



IMPIANTO PILOTA GEOTERMICO CASTEL GIORGIO (TR)

ALLEGATO 3

MODELLAZIONE NUMERICA DEL SISTEMA GEOTERMICO DI CASTEL GIORGIO

Modellazione numerica del sistema geotermico di "Torre Alfina"

Pisa 18 Settembre 2013



Indice

1. Introduzione	3
2. Modello del sistema geotermico di Torre Alfina	4
3. Griglia di simulazione	8
4. Risultati della simulazione numerica	9
4.1. Stato stazionario	9
4.2. Simulazioni degli effetti indotti dalla coltivazione del sistema geotermico di Torre Alfina	14
4.2.1. Risultati della simulazione	15
5. Conclusioni	21

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" ed "RA1" (Buonassorte 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 km² (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) 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 Alfina4-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). 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.

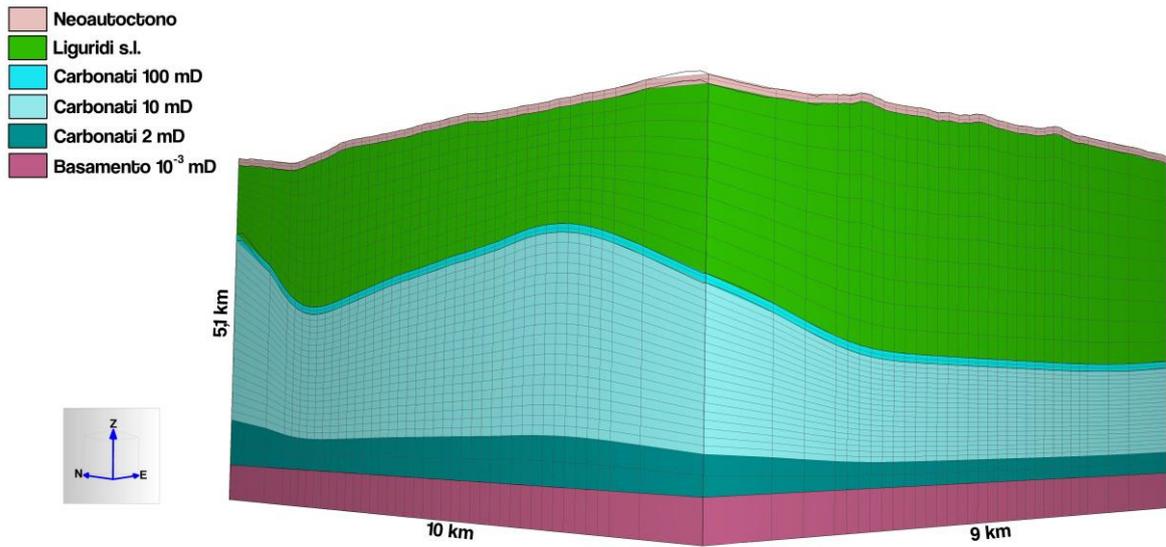


Fig. 1. Modello geologico tridimensionale di riferimento con la discretizzazione in celle

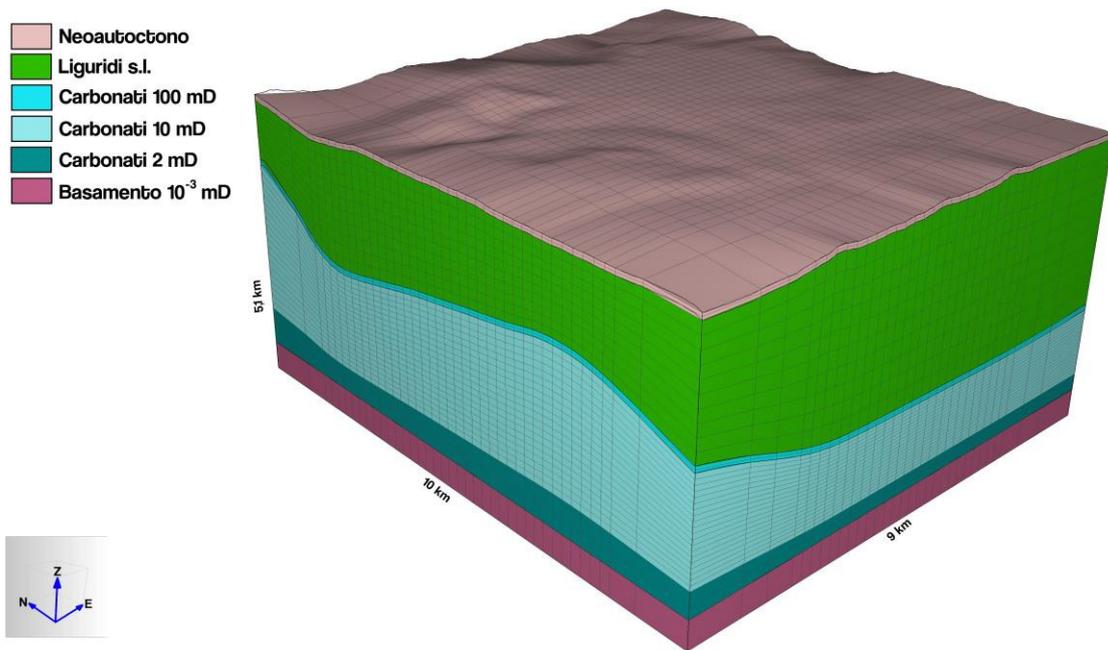


Fig. 2. Modello geologico tridimensionale di riferimento con la discretizzazione in celle

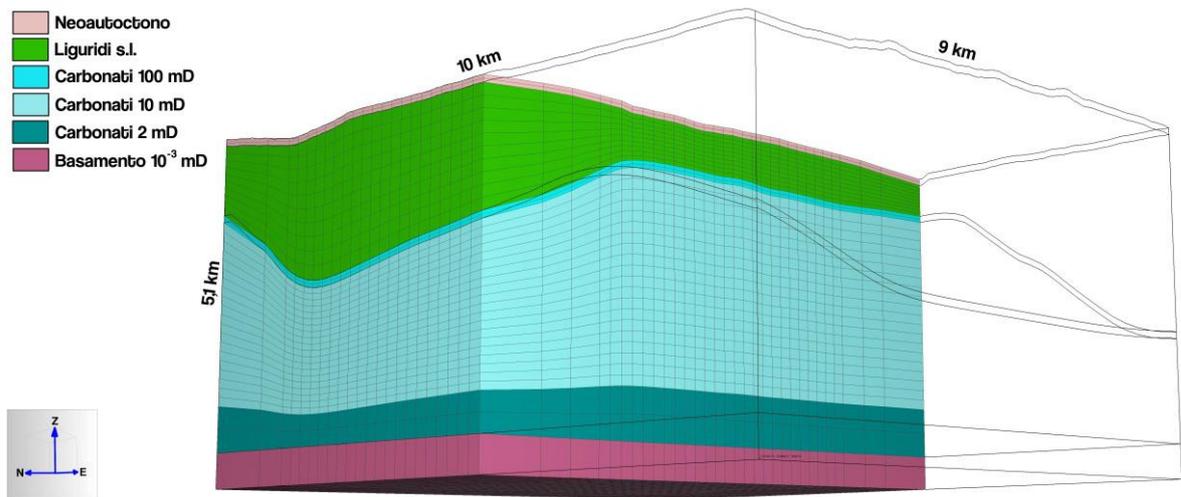


Fig. 3. Spaccato del modello geologico tridimensionale

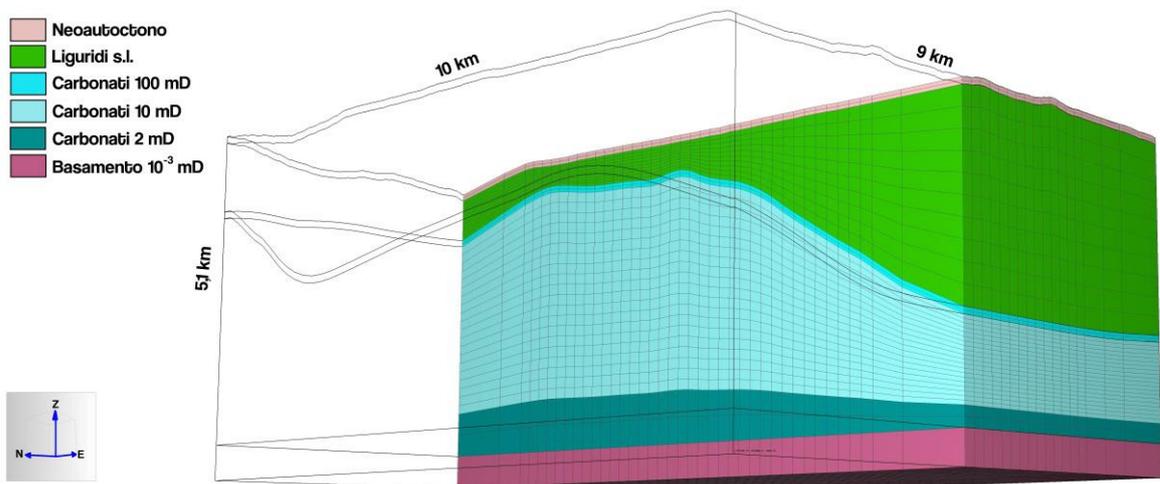


Fig. 4. Spaccato del modello geologico tridimensionale

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 km².

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 rimanevano 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" ed "RA1" che furono perforati proprio nell'area oggetto dell'attuale progetto pilota). Imponendo un tempo di simulazione dell'ordine di 1000000 di anni (sono state realizzate simulazioni fino a 2000000 di anni ma lo stato stazionario veniva raggiunto in precedenza quindi è stato considerato più che sufficiente un tempo di simulazione pari a 1000000 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).

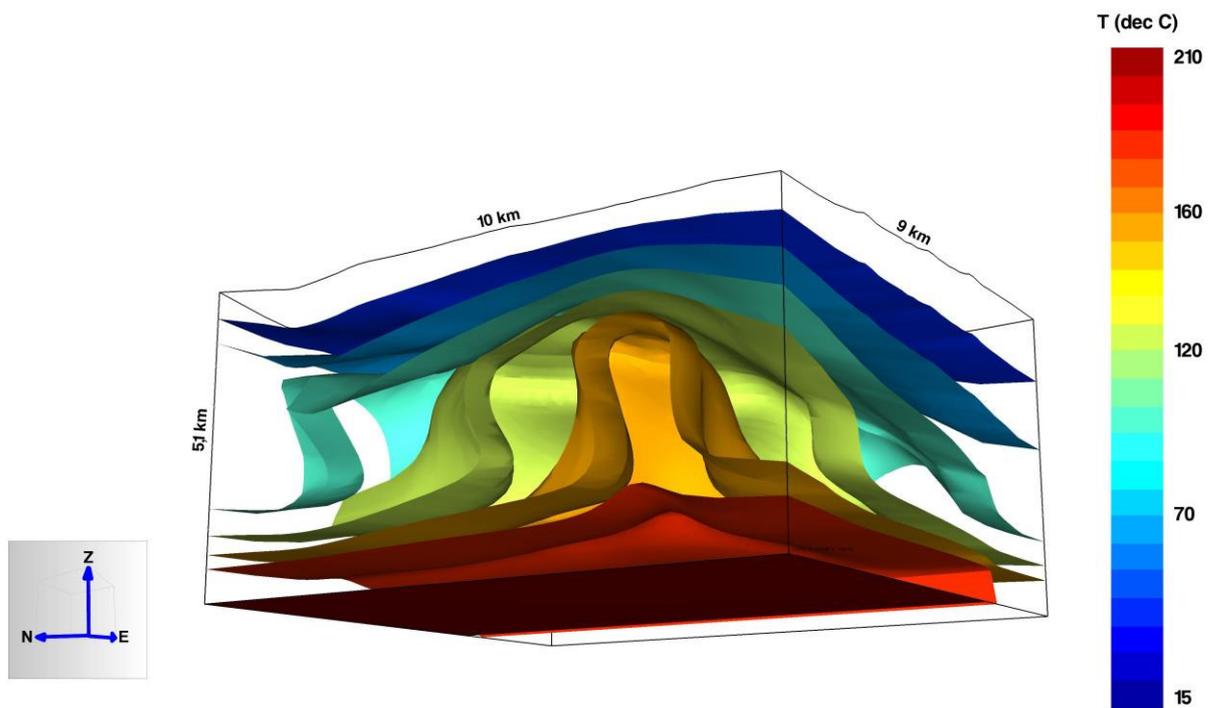


Fig. 5. Le superfici del modello rappresentano l'andamento delle isoterme allo stato stazionario (tempo simulato 1000000 anni)

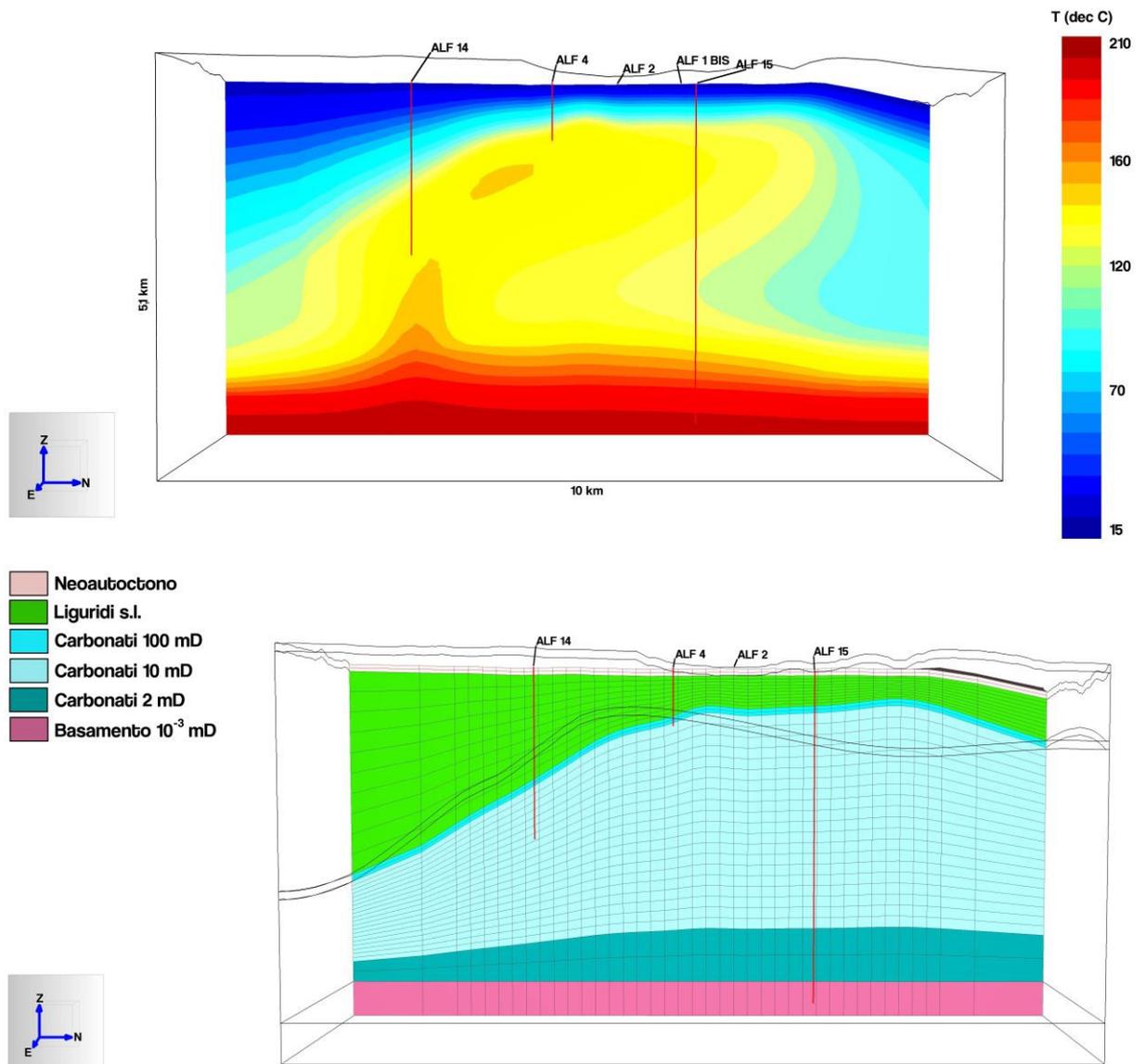


Fig. 6. Sezione Nord-Sud del modello stazionario (in alto), confrontata con la sezione geologica (in basso). Le superfici del modello rappresentano l'andamento delle isoterme allo stato stazionario (tempo simulato 1000000 anni).

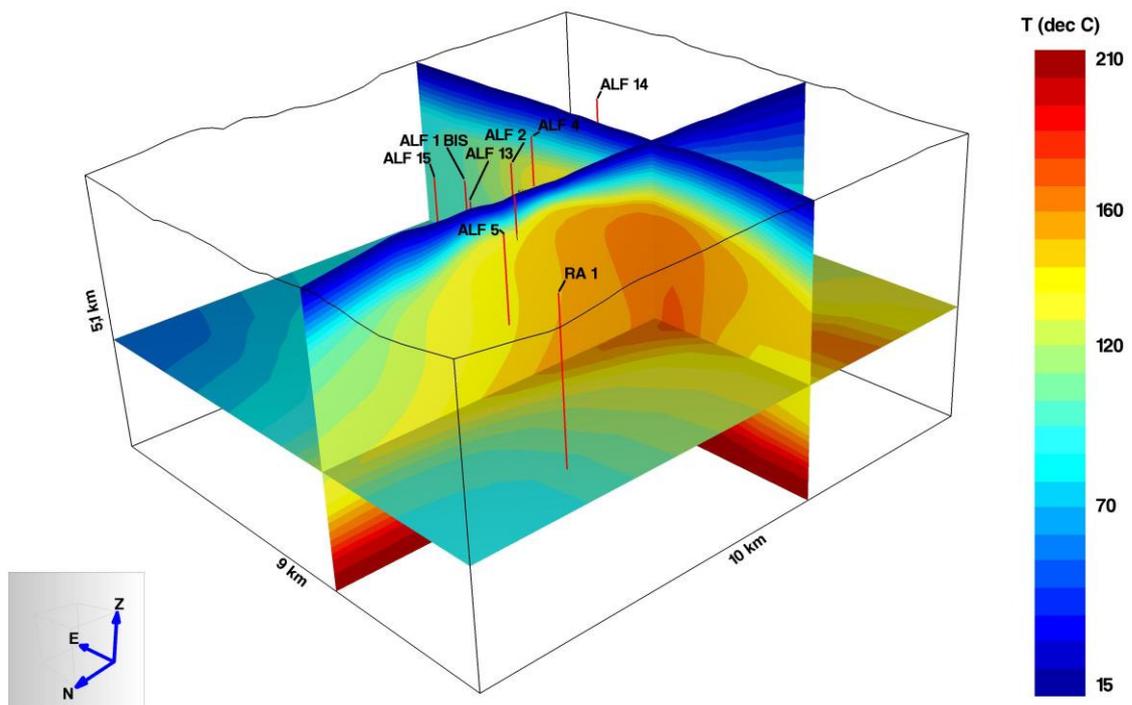
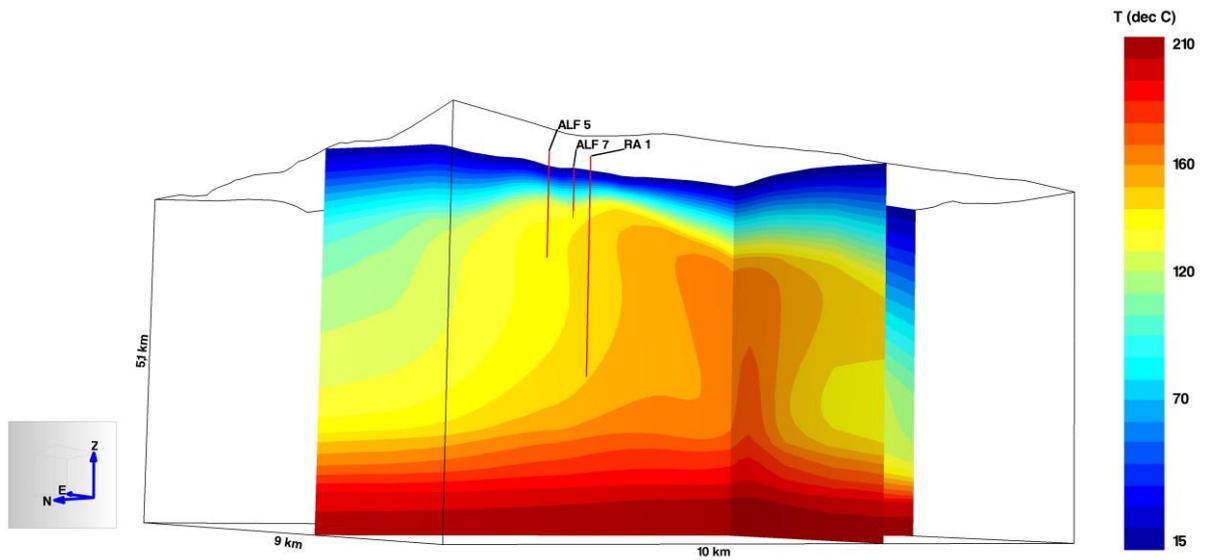


Fig. 7. Sezioni rappresentative dell'andamento delle isoterme nel sottosuolo (tempo simulato 1000000 anni)

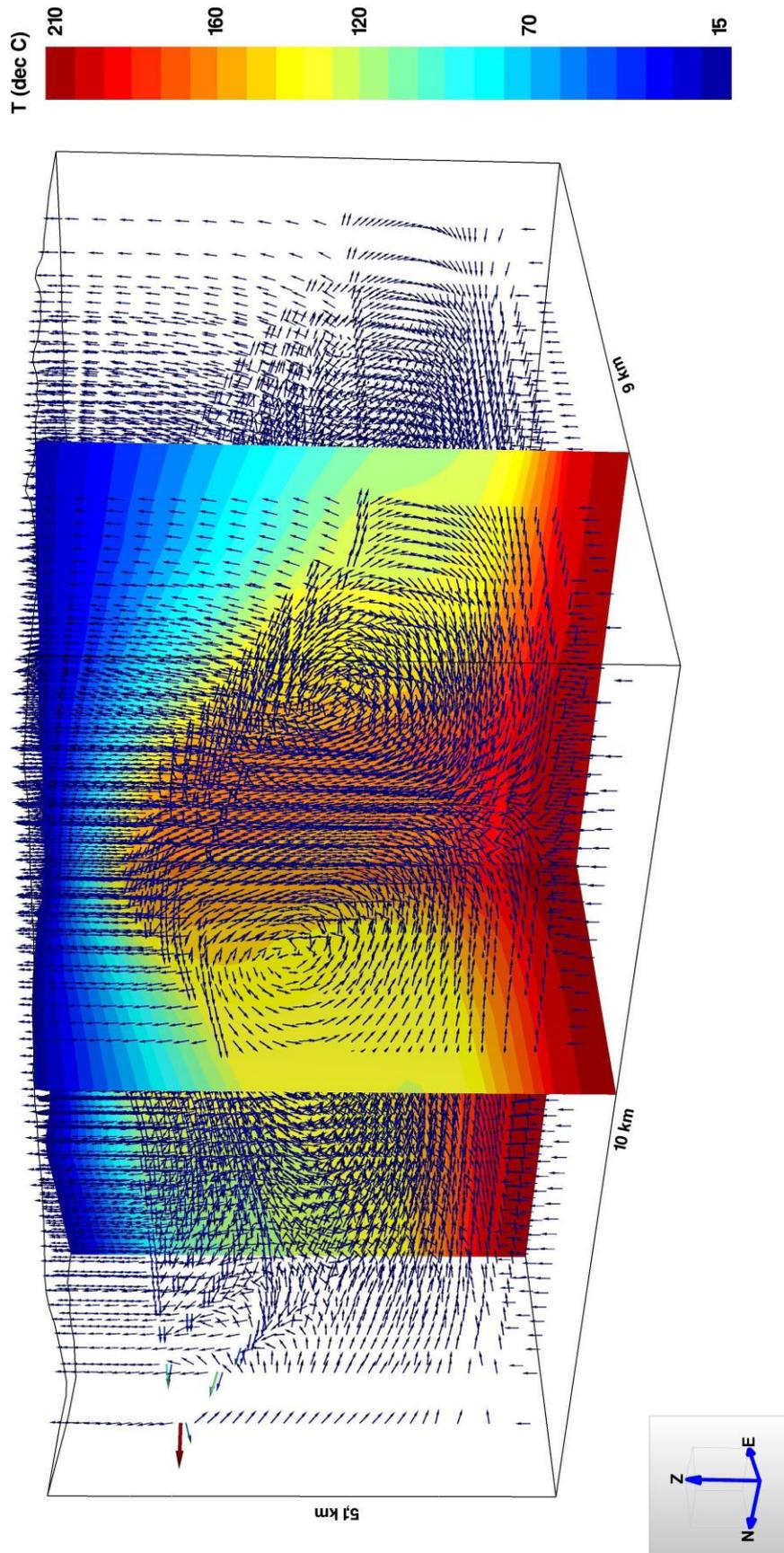


Fig. 8. Andamento dei vettori rappresentativi del flusso di fluido nel sottosuolo (tempo simulato 1000000 anni)

4.2. Simulazioni degli effetti indotti dalla coltivazione del sistema geotermico di Torre Alfina

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.

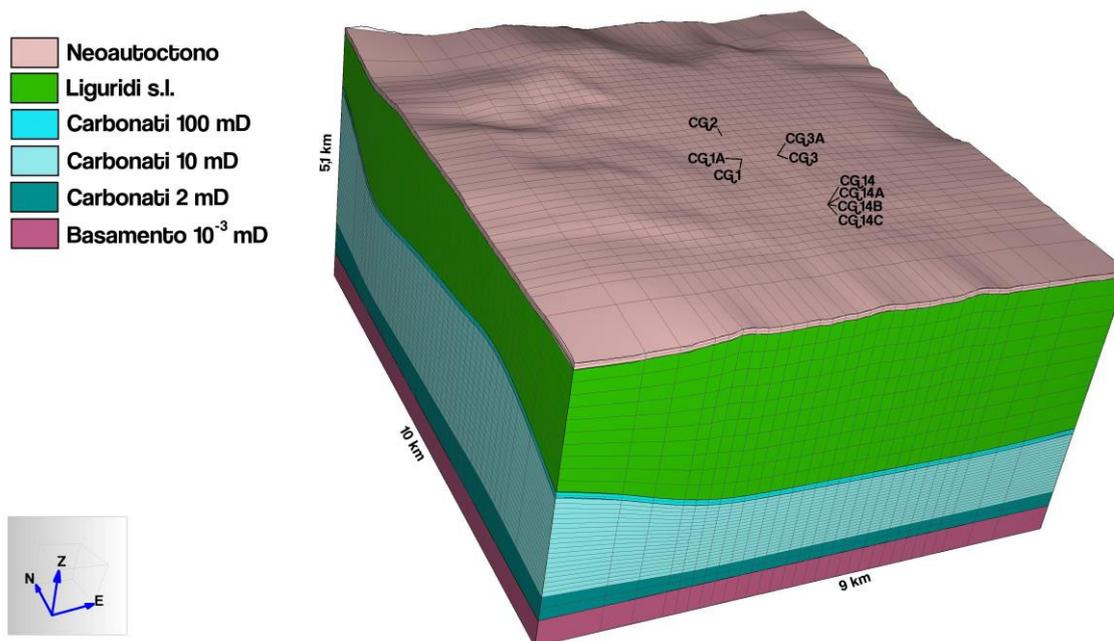


Fig. 9. Ubicazione dei pozzi produttori (CG1, CG1A, CG2, CG3, CG3A) e dei pozzi reiniettori (piazzola unica e 4 pozzi di cui uno verticale, CG14 e tre devianti, CG14A, CG14B, CG14C)

Le portate di prelievo imposte, come previste dal progetto, 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 4 pozzi di reiniezione (CG14, CG14A, CG14B, CG14C). In ciascun pozzo di reiniezione saranno quindi reimmesse 262,5 ton/h di fluido pari a circa 73 l/s.

Il progetto prevede che i pozzi di prelievo CG1, CG2, CG3 siano verticali ed abbiano 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 devianti 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 sono ubicati a partire da una medesima piazzola. E' previsto un pozzo verticale (CG14) di 2300m di profondità dal piano campagna, finestrato (hopen 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 CG14/A. Il pozzo CG14C sarà deviato verso Sud-30°Ovest ed avrà lo stesso profilo di deviazione, profondità e finestratura del CG14/A.

La temperatura di reiniezione del fluido è stata considerata pari a 80°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 80°C pari a 344900 J/kg. I tempi impiegati in queste simulazioni sono di 30 anni.

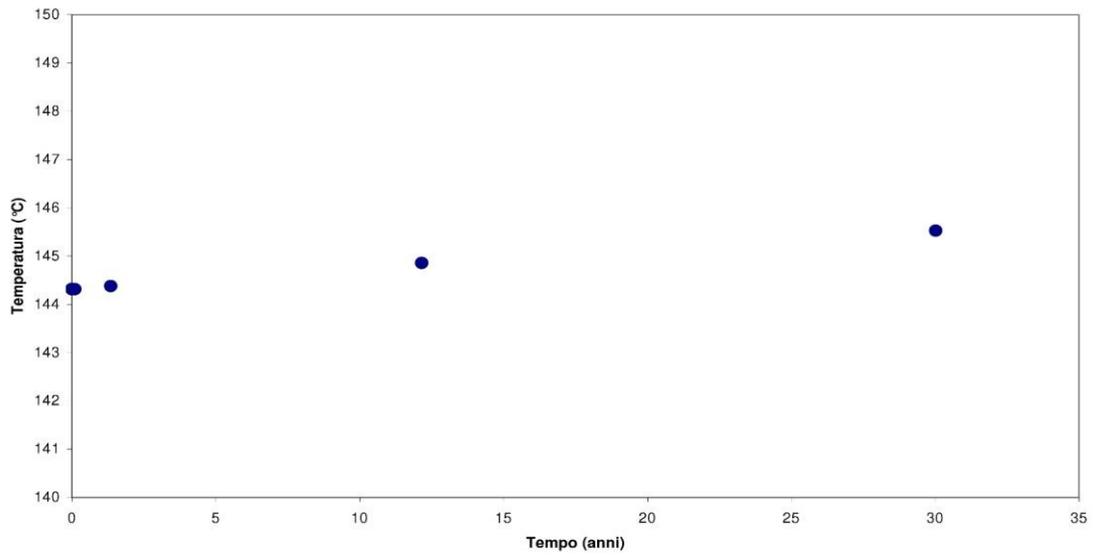
4.2.1. Risultati della simulazione

I risultati della simulazione mostrano che, dal punto di vista termico l'influenza della reiniezione sui pozzi produttori è molto scarso. Infatti, considerando un tempo di coltivazione del campo geotermico di 30 anni, la variazione di temperatura in tre pozzi di prelievo (CG1, CG1A e CG3) aumenta leggermente (1°-2°C), nel pozzo CG3A rimane sostanzialmente costante, mentre nel pozzo CG2 subisce una diminuzione di circa 2,5°C. (Fig. 10).

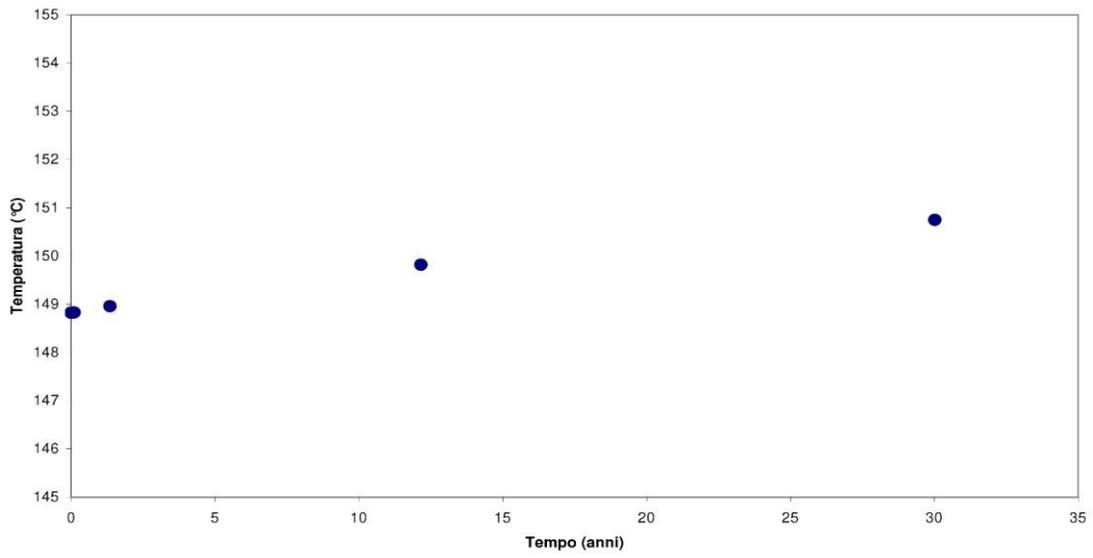
La variazione di pressione nei pozzi produttori tende a stabilizzarsi molto rapidamente (ordine di alcuni giorni) creando una depressurizzazione

dell'ordine di 7-8 bar che salgono a 8-9 bar dopo 30 anni di coltivazione del campo (Fig. 11).

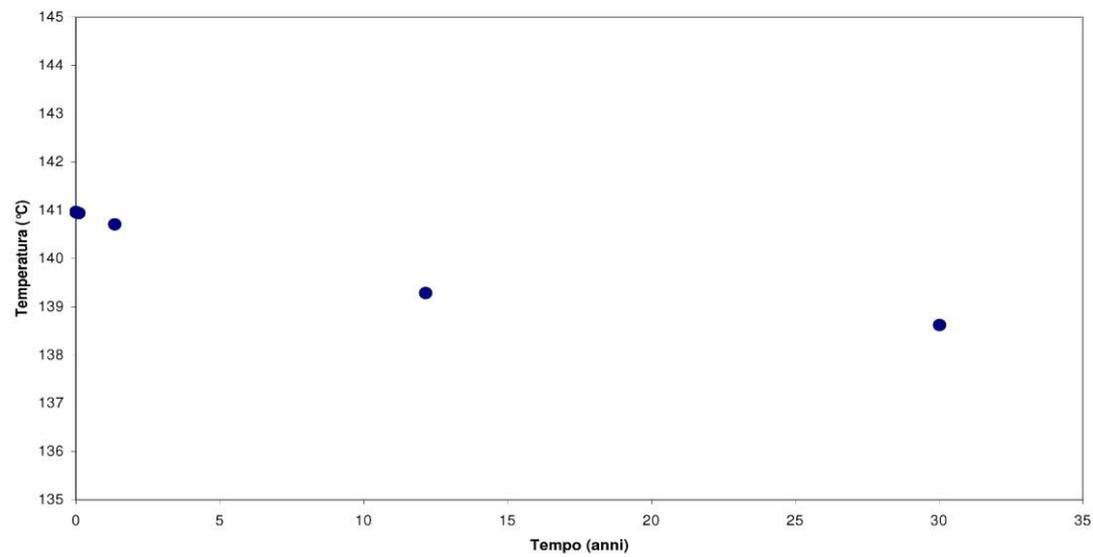
CG1



CG1A



CG2



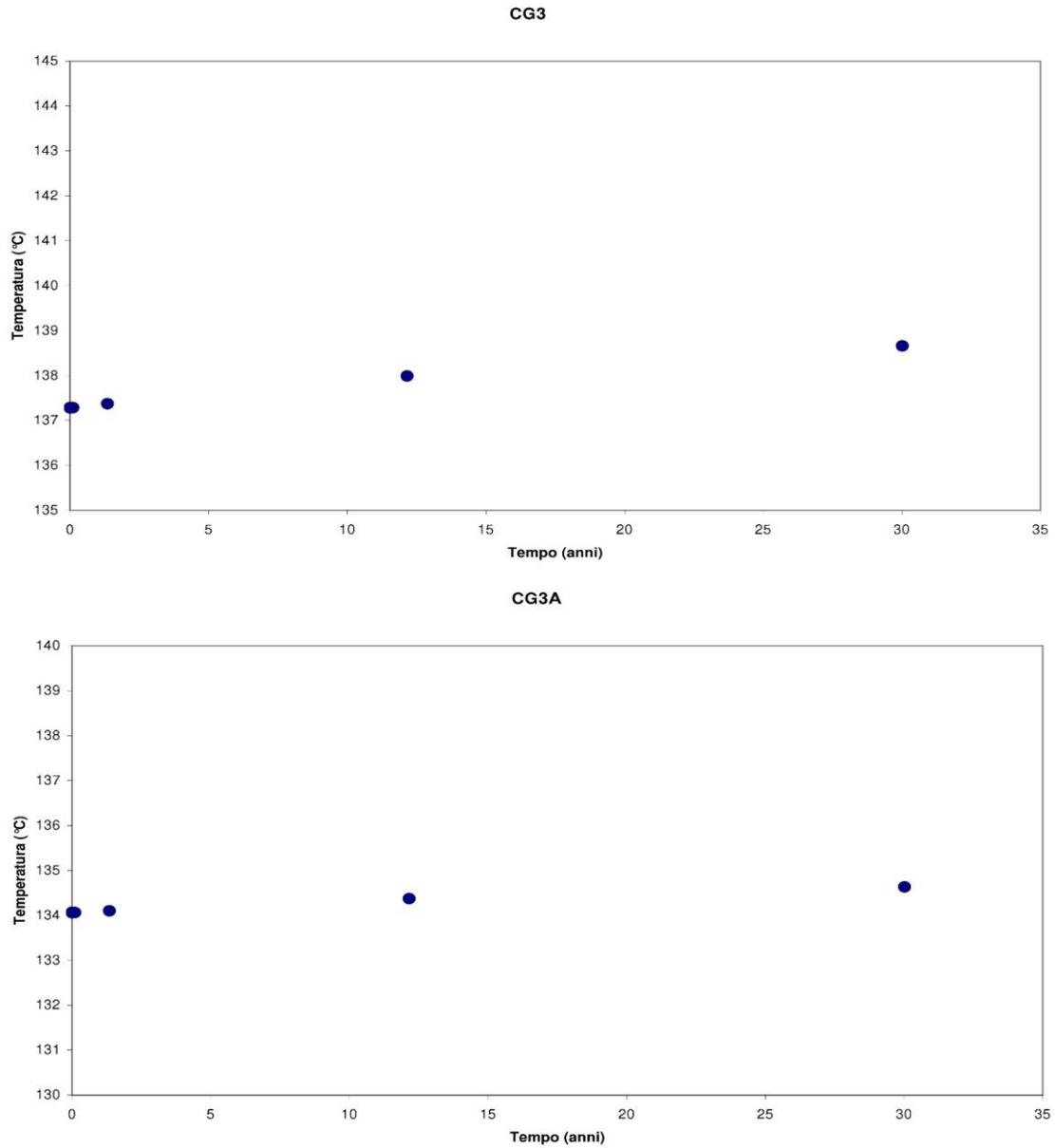
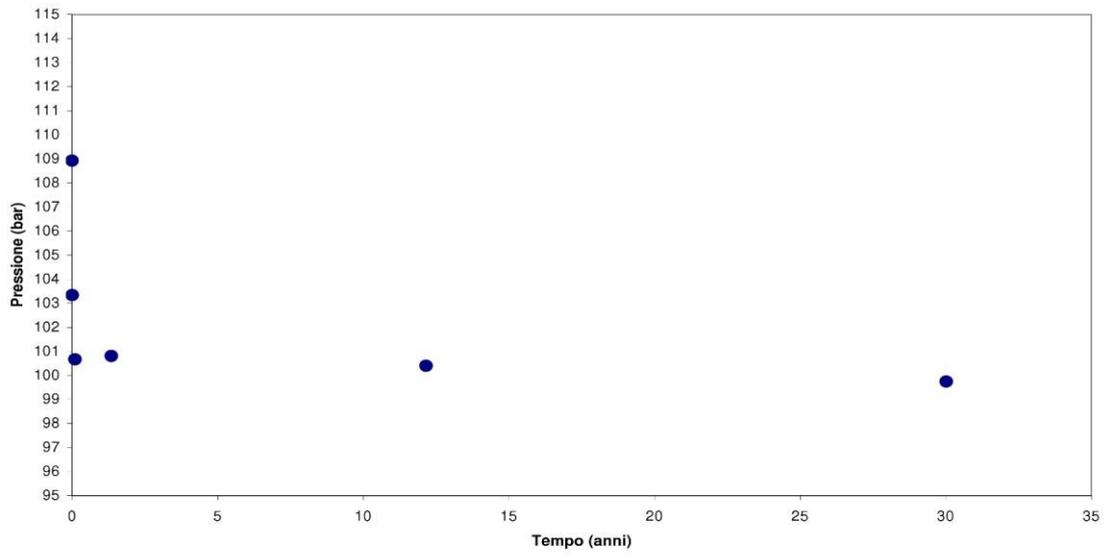
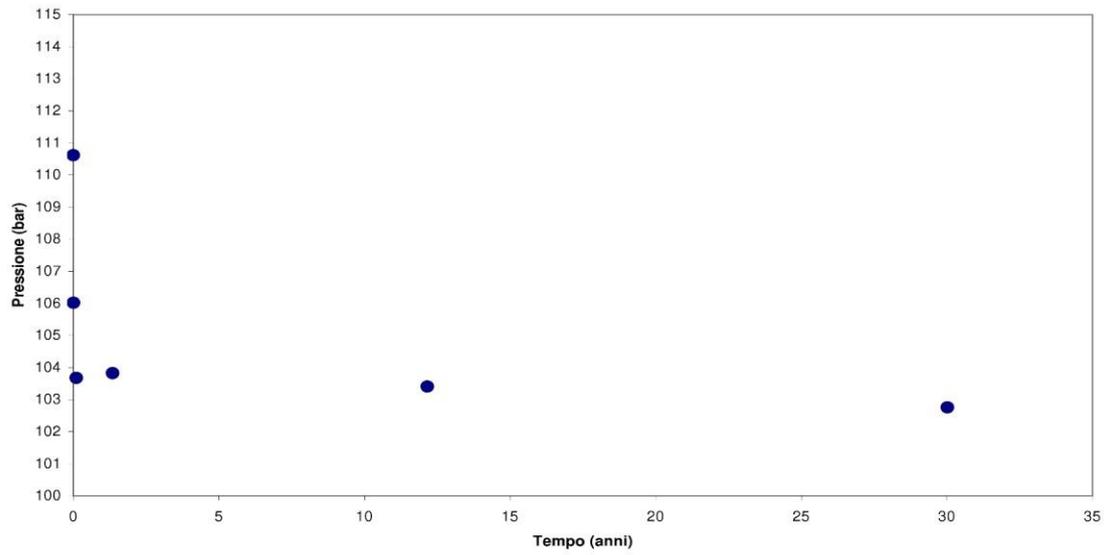


Fig.10. Diagrammi che riportano la variazione di temperatura rispetto al tempo (30 anni) nei pozzi produttori CG1, CG1A, CG2, CG3, CG3A.

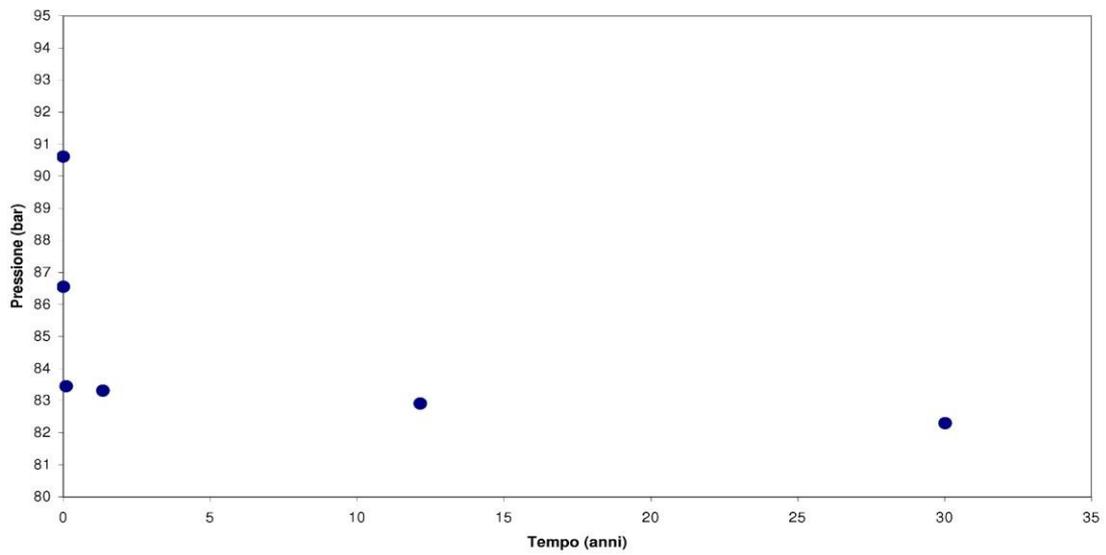
CG1



CG1A



CG2



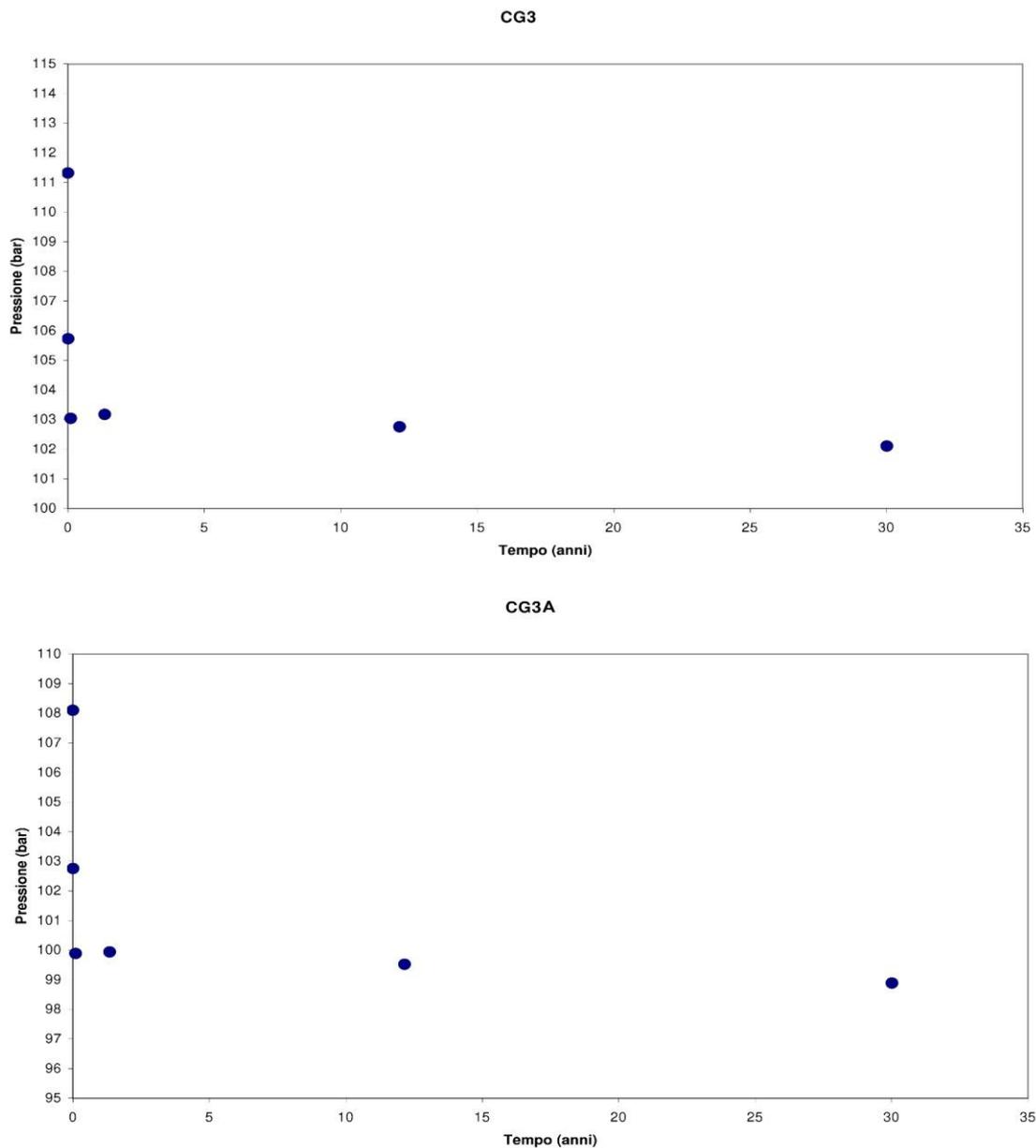


Fig.11. Diagrammi che riportano la variazione di pressione rispetto al tempo (30 anni) nei pozzi produttori CG1, CG1A, CG2, CG3, CG3A.

I risultati della simulazione numerica mostrano che nei pozzi reiniettori (CG14, CG14A, CG14B e CG 14C) la reiniezione induce delle sovrappressioni medie che salgono molto rapidamente (8-9 bar nei primi giorni) e che si attestano attorno ai 10,5-13,5 bar dopo 30 anni di coltivazione del campo (Fig. 12).

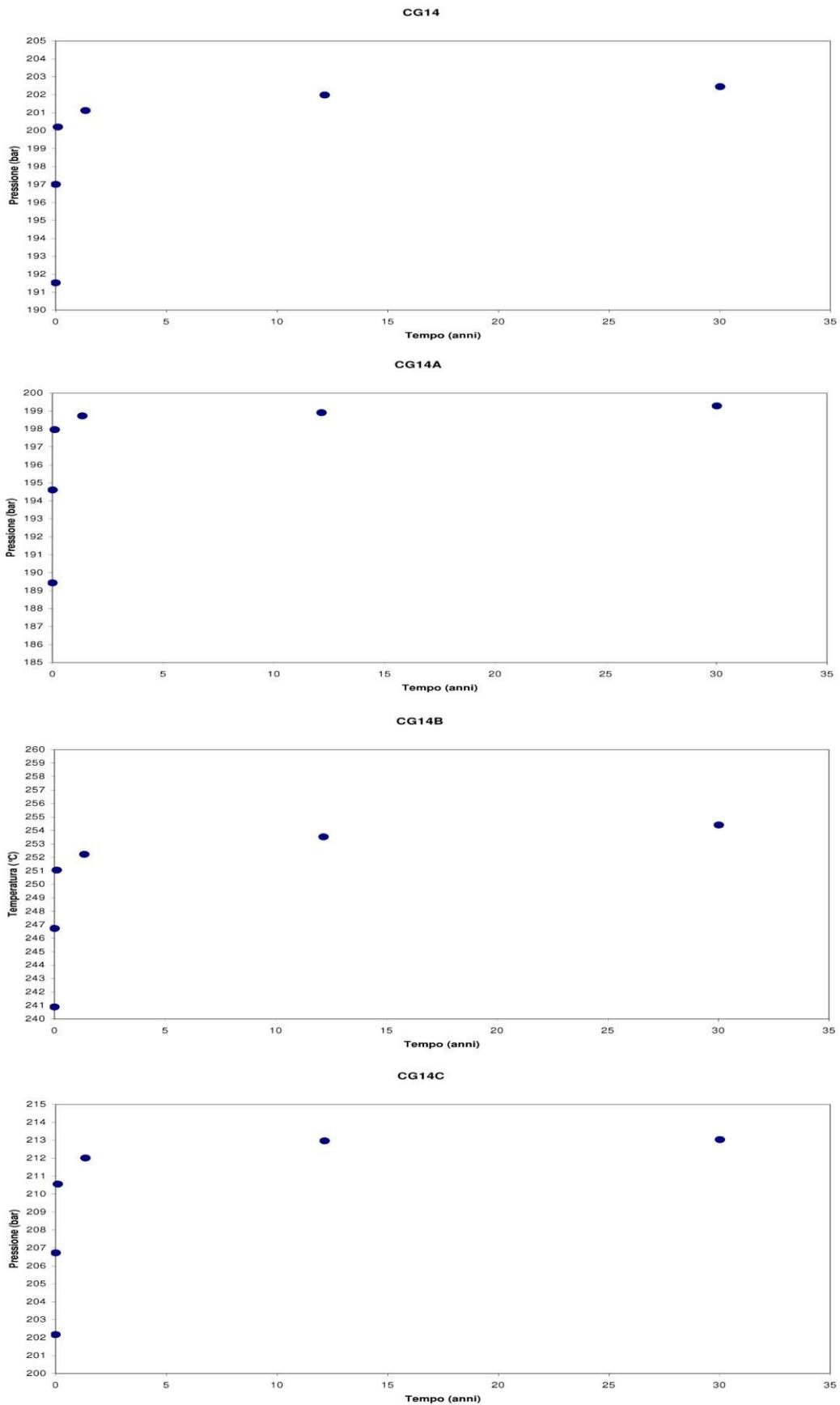


Fig.12. Diagrammi che riportano la variazione di pressione rispetto al tempo (30 anni) nei pozzi reiniettori CG14, CG14A, CG14B e CG 14C

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" ed "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, ubicando cinque pozzi produttori e quattro pozzi reiniettori nelle posizioni indicate nel progetto.

In generale, i risultati delle modellazioni eseguite mettono in evidenza la presenza di una circolazione idrotermale convettiva efficiente nel sistema geotermico. Inoltre, le modellazioni effettuate mostrano che dal punto di vista termico, la coltivazione del campo geotermico con le modalità previste dal progetto (ubicazione pozzi produttori e reiniettori e portate di ~ 60 l/s per ciascun pozzo di produzione e di ~ 73 l/s per ciascun pozzo di reiniezione) non induce alcun effetto di interferenza apprezzabile tra pozzi produttori e reiniettori. Infatti, le variazioni di temperatura nel tempo (tempo di simulazione considerato 30 anni) nei pozzi produttori risultano sempre inferiori a 2°C , dimostrando l'ottima efficienza termofluidodinamica del campo geotermico in questione e garantendo la sostenibilità della risorsa per lo sviluppo ottimale del progetto di impianto pilota con reiniezione totale del fluido geotermico. Tali risultati sono ovviamente da verificare ulteriormente con i parametri fluidodinamici reali che saranno ottenuti con le prove di caratterizzazione che verranno eseguite sui pozzi di produzione e reiniezione previsti nel progetto.

Alcune indicazioni interessanti emergono dall'analisi delle variazioni di pressione indotte nei pozzi produttori e reiniettori dall'emungimento e reiniezione del fluido geotermico. Nel caso dei pozzi produttori notiamo una depressurizzazione, indotta dall'emungimento del fluido, che raggiunge valori di 7-8 bar in un tempo molto limitato (dell'ordine dei giorni) mentre si attesta attorno a 8-9 bar nell'arco di 30 anni. La reiniezione nei pozzi CG14, CG14A, CG14B e CG14C induce un aumento di pressione nei pozzi di 8-9 bar nei primi giorni di reiniezione, tale incremento tende poi a raggiungere un asintoto a valori di pressione medi compresi tra 10,5 e 13,5 bar. Il ΔP indotto dalla reiniezione tende a scomparire nel raggio di 2 km circa dal polo reiniettivo, e già in un raggio di 1200-1300m risulta inferiore ai 3 bar.

Questi aspetti che emergono dai risultati delle modellazioni potranno costituire una valida indicazione per i tecnici di ITW-LKW ai fini dell'ottimizzazione del progetto dei pozzi geotermici nel campo geotermico di Torre Alfina

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.