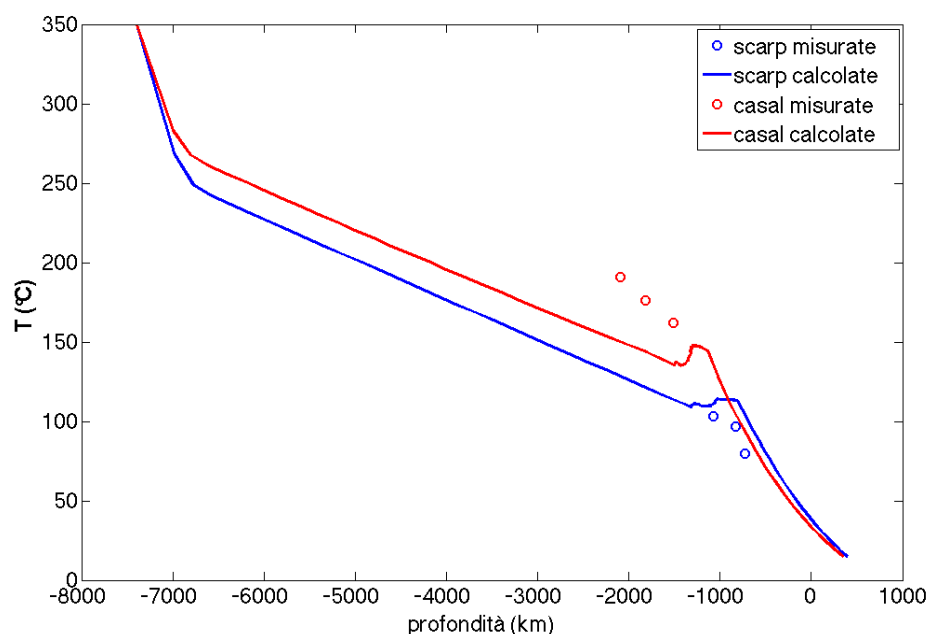
La distribuzione delle temperature, ottenute con la simulazione per lo stato stazionario, è in buon accordo con le temperature misurate nei pozzi esistenti denominati Casalone e Scapernata (*Figura 5.2.1b*).

**Figura 5.2.1a** *Isobare del modello di riferimento allo stato stazionario (in rosso le terminazioni delle traiettorie "open-hole" dei pozzi in progetto)*





**Figura 5.2.1b** Fitting tra temperature misurate e calcolate per i pozzi noti denominati Casalone e Scarpena, presenti all'interno del dominio modellato



## 5.2.2 Stato Transitorio e Pseudo-Stazionario

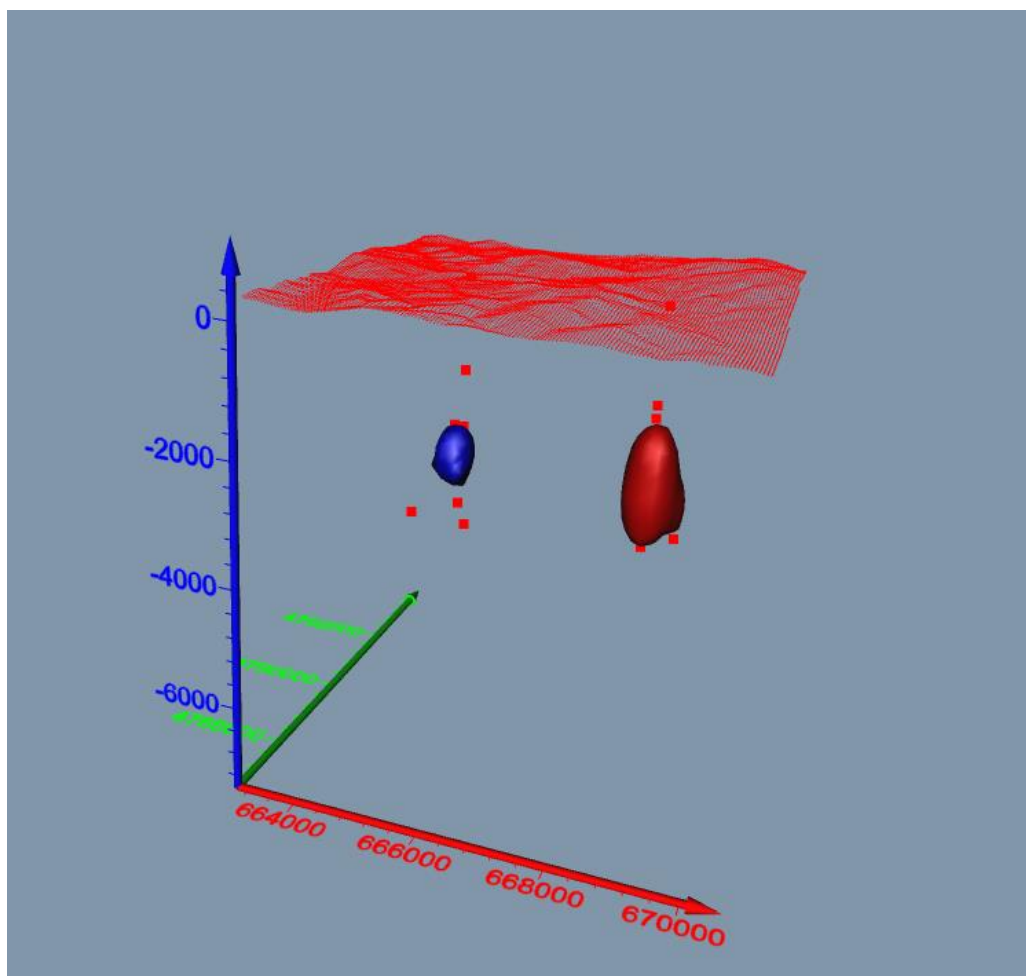
Partendo dalla soluzione stazionaria, sono stati introdotti nel modello i pozzi di produzione e re-iniezione previsti nel progetto, per valutare la sostenibilità di coltivazione del campo mediante produzione e re-iniezione totale del fluido. Ogni volta che un serbatoio subisce l'iniezione o l'estrazione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

Tale variazione 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 per ogni pozzo, come previste dal progetto, sono di 60 t/h (totale 180 t/h). Il totale del fluido prodotto è restituito in serbatoio circa alle stesse profondità in due pozzi di reiniezione.

Il tempo simulato per la definizione dello stato stazionario è di 100 milioni di anni, che rappresenta il tempo sufficiente e necessario affinché vengano ripristinate le condizioni pseudo stazionarie. Considerato il tempo di vita media dell'impianto, è stata eseguita la simulazione del processo di emungimento e reiniezione dei fluidi per 30 anni.

Gli effetti del ciclo simulato di iniezione/emungimento di fluidi nel sistema sono sintetizzati nelle figure successive. In particolare, in *Figura 5.2.2a* sono stati riportati gli effetti della coltivazione del serbatoio in termini di variazione di pressione. I quadratini in rosso nella figura indicano i punti di deviazione delle traiettorie dei pozzi di progetto.

**Figura 5.2.2a** Isosuperfici di  $\Delta P = \pm 1 \text{ bar}$ . Il volume in blu rappresenta la variazione negativa di pressione nella zona di emungimento, quello in rosso la variazione positiva di pressione nella zona di reiniezione (distanze sugli assi espresse in metri)



I valori di pressione di  $\pm 1 \text{ bar}$  rappresentano all'incirca le variazioni massime osservate dopo 30 anni di simulazione.

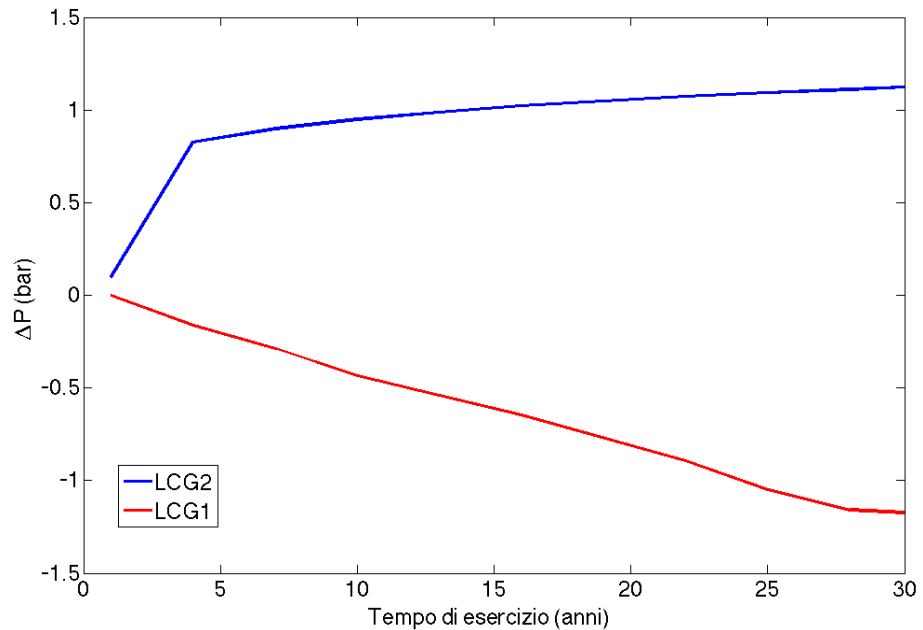
In particolare nelle celle intercettate dal tratto "open-hole" dei pozzi di emungimento si verifica una diminuzione di pressione di circa 1,5 bar con un *rate* di circa 0,5 bar ogni 10 anni. Invece per i pozzi di reiniezione l'incremento di pressione è pari a circa 1 bar. In quest'ultimo caso si raggiunge una condizione di stato quasi-stazionario dopo circa 4 anni di coltivazione (Figura 5.2.2b).

I volumi mostrati nella precedente figura sono limitati ed interessano le celle del modello prossime alle traiettorie dei pozzi in progetto.

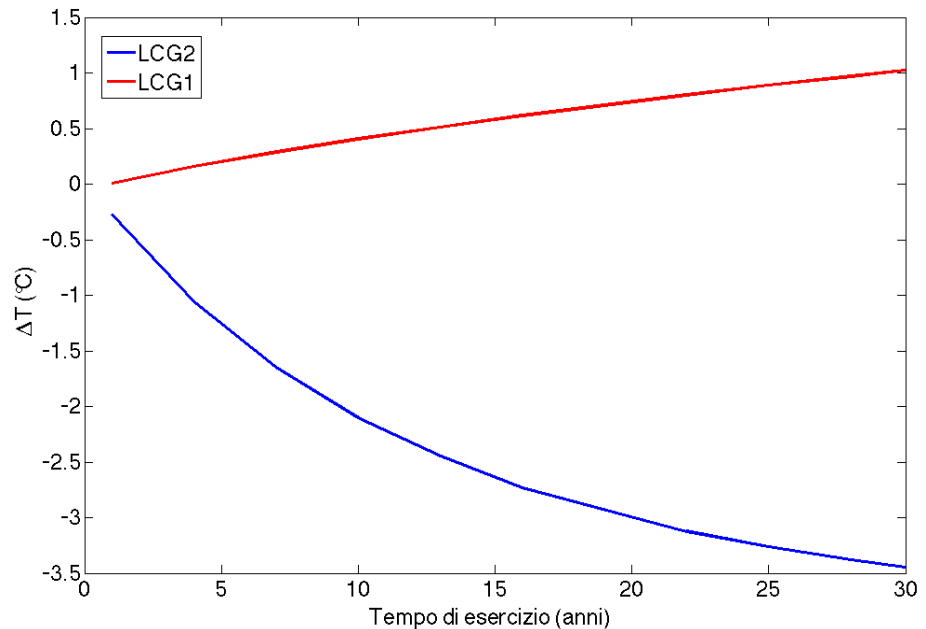
Per quanto riguarda le variazioni di temperatura, dopo 30 anni di simulazione, si ottiene una diminuzione massima di circa  $3,5^\circ\text{C}$  nelle celle direttamente interessate dalle traiettorie dei pozzi di reiniezione e un incremento di circa  $1^\circ\text{C}$  nelle celle intercettate dai pozzi di emungimento (Figura 5.2.2c).

Quest'ultimo dato, che sostanzialmente corrisponde a una situazione dello stato termico invariata, può essere determinato dal richiamo di fluidi a temperatura più elevata dalla parte profonda del serbatoio.

**Figura 5.2.2b** *Andamento nel tempo della pressione alla base dei pozzi di emungimento (in rosso) e di reiniezione (in blu)*



**Figura 5.2.2c** *Andamento nel tempo della temperatura alla base dei pozzi di emungimento (in rosso) e di reiniezione (in blu)*

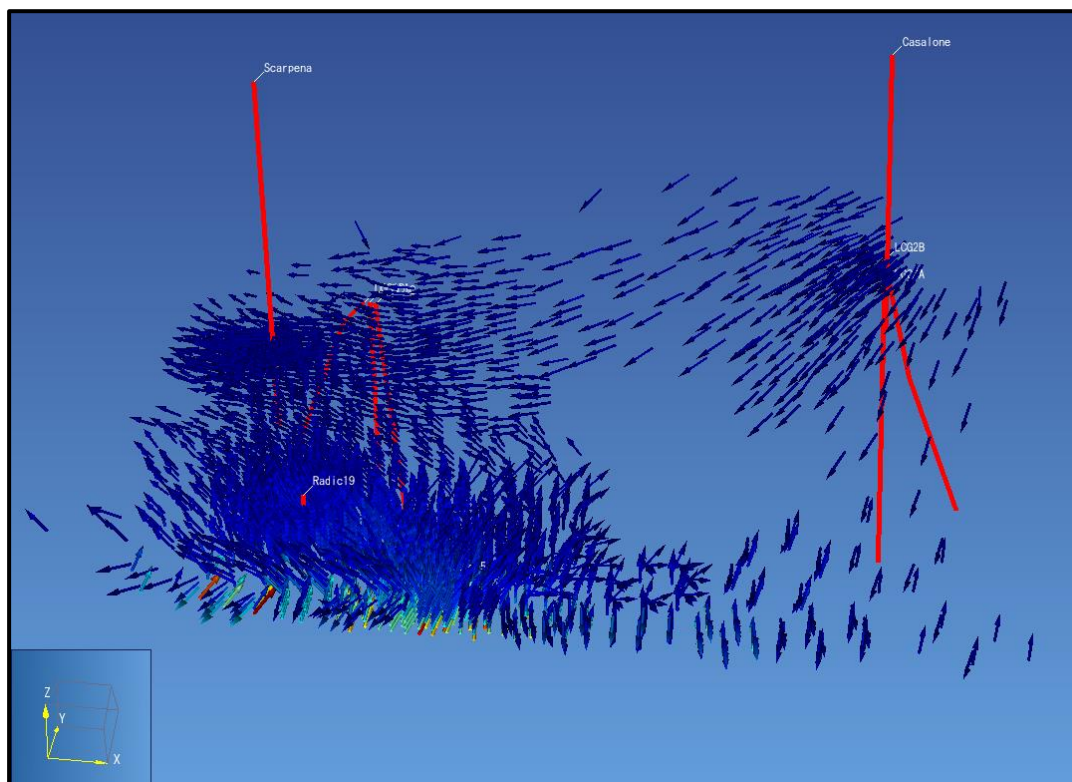


In *Figura 5.2.2d* viene riportato l'andamento delle linee di flusso (vettori) all'interno del volume di calcolo considerato: i vettori si allontanano dai pozzi di reiniezione e convergono verso il tratto "open-hole" dei pozzi produttivi.

A scopo esplicativo è stato considerato l'andamento delle linee di flusso, tra le zone di reiniezione e di produzione, ortogonali ad un piano verticale intermedio

tra le due zone. Il valor medio del flusso attraverso le celle di tale sezione, restituito dalla modellazione è di circa  $6 \cdot 10^{-6}$  kg/s  $m^2$ .

**Figura 5.2.2d** *Andamento Indicativo delle linee di Flusso all'interno del Serbatoio, restituite dalla modellazione, tra Polo Reiniettivo e Polo Produttivo.*



Tale flusso unitario, trasposto su una superficie di altezza di circa 2.000 m (intervallo di emungimento dei pozzi) ed una larghezza convenzionale pari a circa il doppio (4.000 m), determinerà una movimentazione totale di fluido pari a circa 90% del totale iniettato (circa 160 t/h, contro i 180 t/h di progetto).

Tale risultato, pur essendo schematico, appare indicativo della sostenibilità della produzione/reiniezione con modesti richiami di fluidi da zone del serbatoio modellato più esterne ai pozzi di progetto.

## CONCLUSIONI

Le simulazioni condotte sono state finalizzate a valutare le variazioni termodinamiche del serbatoio geotermico di Lucignano, a seguito dell'attività di emungimento di fluidi caldi e reiniezione totale del fluido, con portate di 60 t/h per ogni pozzo di emungimento, per una portata totale di 180 t/h.

Le simulazioni sono 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 dai pozzi di re-iniezione la coltivazione induce un regime transitorio, della durata di circa 4 anni, seguito da una condizione quasi-stazionaria (*Figura 5.2.2b*). Tale andamento non si presenta per la zona di emungimento, dove si registra un decremento graduale. In entrambi i casi si raggiungono comunque variazioni massime di pressione di +/- 1-1,5 bar. Il differente andamento delle pressioni è molto probabilmente legato alla configurazione delle traiettorie dei pozzi e in particolare alla presenza di 2 pozzi di reiniezione a fronte di 3 pozzi di produzione;
- l'aumento massimo di pressione, registrato in corrispondenza di ogni pozzo (nell'intorno dell'intervallo di re-iniezione) è pari a circa 1 bar e interessa solo un ridotto volume (circa  $1 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ ) che interessa le celle che intersecano le traiettorie dei pozzi;
- un decremento di pressione ( $< -1,5 \text{ bar}$ ) si osserva nel dominio dei pozzi di emungimento, (alla base della zona di estrazione), in volumi ridotti (circa  $5 \cdot 10^8 \text{ m}^3$ );
- un decremento di pressione ( $< -1 \text{ bar}$ ) si osserva nel dominio dei pozzi di emungimento, (alla base della zona di estrazione), in volumi ridotti (circa  $7 \cdot 10^8 \text{ m}^3$ );
- il campo termico mostra variazioni di temperatura trascurabili sia nella zona dei pozzi di emungimento ( $DT = +1 \text{ }^\circ\text{C}$ ), che in quella dei pozzi di reiniezione ( $DT = -1.5 \text{ }^\circ\text{C}$ ).

In conclusione, le simulazioni effettuate restituiscono modeste variazioni di pressione e temperatura, come conseguenza della produzione e reiniezione del fluido per l'esercizio dell'impianto per una durata di almeno 30 anni.

## BIBLIOGRAFIA

Baldi P., Bellani S., Ceccarelli A., Fiordelisi A., Squarci P., Taffi L. (1994). *Correlazioni tra le anomalie termiche ed altri elementi geofisici e strutturali della Toscana Meridionale. Studi Geologici Camerti, Volume speciale 1994/1, pp. 139 – 149.*

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. e Nicolich R. (1984) - *The application of seismic reflection methods to geothermal exploration. Sem. On the utilization of geothermal energy for electric power and space heat. Florence (Italy), 14-17 May 1984.*

Batini, F. e Nicolich, R. (1985). *P and S reflection seismic profiling and well logging in the Travale geothermal field. Geothermics, Vol. 14 (5/6), pp. 731-747.*

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.

Bertini, G., Casini, M., Ciulli, B., Ciuffi S., and Fiordelisi, A. (2005): *Data revision and upgrading of the structural model of the Travale Geothermal Field*, Proceedings World Geothermal Congress, (2005)

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.

Broggi 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.

Broggi 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.

Broggi 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, 10 ff.

Broggi, A., and D. Liotta (2008), *Highly extended terrains, lateral segmentation of the substratum, and basin development: The middle-late Miocene Radicondoli Basin (inner northern Apennines, Italy)*, *Tectonics*, 27, TC5002.

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;*

*Finetti I.R. (2006). Basic regional crustal setting and superimposed local pluton-intrusion-related tectonics in Larderello-M. Amiata geothermal province, from integrated CROP seismic data. Boll. Soc. GEol. It., Vol. 125, pp. 117 – 146.*

*Fiordelisi, A., Moffat, J., Oglioni, F., Casini, M., Ciuffi, S., Romi, A. (2005): Revised processing and interpretation of reflection seismic data in the Travale geothermal area (Italy), Proceedings World Geothermal Congress, (2005).*

*Magro G., Bellani S. & Della Vedova B., 2009. The Deep Roots of the Larderello Geothermal Field (Italy) from Heat Flux and <sup>3</sup>He 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

P17\_RNW\_004

TITOLO

LUCIGNANO PILOT PROJECT SRL:

IMPIANTO PILOTA GEOTERMICO "LUCIGNANO"

MODELLAZIONE NUMERICA DEL SERBATOIO GEOTERMICO DEL PR "LUCIGNANO"

REV.

0

Pagina

33



*Romagnoli P., Arais A., Barelli A., Cei M., Casini M. (2010). An update numerical model of the Larderello-Travale geothermal system, Italy. Geothermics 39 (2010), pp. 292-313.*



PROGETTO

P17\_RNW\_004

TITOLO

LUCIGNANO PILOT PROJECT SRL:  
IMPIANTO PILOTA GEOTERMICO "LUCIGNANO"  
MODELLAZIONE NUMERICA DEL SERBATOIO GEOTERMICO DEL  
PR "LUCIGNANO"

REV.

0

Pagina

34