



**IMPIANTO PILOTA GEOTERMICO TORRE ALFINA (VT)**

**ALLEGATO 3**

**MODELLAZIONE NUMERICA DEL SISTEMA  
GEOTERMICO DI “TORRE ALFINA” – “CASTEL  
GIORGIO”**



# **Modellazione numerica del sistema geotermico di "Torre Alfina" - "Castel Giorgio"**

**Pisa 1 Ottobre 2014**

## Indice

<b>1. Introduzione.....</b>	<b>3</b>
<b>2. Modello del sistema geotermico di Torre Alfina .....</b>	<b>5</b>
<b>3. Griglia di simulazione .....</b>	<b>9</b>
<b>4. Risultati della simulazione numerica.....</b>	<b>10</b>
<i>4.1. Stato stazionario .....</i>	<i>10</i>
<i>4.2. Simulazioni degli effetti indotti dalla coltivazione del sistema     geotermico di Torre Alfina-Castel Giorgio .....</i>	<i>15</i>
<i>4.2.1. Simulazione.....</i>	<i>17</i>
<b>5. Conclusioni .....</b>	<b>27</b>
<b>6. Bibliografia.....</b>	<b>29</b>

## 1. Introduzione

La modellistica numerica gioca un ruolo centrale nella valutazione e definizione delle politiche ottimali di sfruttamento e di protezione di molte risorse energetiche e naturali, e rappresenta uno strumento imprescindibile di valutazione critica e simulazione a supporto dell'analisi e della progettazione degli interventi di protezione ambientale. La modellistica numerica applicata alla simulazione di sistemi geotermici è ormai una tecnica matura, applicata in moltissimi campi in tutto il mondo, ed è una prassi consolidata per la pianificazione e lo sviluppo della gestione dei campi stessi. La modellistica numerica associa alla comprensione dei processi naturali la capacità di astrarne, mediante un modello, una rappresentazione quantitativa. La modellistica numerica di sistemi geotermici (sistemi intrinsecamente complessi) rappresenta quindi uno strumento molto potente ed impiegato ormai comunemente per: 1) la caratterizzazione della risorsa nell'ottica di una valutazione del potenziale geotermico; 2) elaborazione di diverse modalità di coltivazione della risorsa geotermica nell'ottica di ottimizzare le tecniche di gestione della risorsa; 3) elaborazione delle corrette strategie di reiniezione dei fluidi.

La realizzazione di una simulazione numerica consta di varie fasi di lavoro, delle quali le prime rappresentano forse il momento più delicato e consistono nella raccolta dei dati utili alla descrizione del sistema e nell'elaborazione del modello concettuale dell'area oggetto di studio, cioè in una schematizzazione della realtà naturale che comprenda sia gli aspetti termo-fisici sia quelli chimici. Dopo aver creato il modello numerico, sulla base dei dati del modello concettuale di riferimento, è necessario stabilire le condizioni al contorno e le condizioni iniziali. Le condizioni al contorno riguardano l'assegnazione dei valori di quantità come temperatura e pressione ai bordi del modello, e l'assegnazione dei flussi di calore o di massa

(in entrata ed in uscita) attraverso le superficie esterne dei bordi del modello. Le condizioni iniziali descrivono invece lo stato iniziale in cui si trova il sistema in termini di temperatura e pressione. In generale, si prevede che il flusso di lavoro verrà scandito secondo le seguenti fasi:

1. discretizzazione della geometria del modello
2. definizione dei parametri di input e delle condizioni al contorno
3. simulazione
4. interpretazione e validazione dei risultati tramite confronto con i dati sperimentali presenti per l'area in esame
5. utilizzazione dei modelli validati in precedenza a scopo predittivo

Per le simulazioni numeriche svolte abbiamo utilizzato il codice di calcolo TOUGH2 (Pruess, 1991). Esso rappresenta un simulatore numerico molto potente, ed è attualmente il più utilizzato per la simulazione di sistemi geotermici, descrivendo il flusso accoppiato di calore e fluidi multifase attraverso materiali porosi. Questo codice di calcolo è estremamente valido per la descrizione delle proprietà dell'acqua e delle transizioni di fase, tenendo in considerazione la permeabilità relativa delle formazioni attraversate dal fluido e degli effetti della pressione di capillarità. TOUGH2 ha capacità di calcolo avanzate rispetto a fenomeni di trasporto multicomponente, multifase di fluidi naturali di diversa salinità in condizioni non isoterme. Si tratta di un codice implementato essenzialmente per lo studio dei sistemi geotermici, e dell'ingegneria di serbatoio, utilizzato con successo anche per la valutazione del rischio ambientale e della propagazione degli inquinanti, nonché per applicazioni di tipo idrogeologico, e rappresenta di fatto lo standard, impiegato da numerosi operatori geotermici e dai migliori istituti di ricerca, per applicazioni in questi settori. Tale programma, sviluppato dal Lawrence Livermore Laboratory Berkely, è un simulatore polifunzionale, per lo studio di flussi multicomponenti e multifase di fluidi non isotermi in mezzi porosi e fratturati. Le equazioni che governano gli

scambi di massa ed energia tra le celle, nonché le trasformazioni di fase del fluido, sono fondamentalmente il bilancio di massa ed energia e la legge di Darcy che regola il trasporto di fluido tra due celle contigue, come funzione della permeabilità, di parametri geometrici e della differenza di pressione. La modellazione è stata svolta utilizzando il modulo EOS1 che impiega equazioni di stato per acqua pura.

## **2. Modello del sistema geotermico di Torre Alfina**

La base dati per la simulazione numerica è stata predisposta utilizzando le informazioni minerarie e geofisiche esistenti nella letteratura scientifica, nelle banche dati geotermiche pubbliche e dati di permeabilità forniti direttamente da ITW-LKW Geotermia Italia spa (nel seguito ITW-LKW), l'operatore industriale che sviluppa il progetto pilota "Castel Giorgio".

Sono stati inoltre utilizzati i dati relativi ai pozzi geotermici, perforati nell'area per la calibrazione termofluidodinamica del modello, ed in particolare i pozzi "Alfina 1 bis", "Alfina 2", "Alfina 4", "Alfina 5", "Alfina 7", "Alfina 13", "Alfina 14", "Alfina 15" e "RA1" (Buonasorte et al., 1988, 1991). In particolare è stato individuato il best fitting tra le temperature misurate in pozzo e le temperature ottenute con lo stato stazionario del modello.

L'area oggetto della simulazione copre una superficie di 90 km<sup>2</sup> (è rappresentata sostanzialmente da un rettangolo di 9 x 10 km). L'area della simulazione è stata determinata tenendo conto dell'esigenza di includere al suo interno l'area oggetto di questo studio ed una superficie circostante, necessaria per limitare il più possibile gli effetti di bordo nell'area di interesse.

La realizzazione del modello concettuale (Fig. 1, 2, 3, 4) per questo tipo di simulazione, impone un certo grado di schematizzazione del modello geologico da trattare, introducendo delle informazioni quantitative sulla caratterizzazione idrogeologica delle formazioni. Sulla base di queste considerazioni è stato realizzato un modello geologico nel quale sono state

schematizzate 4 formazioni principali: 1) Neogene (bassa permeabilità 0.01 mD); 2) Liguridi (bassissima permeabilità 0.001 mD), queste due unità rappresentano la copertura del sistema geotermico di Torre Alfina; 3) serbatoio geotermico carbonatico (serie Toscana) suddiviso in tre zone a differente permeabilità: una porzione iniziale di spessore pari a circa 100m ad elevata permeabilità (100 mD); la parte principale del serbatoio carbonatico a permeabilità medio alta (10 mD); e la porzione più profonda a media permeabilità (2 mD); 4) Basamento (bassissima permeabilità 0.001 mD). La presenza di una porzione più permeabile piuttosto continua nella parte alta del serbatoio di Torre Alfina viene indicata dalla presenza di una cappa di gas continua che occupa la parte sommitale del serbatoio; questa evidenza è stata inoltre confermata dalle prove di produzione-reiniezione svolte sui pozzi Alfina 4 - Alfina 14.

Per la distribuzione nel sottosuolo di queste formazioni e la conseguente realizzazione del modello tridimensionale abbiamo utilizzato i dati geologici, geofisici e di sottosuolo dei pozzi indicati nelle banche dati ed in pubblicazioni nazionali ed internazionali. In particolare, la ricostruzione del tetto del serbatoio geotermico è stata realizzata ricostruendo attraverso un modellatore geologico 3D la superficie del tetto del serbatoio geotermico di Torre Alfina pubblicata da Buonasorte et al. (1988). In questa maniera si è potuto avere una ricostruzione tridimensionale fedele di tale superficie (Fig. 1, 2, 3, 4). Per ottenere una migliore fedeltà al caso reale è stata inoltre inserita anche la superficie topografica estrapolata dal modello digitale del terreno con risoluzione di 20m.

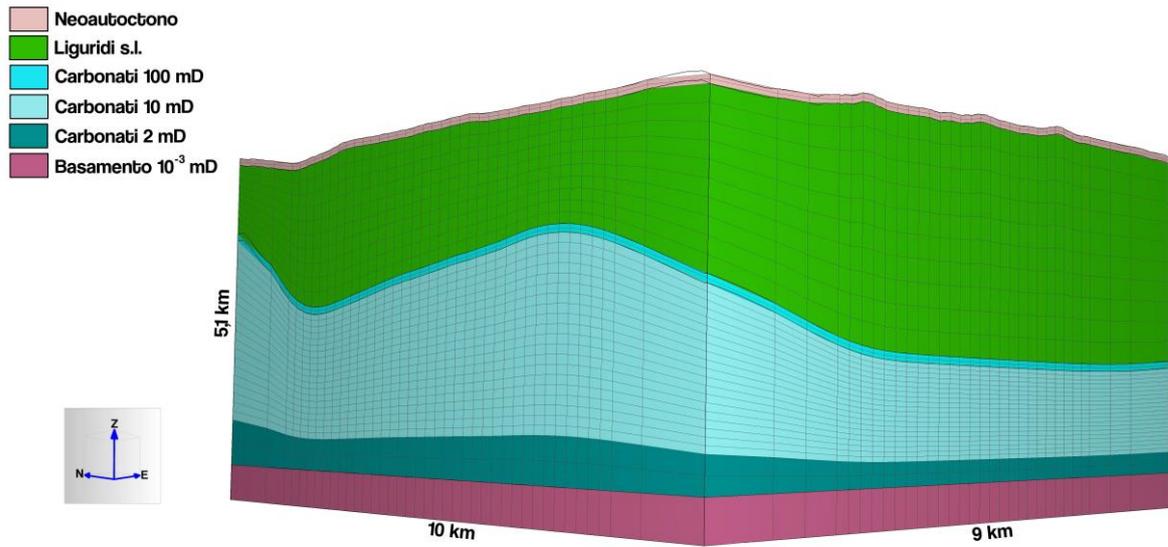


Fig. 1. Modello geologico tridimensionale di riferimento con la discretizzazione in celle

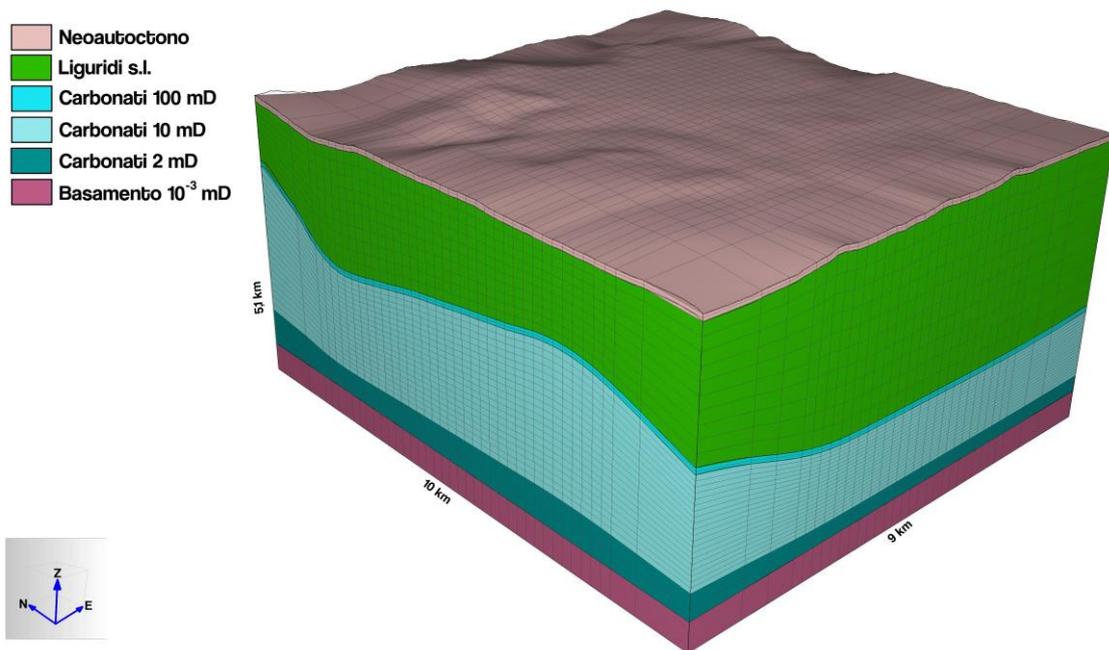


Fig. 2. Modello geologico tridimensionale di riferimento con la discretizzazione in celle

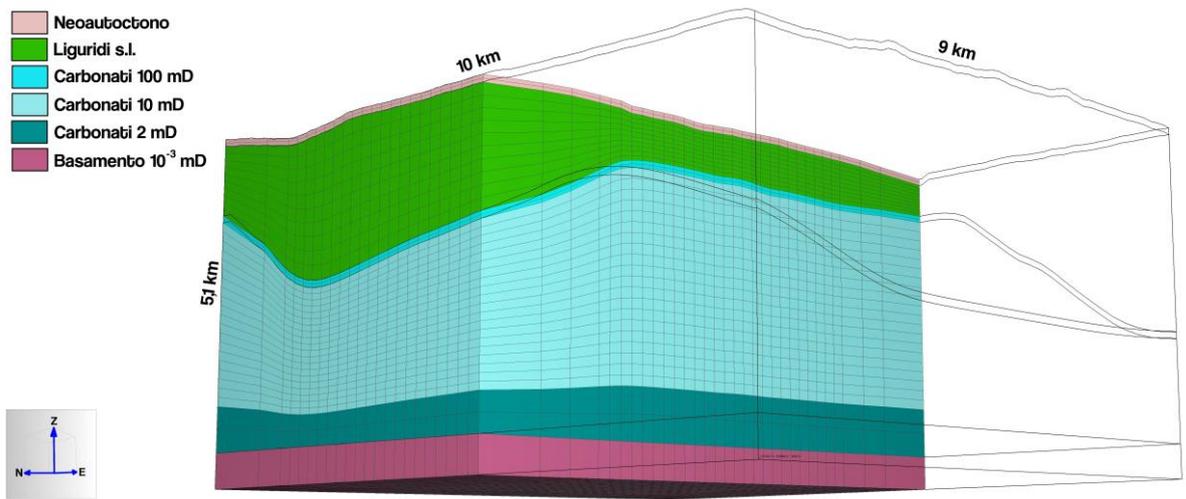


Fig. 3. Spaccato del modello geologico tridimensionale

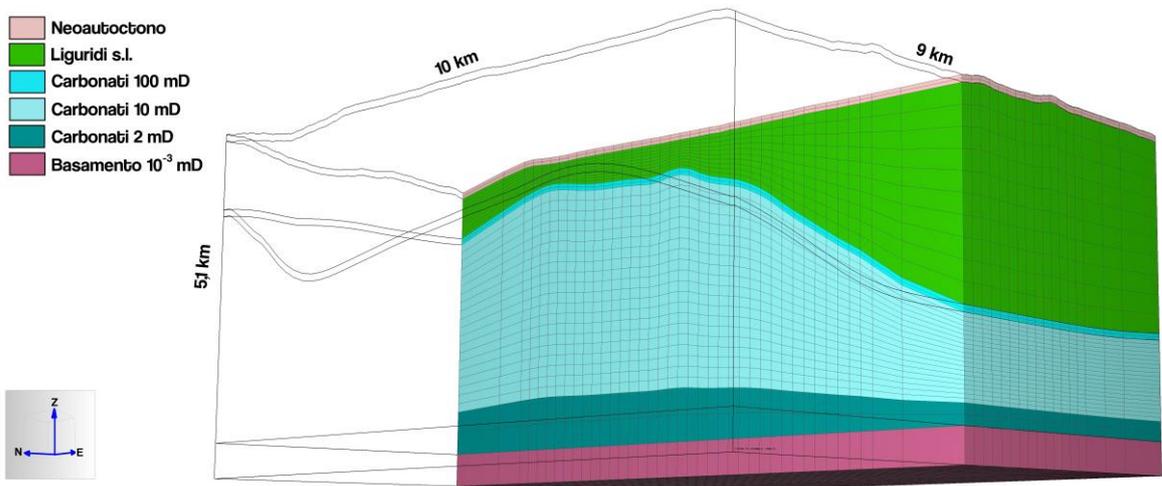


Fig. 4. Spaccato del modello geologico tridimensionale

### 3. Griglia di simulazione

La discretizzazione orizzontale della griglia di simulazione è stata così articolata:

- Direzione Ovest-Est (X) 31 celle, di cui, partendo da Ovest: la prima da 1000m, le due successive da 500m, poi 25 celle da 200 metri, altre 2 celle da 500m e l'ultima da 1000m (Fig. 2, 3, 4).
- Direzione Nord-Sud (Y) 39 celle, di cui, partendo da Sud: la prima da 1000m, la successiva da 500m, poi 35 celle da 200m, un'altra cella da 500m e l'ultima da 1000m (Fig. 2, 3, 4).

Ogni piano consta quindi di 1209 celle e sviluppa una superficie complessiva di 90 km<sup>2</sup>.

Lungo la direzione verticale (Z) sono stati utilizzati complessivamente 37 piani. Lo spessore utilizzato per ogni cella varia da circa 50m a 500m alla base del modello. Lo spessore verticale coperto dalla simulazione copre quindi un ampio intervallo compreso tra oltre +600m e -4500m sul livello del mare. Il modello così ottenuto possiede quindi un numero di celle considerevole (44773 celle) a testimonianza della complessità del problema trattato e dell'ottimo dettaglio spaziale che otteniamo con la simulazione. Per i parametri fisici e le condizioni al contorno sono stati utilizzati valori ricavati dalla letteratura e forniti direttamente dagli esperti di ITW-LKW l'operatore industriale. Nella modellazione abbiamo assunto che la temperatura e la pressione rimanessero invariate nel tempo. In particolare, abbiamo considerato una temperatura di 15°C e pressione atmosferica per lo strato più elevato di celle, ed una temperatura variabile (da Ovest ad Est) tra 210° e 180°C per lo strato di celle più basso.

## 4. Risultati della simulazione numerica

### 4.1. Stato stazionario

La prima parte della modellazione effettuata ha riguardato la ricostruzione dello stato naturale indisturbato del sistema mediante numerose simulazioni che riproducono tempi di evoluzione molto lunghi (dell'ordine di uno-due milioni di anni). I sistemi geotermici evolvono infatti su scala temporale geologica e raggiungono condizioni di quasi-equilibrio, nelle quali i cambiamenti naturali si possono considerare trascurabili rispetto alle variazioni delle condizioni indotte dalla coltivazione. La calibrazione del modello è stata realizzata raggiungendo il best-fit con i dati di temperatura misurati nei pozzi presenti nell'area (nel nostro caso i dati dei pozzi profondi "Alfina 1 bis", "Alfina 2", "Alfina 4", "Alfina 5", "Alfina 7", "Alfina 13", "Alfina 14", "Alfina 15" e "RA1" che furono perforati proprio nell'area oggetto dell'attuale progetto pilota). Imponendo un tempo di simulazione dell'ordine di 1.000.000 di anni (sono state realizzate simulazioni fino a 2.000.000 di anni ma, notando che queste raggiungevano lo stato stazionario in tempi minori, è stato considerato più che sufficiente un tempo di simulazione pari a 1.000.000 di anni), e variando i parametri modificabili del sistema (flussi termici, permeabilità delle diverse formazioni e loro distribuzione spaziale, ove possibile) si è ottenuto delle condizioni stazionarie stabili ed un accordo molto buono tra i valori di temperatura simulati e quelli misurati nei pozzi (Fig. 5, 6, 7). La differenza di temperatura tra i dati rilevati nei pozzi profondi, riportati in Buonasorte et al. (1988) e quelli ottenuti con la simulazione è inferiore ai 5°C.

I risultati delle simulazioni mostrano chiaramente la formazione di circolazione convettiva che interessa il serbatoio geotermico ubicato nelle formazioni carbonatiche della serie Toscana (Fig. 8).

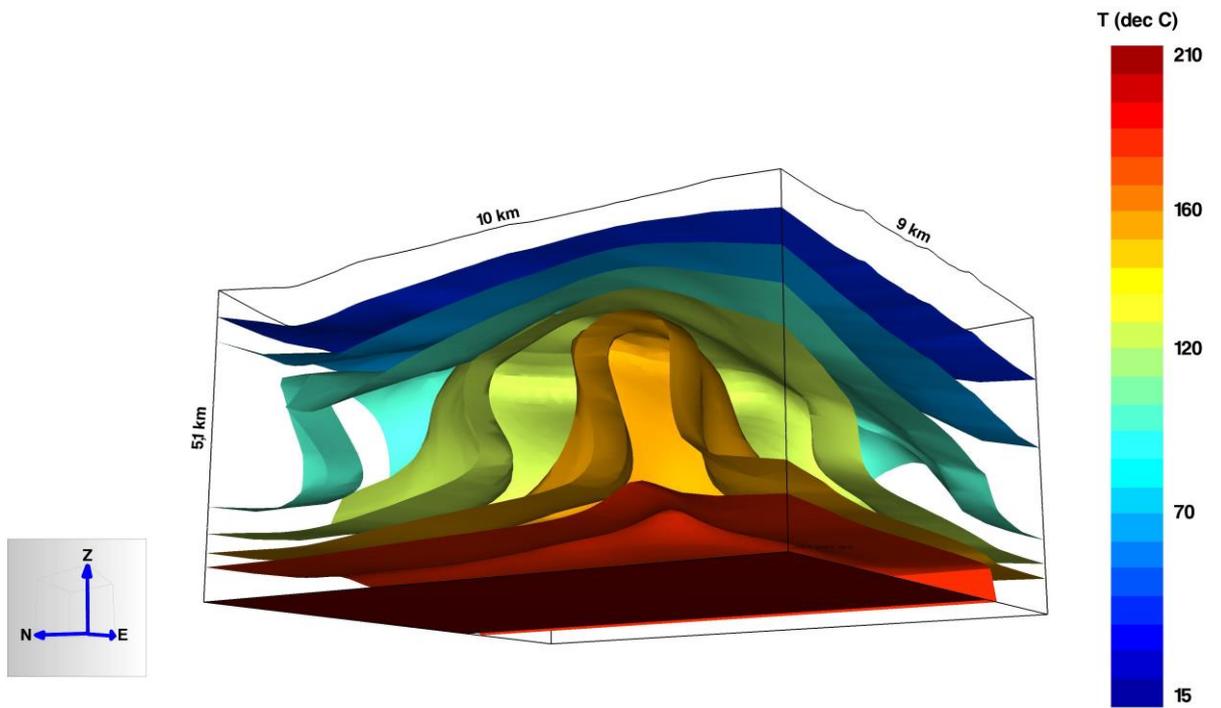


Fig. 5. Le superfici del modello rappresentano l'andamento delle isoterme allo stato stazionario (tempo simulato 1.000.000 anni)

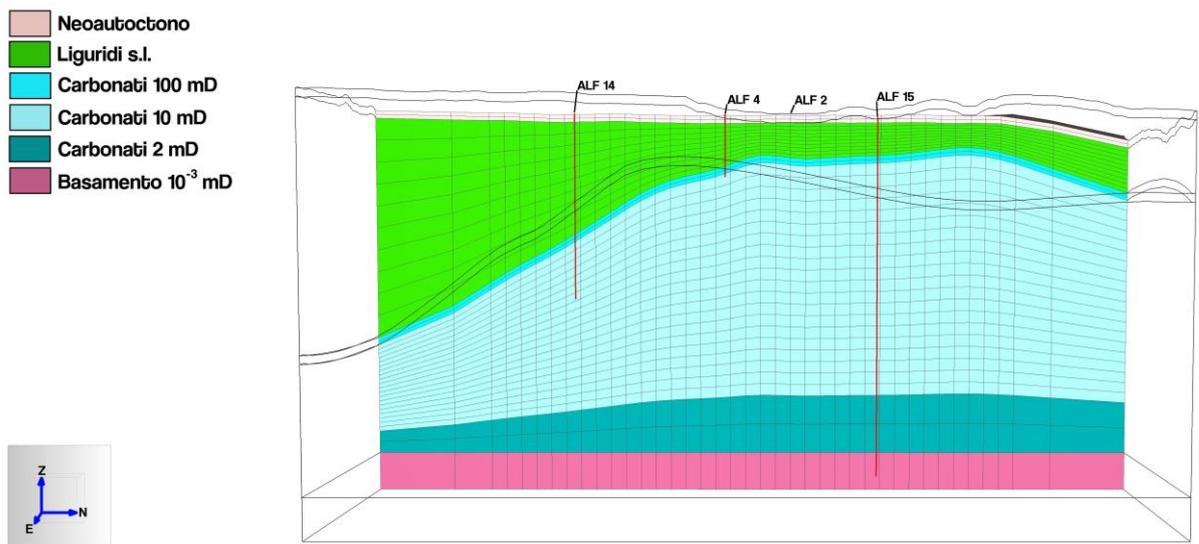
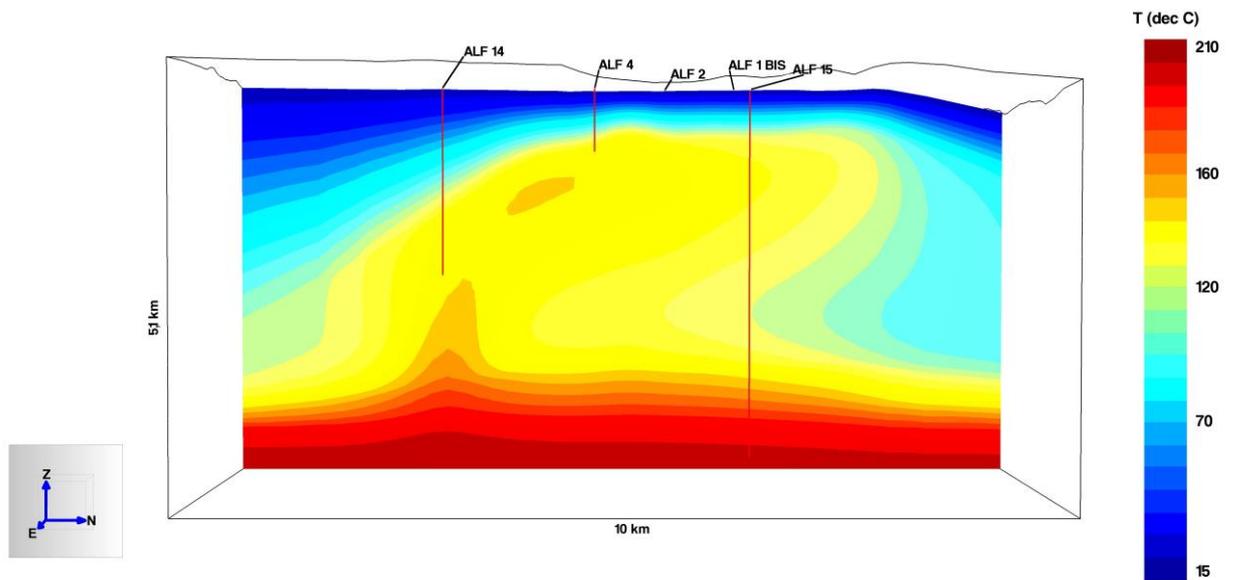


Fig. 6. Sezione Nord-Sud del modello stazionario (in alto), confrontata con la sezione geologica (in basso). Le superfici del modello rappresentano l'andamento delle isoterme allo stato stazionario (tempo simulato 1.000.000 anni).

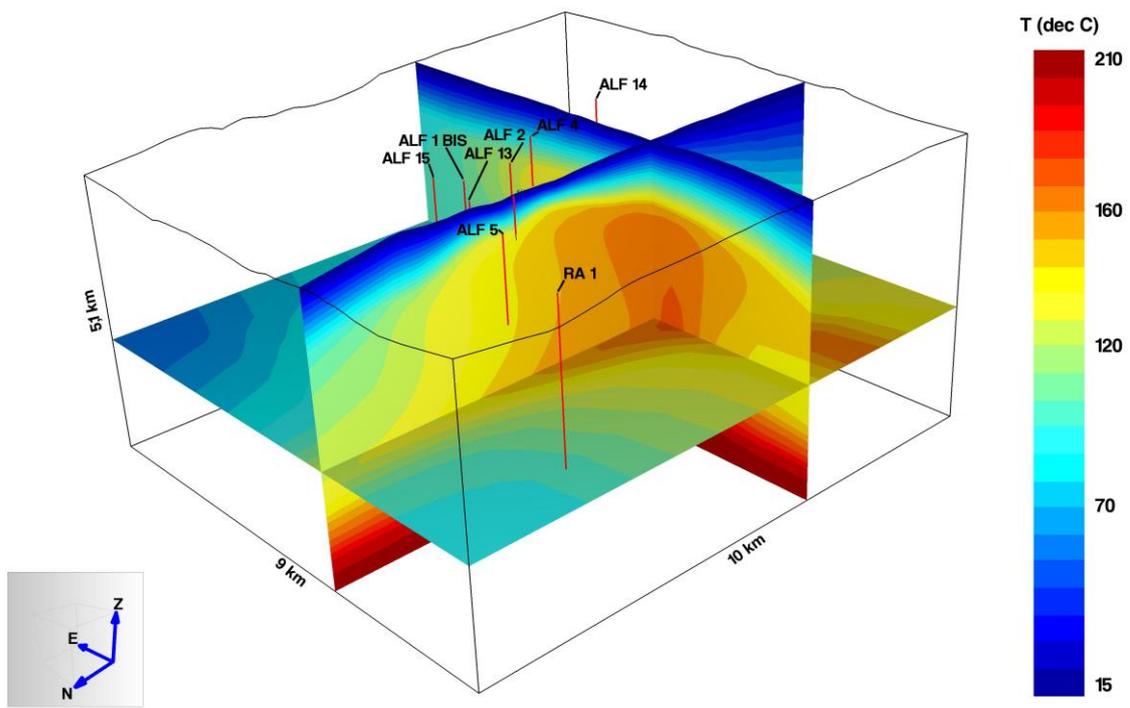
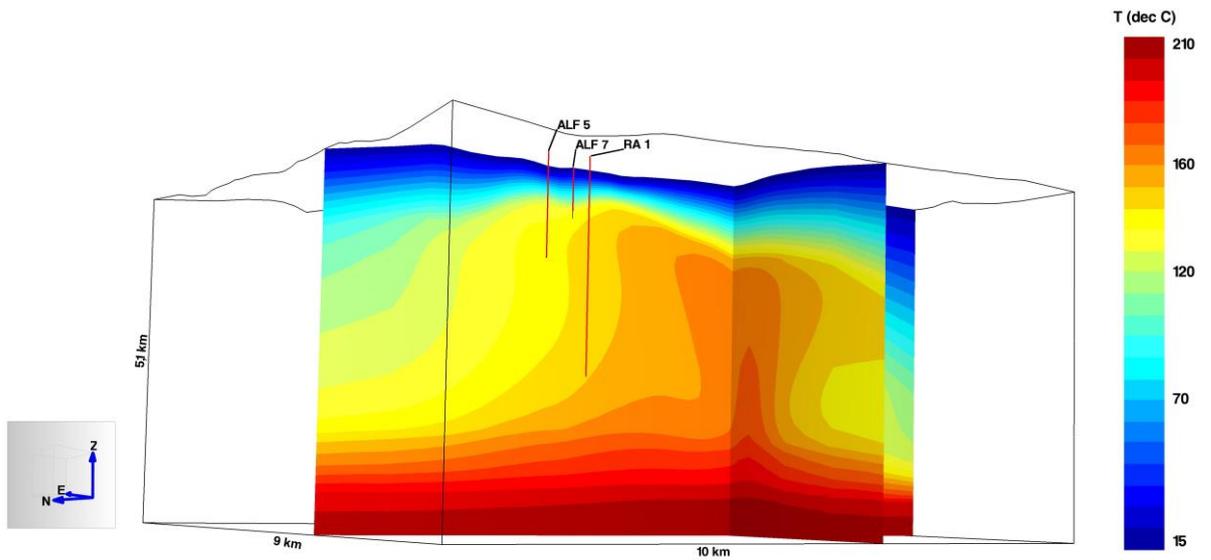


Fig. 7. Sezioni rappresentative dell'andamento delle isoterme nel sottosuolo (tempo simulato 1.000.000 anni)

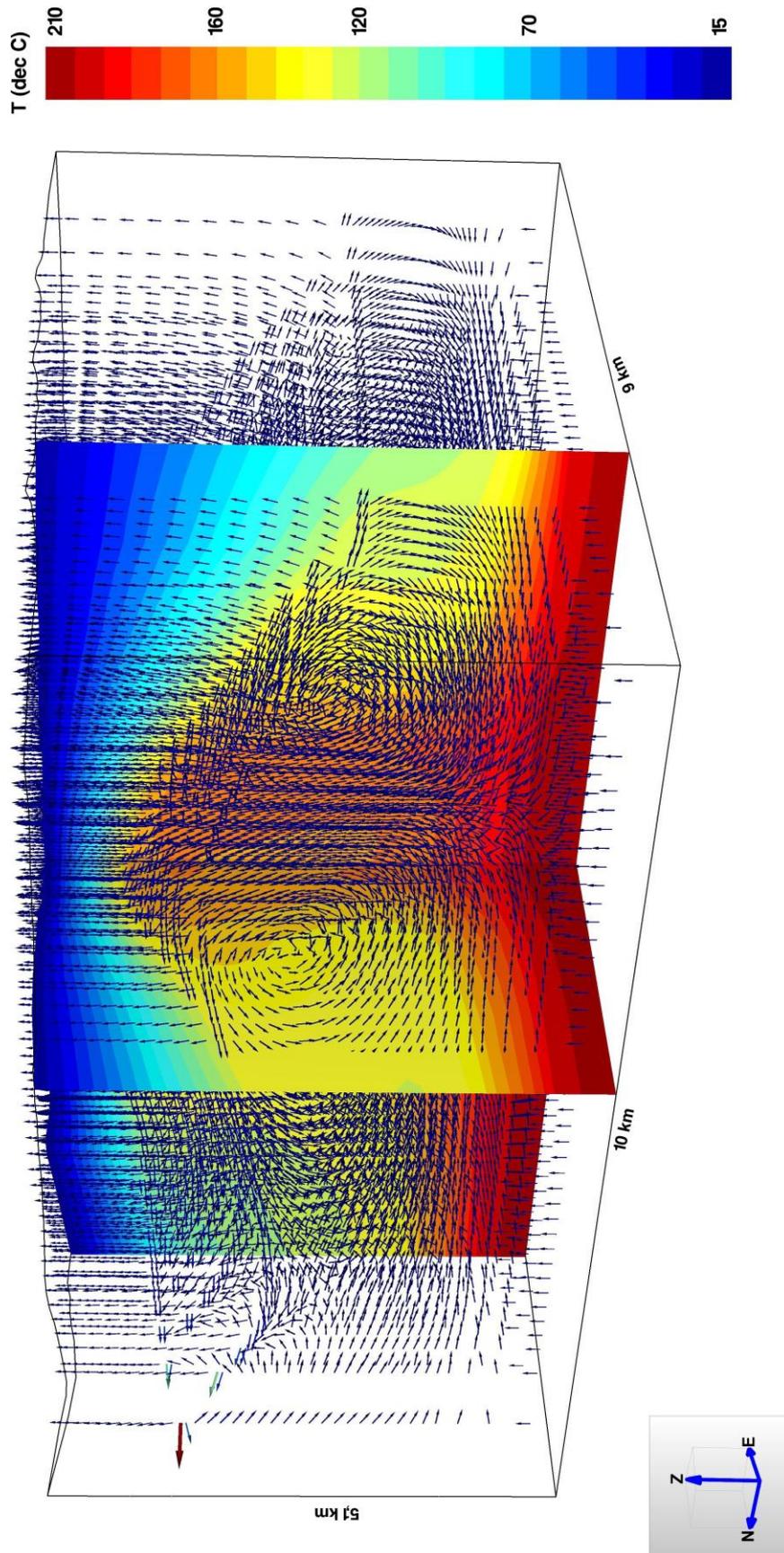


Fig. 8. Andamento dei vettori rappresentativi del flusso di fluido nel sottosuolo (tempo simulato 1.000.000 anni)

#### 4.2. Simulazioni degli effetti indotti dalla coltivazione del sistema geotermico di Torre Alfina-Castel Giorgio

Partendo dalla soluzione stazionaria precedentemente ottenuta, abbiamo poi introdotto nel modello i pozzi di produzione e reiniezione previsti nel progetto pilota (Fig. 9), per valutare la sostenibilità di coltivazione del campo mediante impianti geotermoelettrici a reiniezione totale del fluido.

E' stata considerato uno scenario di coltivazione del campo che prevede la coltivazione contemporanea della porzione settentrionale del campo (area di Torre Alfina) e di quella più a sud (area di Castel Giorgio, lo scenario 1 del precedente report, Ottobre 2013).

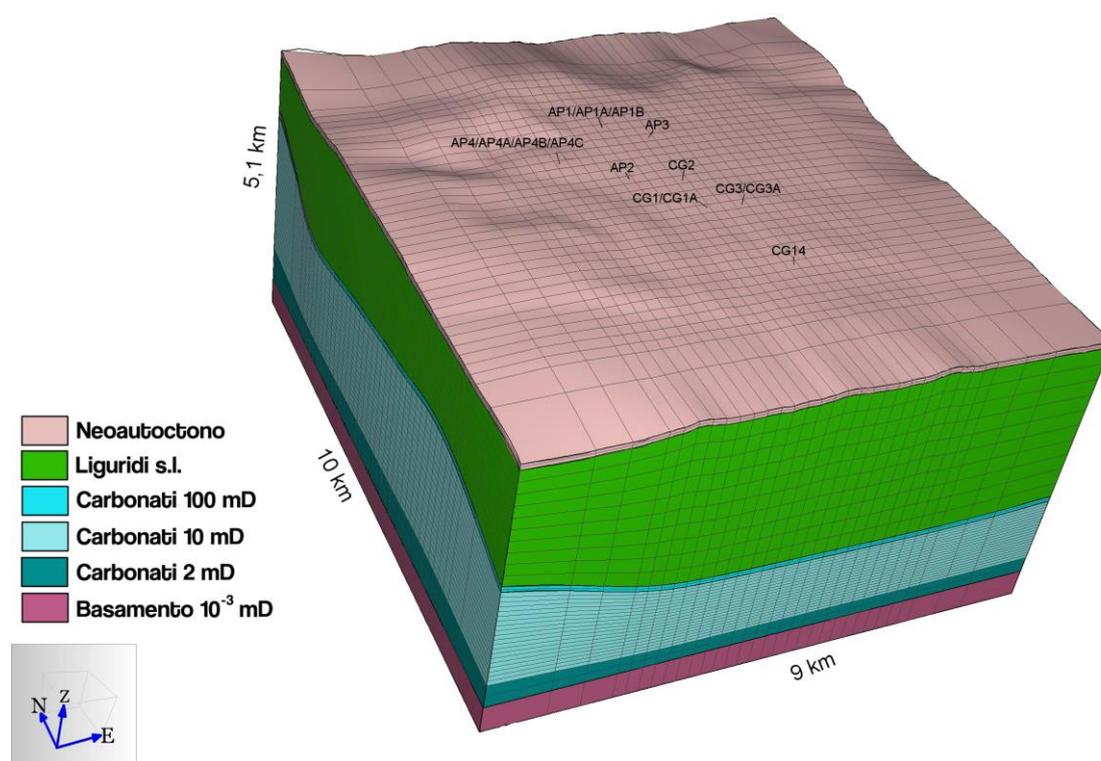


Fig. 9. Ubicazione dei pozzi produttori (CG1, CG1A, CG2, CG3, CG3A, AP1, AP1A, AP1B, AP2 e AP3) e dei pozzi reiniettori (polo reiniettivo CG14, AP4, AP4A, AP4B, AP4C)

Le portate di prelievo e reiniezione imposte ed i pozzi produttori e reiniettori interessati dalla simulazione realizzata, come previsti dal progetto, verranno specificati di seguito.

Il progetto prevede che per l'area di Torre Alfina i pozzi produttori AP1, AP1A e AP1B siano ubicati a partire da una medesima piazzola; il pozzo AP1 sarà verticale con una profondità di 1200m mentre i pozzi AP1A e AP1B saranno deviati verso Nord-Ovest e verso Sud-Ovest rispettivamente. Entrambi i pozzi avranno una profondità verticale di 1200m dal piano campagna ed uno scostamento dalla verticale a fondo foro di circa 300m. I pozzi saranno finestrati (a foro scoperto) per tutto il tratto di pozzo che attraversa il serbatoio. Il pozzo di prelievo AP3 sarà deviato verso Nord-Ovest ed avrà una profondità verticale di 1500m dal piano campagna ed uno scostamento dalla verticale a fondo foro di circa 400m. I pozzi saranno finestrati (a foro scoperto) per tutto il tratto di pozzo che attraversa il serbatoio. Il pozzo produttore AP2 sarà deviato verso Est-SudEst, avrà una profondità verticale di 1200m dal piano campagna ed uno scostamento dalla verticale a fondo foro di circa 300m. Il pozzo sarà finestrato (a foro scoperto) per tutto il tratto che attraversa il serbatoio. I pozzi reiniettori AP4, AP4A, AP4B e AP4C sono ubicati a partire da una medesima piazzola; il pozzo AP4 sarà verticale con una profondità di 1500m dal piano campagna, mentre i pozzi AP4A, AP4B ed AP4C saranno deviati verso Ovest, Nord Ovest e Sud Ovest rispettivamente ed avranno una profondità di 1500m dal piano campagna ed uno scostamento dalla verticale di circa 400m. I pozzi saranno finestrati (a foro scoperto) per tutto il tratto di pozzo che attraversa il serbatoio. Per l'area di Castel Giorgio i pozzi di prelievo CG1, CG2, CG3 sono verticali ed hanno una profondità di 1200m dal piano campagna, finestrati (a foro scoperto) per tutto il tratto di pozzo che attraversa il serbatoio. I pozzi CG1A e CG3A sono invece deviati verso Ovest (CG1A) e verso Nord-Est (CG3A) a partire dalla piazzola del pozzo CG1 e CG3 rispettivamente. La lunghezza totale dei pozzi è di 1330m (profondità verticale 1200m) con uno scostamento dalla verticale di circa 290m. Questi pozzi sono finestrati (a foro scoperto) per tutto il tratto di pozzo che attraversa il serbatoio. I pozzi di reiniezione CG14, CG14A, CG14B e CG14C sono ubicati a partire da una medesima piazzola. E' previsto un pozzo verticale (CG14) di

2300m di profondità dal piano campagna, finestrato (open-hole) nel serbatoio dalla quota di 1800m a quella di 2300m (fondo pozzo) dal piano campagna. Il pozzo CG14A sarà deviato verso Ovest, avrà una lunghezza totale di 2548m (profondità verticale 2300m dal piano campagna) ed uno scostamento dalla verticale a fondo pozzo di 950m. Il pozzo è finestrato (a foro scoperto) per tutto il tratto che attraversa il serbatoio. Il pozzo CG14B sarà deviato verso Sud-60°Ovest ed avrà lo stesso profilo di deviazione, profondità e finestratura del CG14A. Il pozzo CG14C sarà deviato verso Sud-30°Ovest ed avrà lo stesso profilo di deviazione, profondità e finestratura del CG14A.

La temperatura di reiniezione del fluido è stata sempre considerata pari a 70°C. Il codice di calcolo TOUGH2 richiede come dato di input l'entalpia del fluido e non la sua temperatura in °C, di conseguenza abbiamo utilizzato il valore di entalpia del fluido in fase liquida ad 70°C pari a 293000 J/kg. I tempi impiegati in queste simulazioni sono di 30 anni.

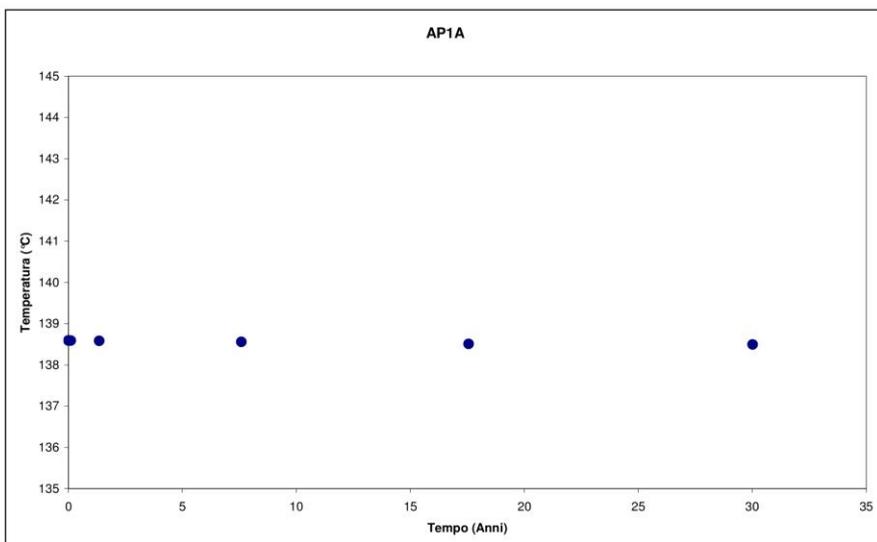
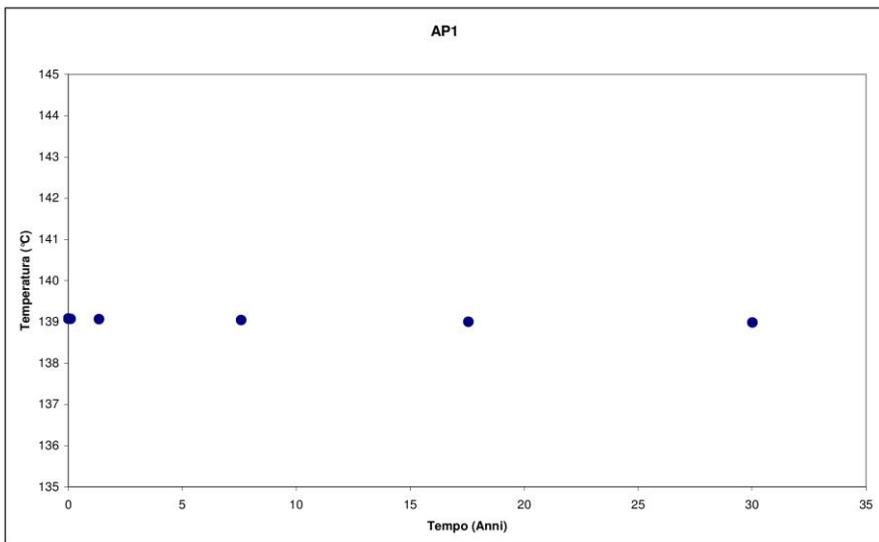
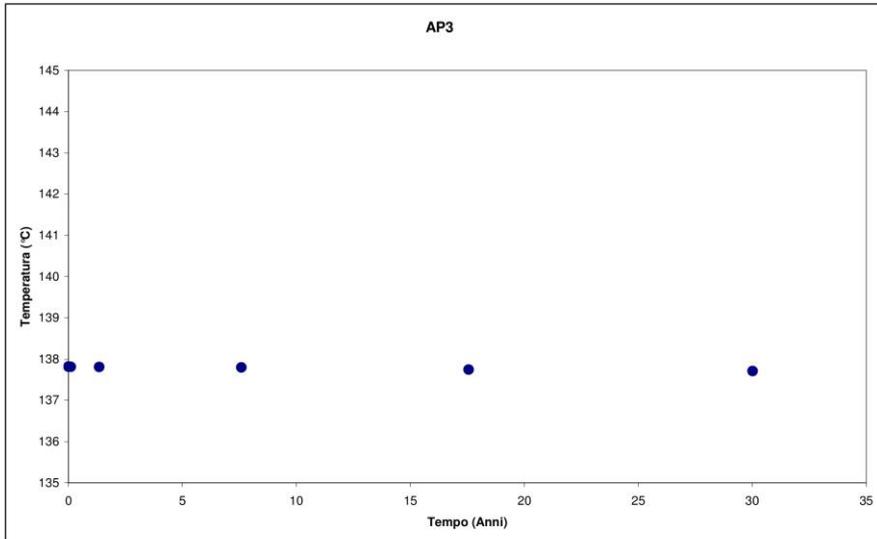
Scenario simulato: Per l'area di Torre Alfina le portate di prelievo previste sono state di 170 ton/h (portata totale 850 ton/h) per ciascun pozzo di prelievo (AP1, AP1A, AP1B, AP2, AP3) equivalenti a circa 47 l/s. Le 850 ton/h di fluido prelevato saranno reiniettate in 4 pozzi di reiniezione (AP4, AP4A, AP4B, AP4C). In ciascun pozzo di reiniezione saranno quindi reimmesse 212,5 ton/h di fluido pari a circa 60 l/s. I parametri relativi all'area di Castel Giorgio vengono esposti di seguito. Le portate di prelievo previste sono state di 210 ton/h (portata totale 1050 ton/h) per ciascun pozzo di prelievo (CG1, CG1A, CG2, CG3, CG3A) equivalenti a circa 60 l/s. Le 1050 ton/h di fluido prelevato saranno reiniettate in 5 pozzi di reiniezione (CG14, CG14A, CG14B, CG14C, CG14D). In ciascun pozzo di reiniezione saranno quindi reimmesse 210 ton/h di fluido pari a circa 60 l/s.

#### 4.2.1. Simulazione

Dal punto di vista termico le variazioni di temperatura osservate nei pozzi produttori sono molto contenute. In particolare, i pozzi AP1, AP1A e

AP3 non mostrano significative variazioni di temperatura nel tempo, mentre i pozzi AP1B e AP2 presentano un incremento di temperatura di circa 1°C. Nella porzione più superficiale e permeabile però il pozzo AP2 mostra una diminuzione di temperatura col tempo che raggiunge i 5°C nell'arco dei 30 anni (Fig. 10).

La variazione di pressione nei pozzi produttori tende a stabilizzarsi molto rapidamente (ordine di alcuni giorni) creando una depressurizzazione dell'ordine di 4,5-7 bar che sale fino ai 7,5-11 bar dopo 30 anni di coltivazione del campo (Fig. 11).



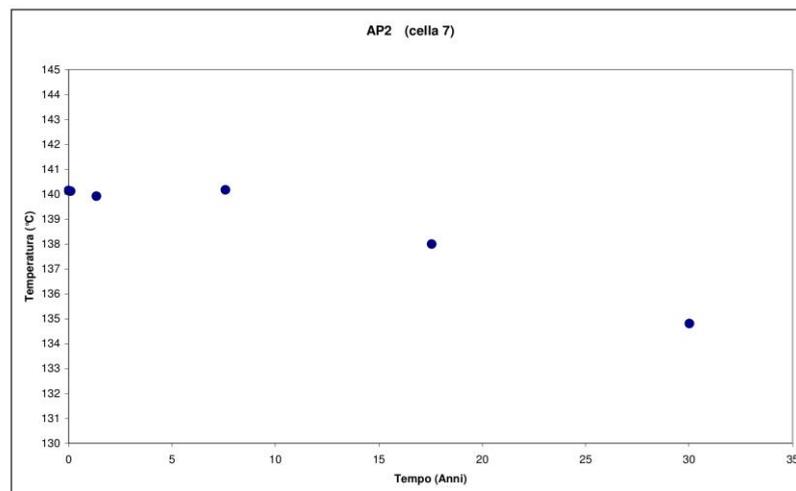
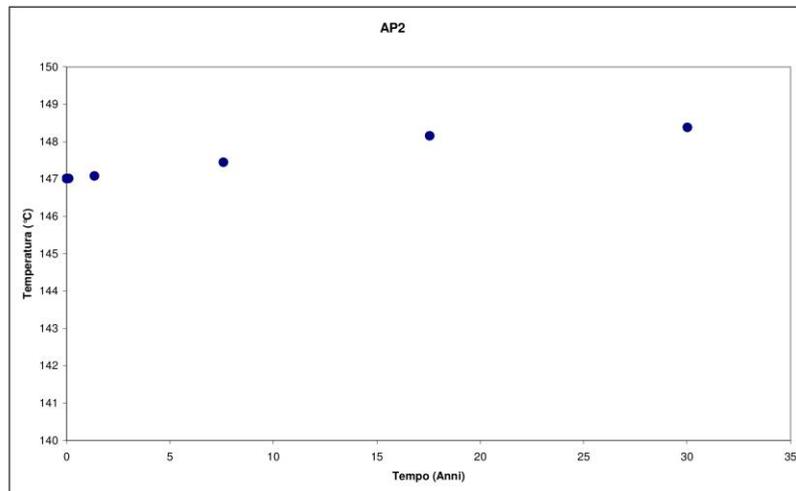
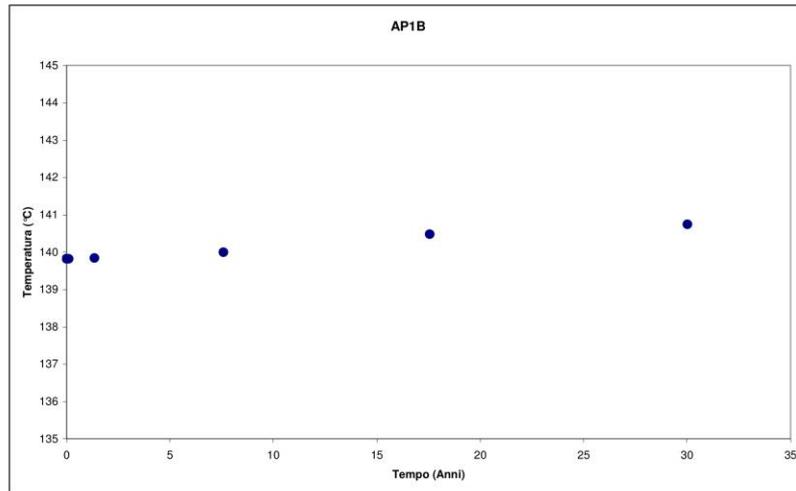
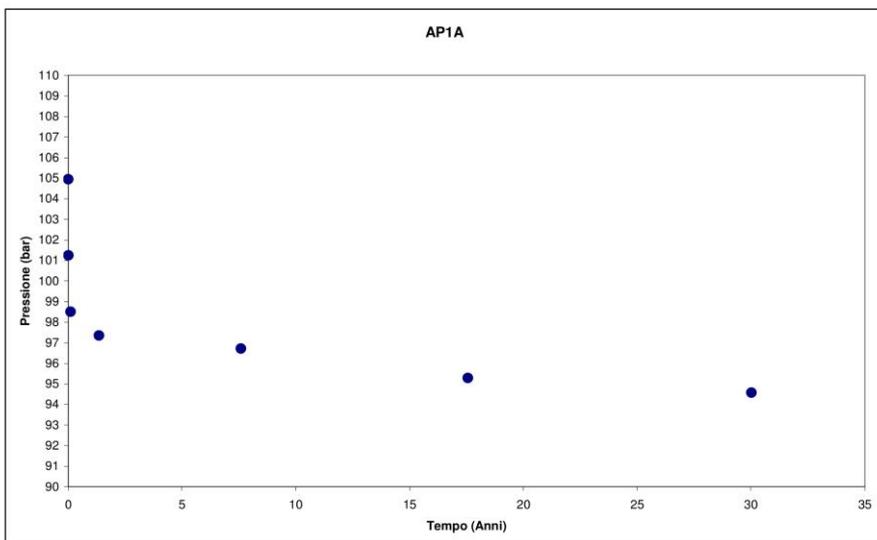
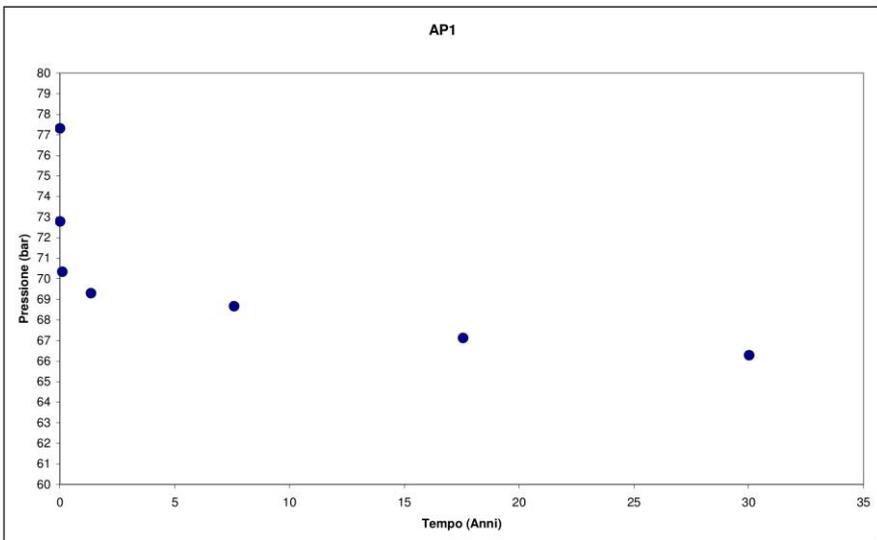
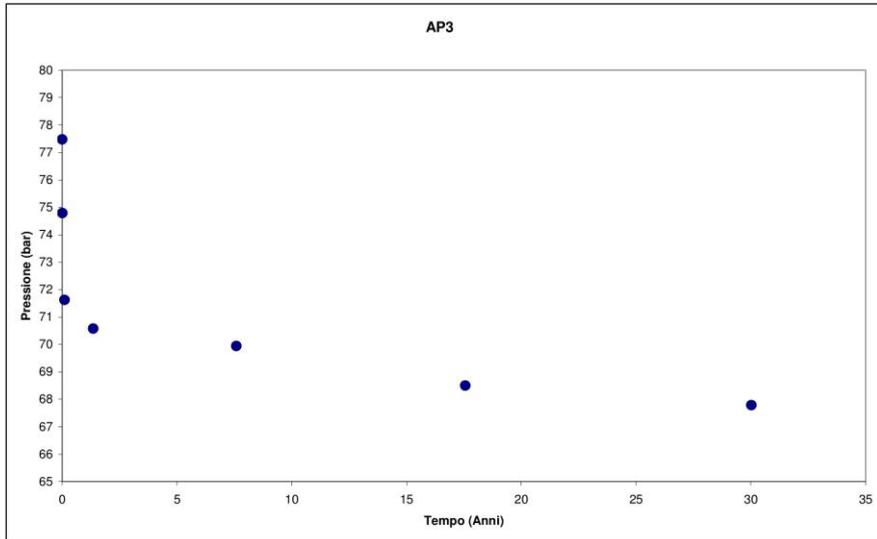


Fig.10. Diagrammi che riportano la variazione di temperatura rispetto al tempo (30 anni) nei pozzi produttori AP1, AP1A, AP1B, AP3 e AP2 (AP2 cella 7 corrisponde alla porzione più superficiale e permeabile del pozzo AP2)



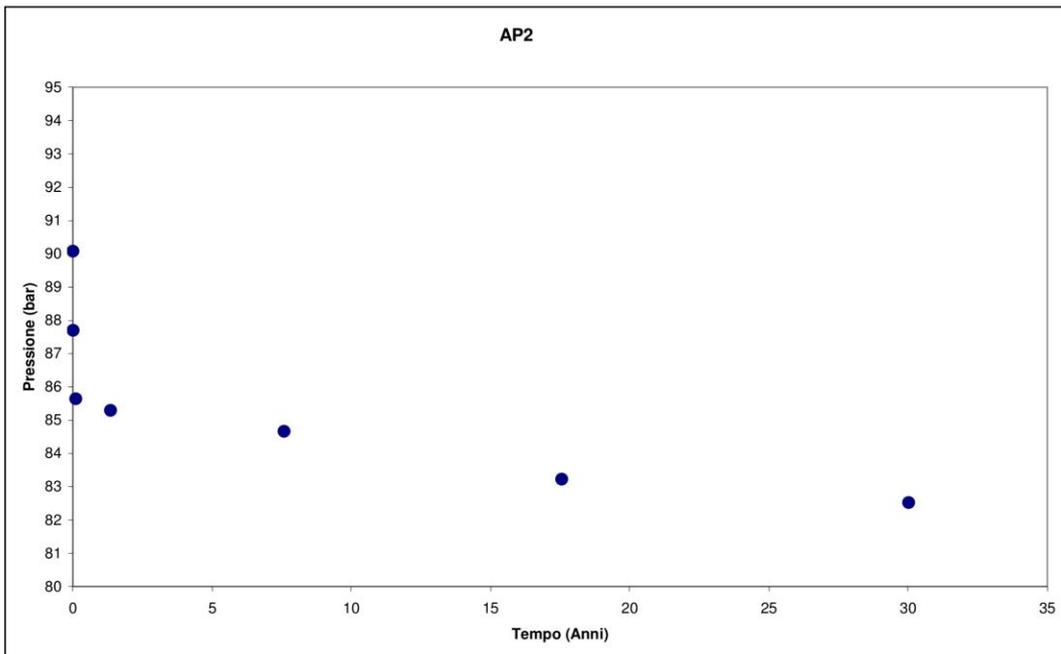
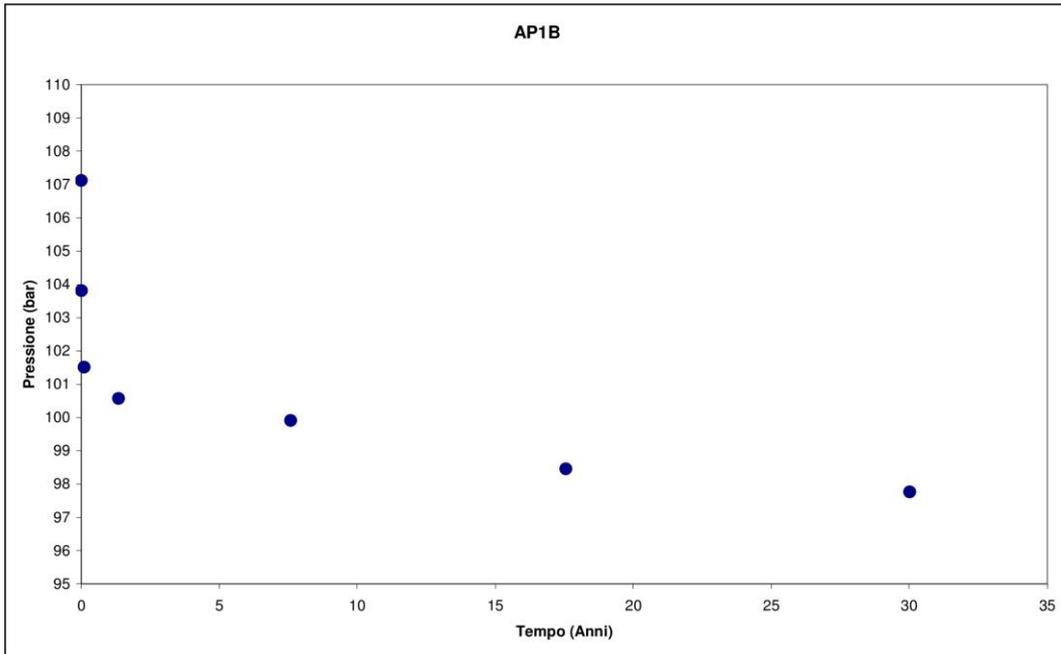
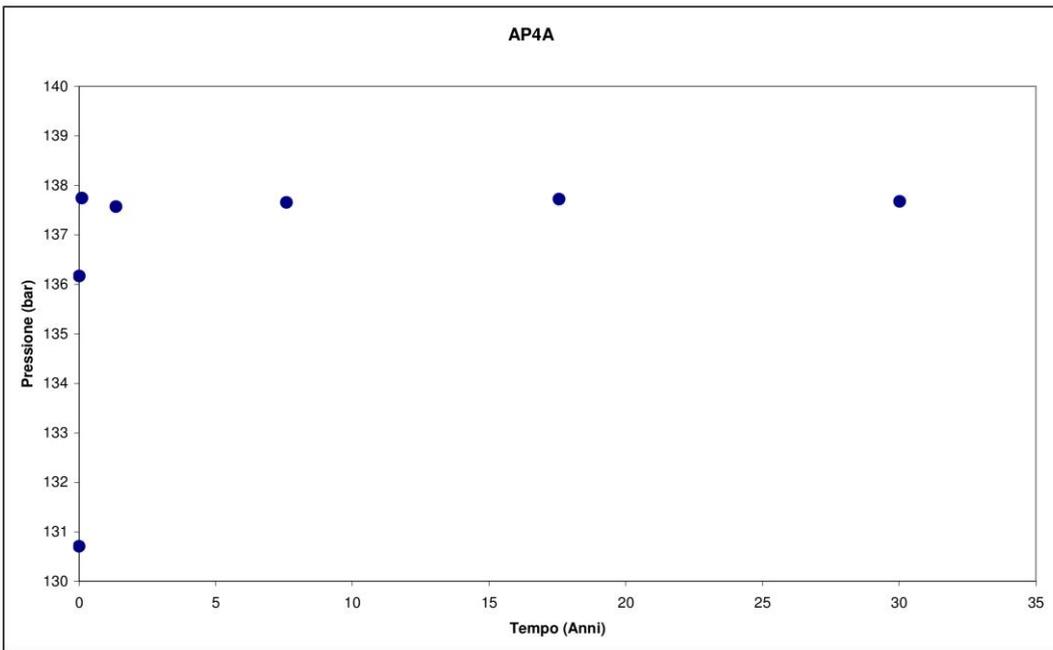
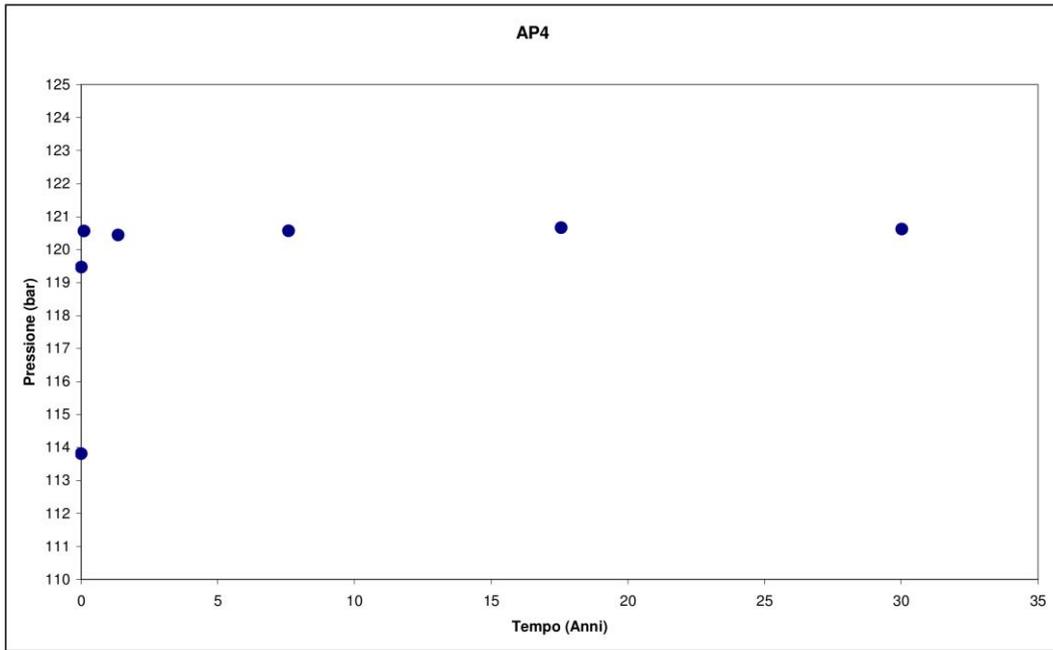


Fig.11. Diagrammi che riportano la variazione di pressione rispetto al tempo (30 anni) nei pozzi produttori AP1, AP1A, AP1B, AP3 e AP2.

L'aumento di pressione media nei pozzi reiniettori (AP4, AP4A, AP4B e AP4C), in conseguenza della reiniezione del fluido, è contenuta.

Le simulazioni realizzate mostrano che le sovrappressioni medie salgono molto rapidamente (raggiungono i 5-7 bar già nei primi giorni) e rimangono poi piuttosto costanti attorno ai 4-7 bar dopo 30 anni di coltivazione del campo (Fig. 12).

La possibile interferenza termica con il pozzo produttore CG2 (il pozzo previsto nell'area di coltivazione di Castel Giorgio ubicato più a Nord) appare molto contenuta. Nell'arco dei 30 anni di coltivazione del campo, il pozzo CG2 subisce infatti una diminuzione di temperatura di circa 2° C sia nella porzione più profonda del pozzo, che in quella più superficiale e più permeabile (Fig. 13).



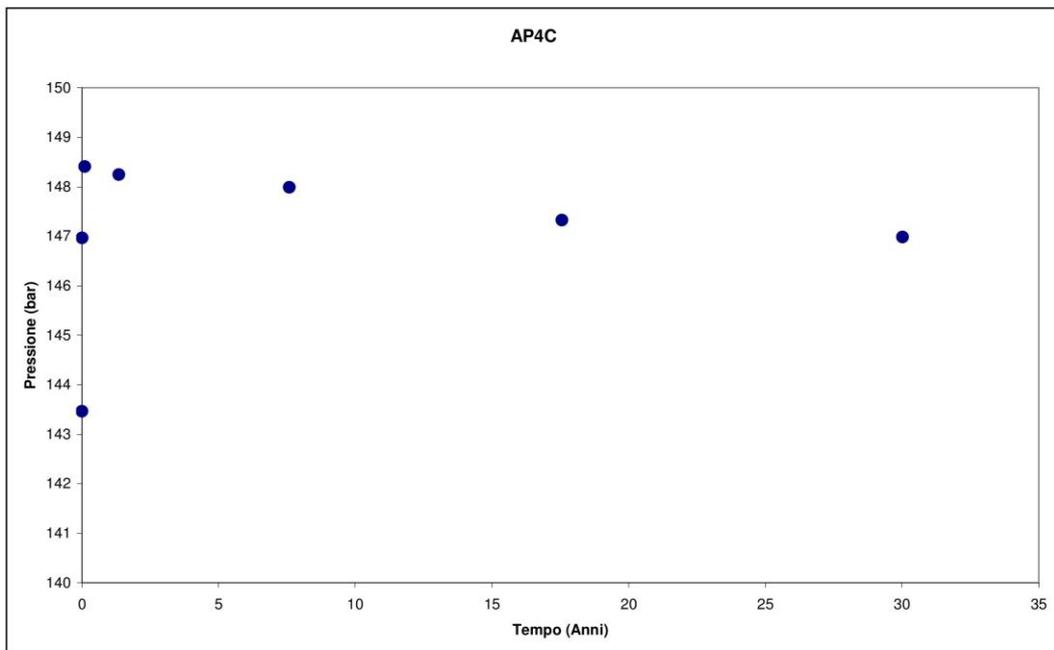
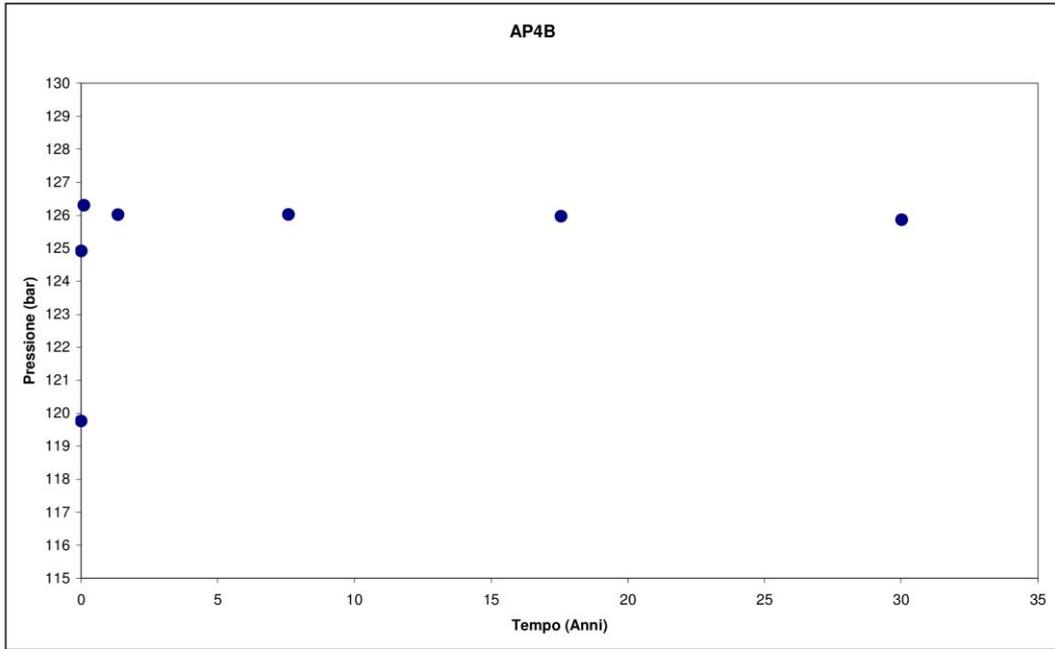


Fig.12. Diagrammi che riportano la variazione di pressione rispetto al tempo (30 anni) nei pozzi reiniettori AP4, AP4A, AP4B e AP4C

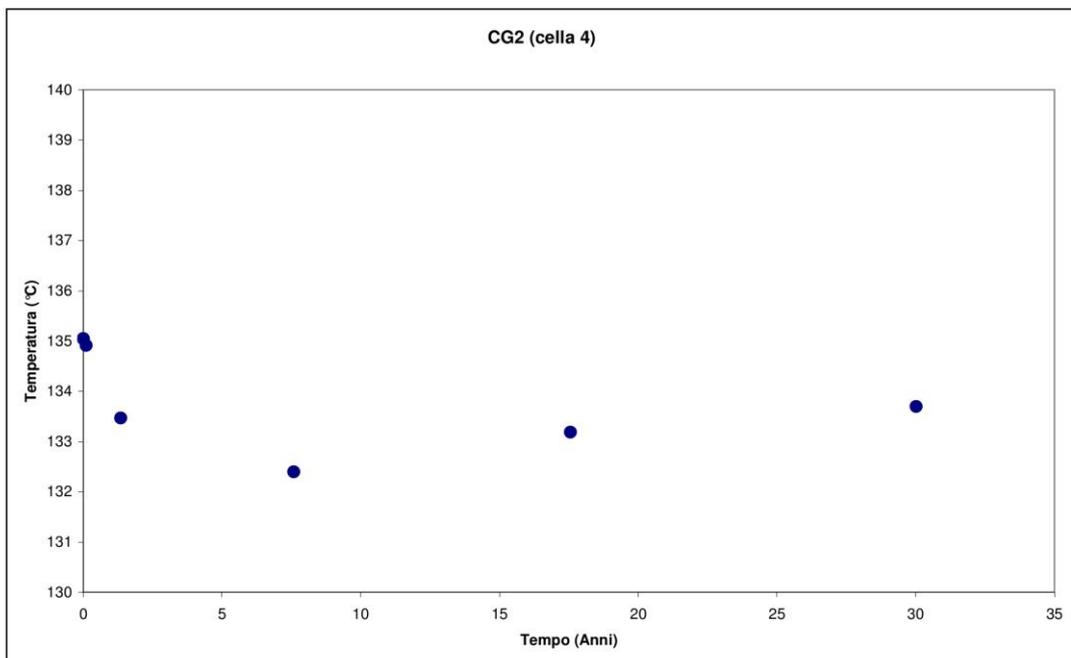
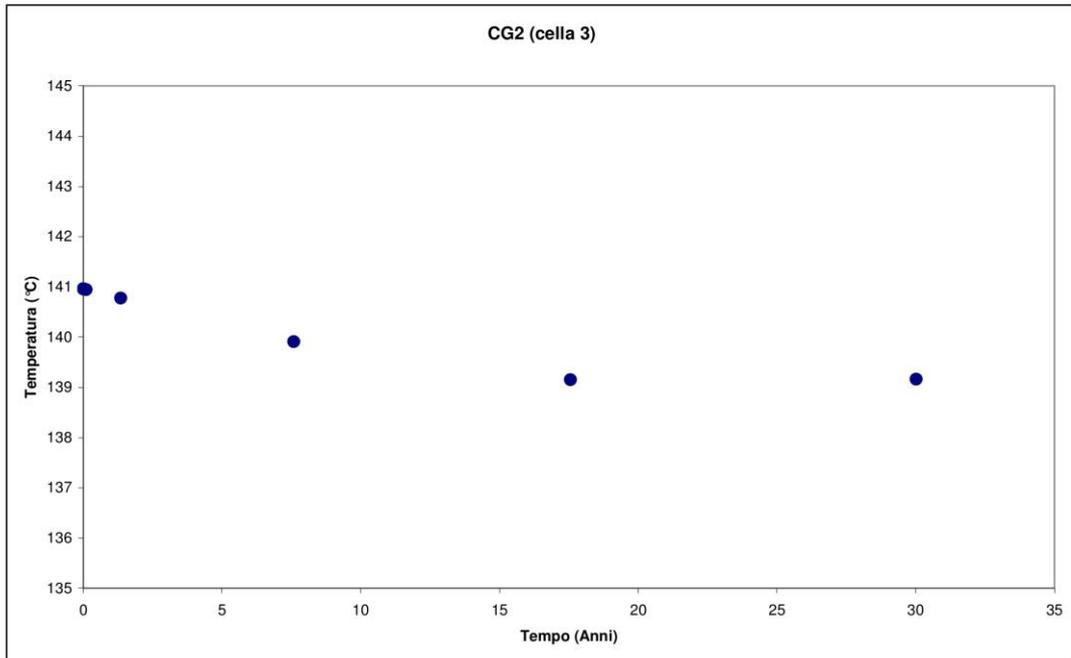


Fig.13 Variazione di temperatura rispetto al tempo (30 anni) nella porzione più superficiale e più permeabile (CG2 cella 4) e più profonda e meno permeabile (CG2 cella 3) del pozzo produttore CG2.

## 5. Conclusioni

Assumendo come base di partenza i dati geologici e geofisici presenti in letteratura e direttamente forniti da ITW-LKW, operatore del progetto pilota per produzione di energia geotermoelettrica, abbiamo realizzato un modello numerico del sistema geotermico di Torre Alfina. Mediante questo modello numerico abbiamo compiuto una serie di simulazioni del sistema geotermico, calibrando i risultati con i dati di temperatura esistenti sui pozzi profondi, in particolare sui pozzi "Alfina 1 bis", "Alfina 2", "Alfina 4", "Alfina 5", "Alfina 7", "Alfina 13", "Alfina 14", "Alfina 15" e "RA1" che si trovano nell'area oggetto del progetto, fino a ricostruirne lo stato stazionario indisturbato.

Partendo dal modello stazionario, sono state eseguite le simulazioni relative alla successiva coltivazione del campo per scopi geotermoelettrici prevista dal progetto pilota. In particolare sono state eseguite simulazioni termofluidodinamiche considerando uno scenario di coltivazione del campo geotermico che considera diversi pozzi produttori/reiniettori.

Lo scenario analizzato ha previsto la coltivazione contemporanea della porzione Nord del campo geotermico (area di Torre Alfina) e di quella più a sud (area di Castel Giorgio). In questo scenario, le variazioni di pressione simulate, indotte nei pozzi produttori dall'emungimento del fluido geotermico, indicano dei valori piuttosto elevati che si attestano attorno ai 7,5-11 bar dopo 30 anni di coltivazione del campo. Le sovrappressioni simulate nei pozzi reiniettori hanno mostrato invece dei valori di  $\Delta P$  relativamente contenuti compresi tra 4 e 7 bar nell'arco dei 30 anni di coltivazione del campo. Dal punto di vista termico, la simulazione non mette in evidenza alcuna interferenza tra pozzi produttori e reiniettori nell'area di Torre Alfina (solo nella parte più superficiale del pozzo AP2 notiamo una diminuzione di temperatura di circa 5°C dopo 30 anni di coltivazione). Anche nel pozzo produttore CG2 gli effetti dell'interferenza termica indotta dalla reiniezione è

limitata sia nella porzione più superficiale e permeabile (circa 2°C dopo 30 anni di coltivazione del campo) sia nella porzione più profonda (2°-2,5°C in 30 anni di coltivazione del campo).

I risultati delle simulazioni termofluidodinamiche realizzate in questo lavoro suggeriscono quindi che dal punto di vista, sia delle possibili interferenze termiche tra pozzi produttori - pozzi reiniettori sia delle sovrappressioni medie indotte nei pozzi produttori, lo scenario di coltivazione del campo geotermico di Torre Alfina-Castel Giorgio proposto da ITW-LKW è compatibile con una coltivazione sostenibile della risorsa geotermica. In questo scenario infatti, la diminuzioni di temperatura nei pozzi produttori risultano molto contenute e nei pozzi reiniettori le sovrappressioni medie indotte dalla reiniezione assumono valori di pochi bar.

## 6. Bibliografia

Buonasorte, G., Cataldi, R., Ceccarelli, A., Costantini, A., D'Offizi, S., Lazzarotto, A., Ridolfi, A., Baldi, P., Barelli, A., Bertini, G., Bertrami, R., Calamai, A., Cameli, G., Corsi, R., D'Acquino, C., Fiordelisi, A., Ghezzi, A., Lovari, F., 1988. Ricerca ed esplorazione nell'area geotermica di Torre Alfina (Lazio - Umbria). *Boll. Soc. Geol. It.*, 107, 265-337.

Buonasorte, G., Pandeli, E., Fiordelisi, A., 1991. The Alfina 15 well: Deep geological data from Northern Latium (Torre Alfina geothermal area). *Boll. Soc. Geol. It.*, 110, 823-831.

Pruess, K., 1991. TOUGH2 - A General Purpose Numerical Simulator for Multiphase Fluid and Heat Flow. Report LBL 29400, Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley, CA, USA.