

Allegato all'istanza di verifica
di ottemperanza prescrizione A.1) i)



IMPIANTO GEOTERMICO PILOTA CASTEL GIORGIO
Prescrizione VIA A.1 lettera i) e richiesta 1.1.1 della Regione Umbria

Modello strutturale, idrogeologico e idraulico del serbatoio geotermico

1. PREMESSA

Con provvedimento del Ministro dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (MATTM), di concerto con il Ministro dei Beni e delle Attività Culturali e del Turismo, registrazione n. 59 del 3 Aprile 2015, è stato approvato, con prescrizioni, il decreto di compatibilità ambientale relativa al progetto di realizzazione dell'impianto pilota geotermico denominato "Castel Giorgio".

Una di queste prescrizioni, A.1 lettera i, è di seguito trascritta.

- i) Al fine di individuare i rapporti che legano il bacino idrogeologico di alimentazione del serbatoio geotermico e la struttura geolitologica e stratigrafica della copertura del serbatoio stesso, dovrà essere eseguita una ricerca con simica 3D (con densità di stendimenti adeguati alla ricostruzione dell'edificio geostrutturale), con geoelettrica, rilevamenti magnetotellurici e con rilevamenti geochimici sull'acquifero. Tale ricostruzione dovrà permettere la definizione del modello idrogeologico del serbatoio carbonatico, le modalità di ricarica dello stesso, la direzione di riflusso sotterraneo e la compatibilità di utilizzo dei fluidi con il bilancio idrogeologico dei sistemi acquiferi presenti nell'area. Tutto ciò anche al fine di ottimizzare la localizzazione del primo pozzo di reiniezione e di produzione. Gli esiti di tale studio dovranno venire in ottemperanza al Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare.

Inoltre, in allegato allo stesso decreto è riportata la richiesta 1.1.1 di analogo tenore, formulata dalla Regione Umbria, anch'essa trascritta di seguito.

1.1.1 Nella fase esecutiva di realizzazione del progetto la configurazione finale dei pozzi di produzione e di reiniezione dovrà essere effettuata sulla base delle risultanze di un modello idrogeologico del serbatoio carbonatico, che definisca le modalità di ricarica dello stesso, la direzione di deflusso sotterraneo e la compatibilità di utilizzo dei fluidi con il bilancio idrogeologico dei sistemi acquiferi presenti nell'area. Dovranno pertanto essere effettuati test idrodinamici e valutazioni idrogeologiche sui pozzi perforati ed elaborato un modello concettuale e matematico dei sistemi acquiferi, validato dalle Autorità competenti, con la proposta operativa della configurazione finale delle modalità di prelievo e reiniezione dei fluidi per garantire condizioni di equilibrio e sostenibilità dell'utilizzo geotermico.

In relazione al contenuto della prescrizione e della richiesta sopra riportate, si ritiene opportuno ricordare che il campo geotermico di Castel Giorgio – Torre Alfina è stato già oggetto di un'intensa attività di esplorazione geologica, geofisica e geochimica, che ha portato alla perforazione di 10 pozzi profondi (Buonasorte et al., 1988) uno dei quali ha raggiunto la profondità di ben 4826m dal piano campagna (Buonasorte et al., 1989 e 1991). Lo scopo della presente nota è quello di presentare i risultati di un nuovo modello idrogeologico del serbatoio geotermico predisposto dallo Studio Associato GEOTECNA per conto della società scrivente che integra e reinterpreta i dati geofisici, geochimici e geologici dell'esplorazione profonda per valutare che quella proposta nel programma lavori corrisponda all'ubicazione ottimale dei pozzi di produzione e di reiniezione.

2. MODELLO GEOLOGICO-STRUTTURALE DEL CAMPO GEOTERMICO

Gli elementi geologico-strutturali e geotermici principali della zona di Castel Giorgio -Torre Alfina sono riassunti nella Fig. 1, dove sono riportate le isobate del tetto delle rocce carbonatiche del serbatoio geotermico, le relative isoterme e l'estensione approssimativa della cappa di gas presente al tetto del serbatoio.

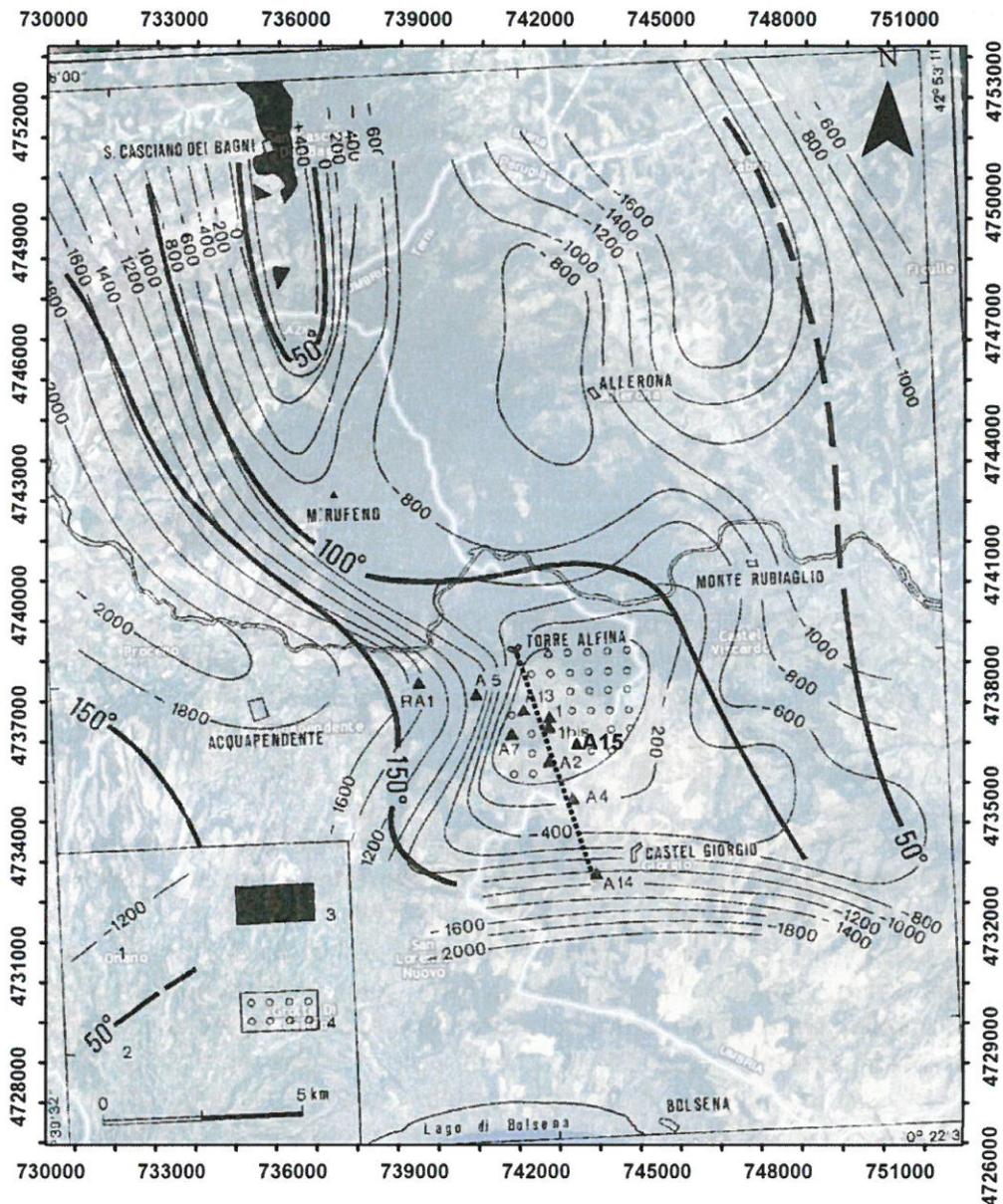


Fig. 1. Principali elementi geologico-strutturali dell'area geotermica Castel Giorgio-Torre Alfina. 1: Isobate del tetto del serbatoio carbonatico (in m s.l.m.), 2: Isotherme al tetto del serbatoio (in °C) 3: Affioramento più vicino delle rocce del serbatoio, 4: Estensione approssimativa della cappa di gas presente nella parte alta del serbatoio, nella parte centrale del campo. È indicata anche l'ubicazione dei pozzi profondi e la traccia della sezione geologica di Fig.2 (linea punteggiata).

Le caratteristiche essenziali del campo geotermico sono riassunte nel profilo geologico riportato nella Fig. 2, prodotto utilizzando i risultati dei pozzi profondi da A13 a A14 (per l'ubicazione vedi Fig. 1).

Il serbatoio geotermico è ospitato nelle rocce carbonatiche Mesozoiche fratturate. La copertura impermeabile è rappresentata dalle unità alloctone flyschoidi di facies Ligure e Austroalpina interna, a loro volta localmente ricoperte dai terreni argilloso-sabbiosi a bassa permeabilità del Neogene e infine dalle vulcaniti quaternarie dei Vulsini, che comprendono anche un piccolo centro eruttivo ubicato proprio nel paese di Torre Alfina.

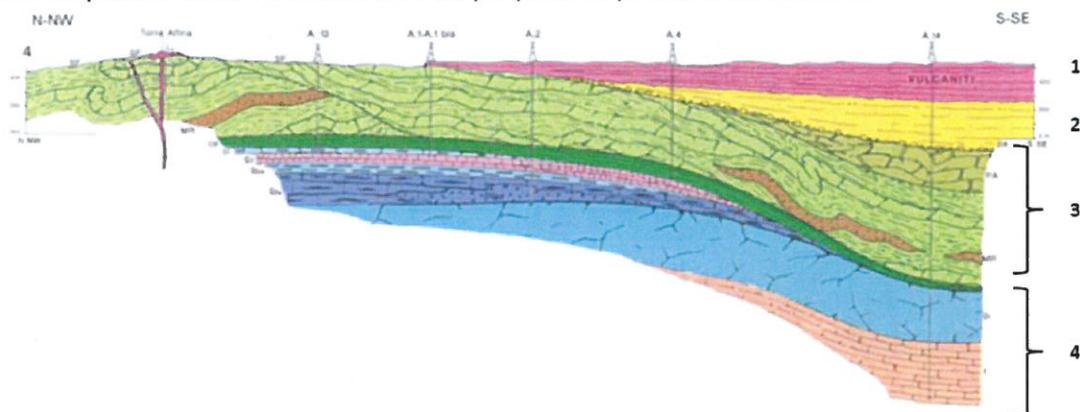


Figura 2. Profilo geologico della zona geotermica tra Torre Alfina e Castel Giorgio (pozzo A14) nel quale sono indicati 1) i terreni vulcanici; 2) le rocce Neogeniche; 3) le rocce dell'unità di facies Ligure e Austroalpina interna (copertura impermeabile); 4) le rocce di facies Toscana (che comprendono il serbatoio geotermico nei calcari fratturati (da Costantini et al., 1984). La traccia del profilo è indicata nella Fig. 1.

Altre importanti informazioni geologico-strutturali sono fornite dal sondaggio A15, perforato nel 1987 fino alla profondità di 4826m dal p.c. (Buonasorte et al., 1989 e 1991). Il sondaggio era stato perforato allo scopo di accertare l'eventuale presenza, al di sotto del serbatoio geotermico presente nelle rocce carbonatiche di facies Toscana, di un secondo serbatoio più caldo, ospitato in rocce metamorfiche, come avviene nei campi geotermici toscani (Larderello, Amiata). In realtà al di sotto delle rocce di copertura delle Liguridi, il sondaggio ha attraversato tre scaglie tettoniche di rocce carbonatiche a "Serie Toscana" non metamorfica, che si sovrappongono ad una successione ancora carbonatica di tipo "Umbro" (Fig.3). La sovrapposizione tettonica di queste unità carbonatiche costituisce un unico serbatoio geotermico di grande spessore (oltre 3700 m), caratterizzato da un gradiente geotermico molto basso ($< 0,3 \text{ } ^\circ\text{C}/10 \text{ m}$) con temperatura variabile da 140°C a 210°C indicativo di una circolazione convettiva dei fluidi.

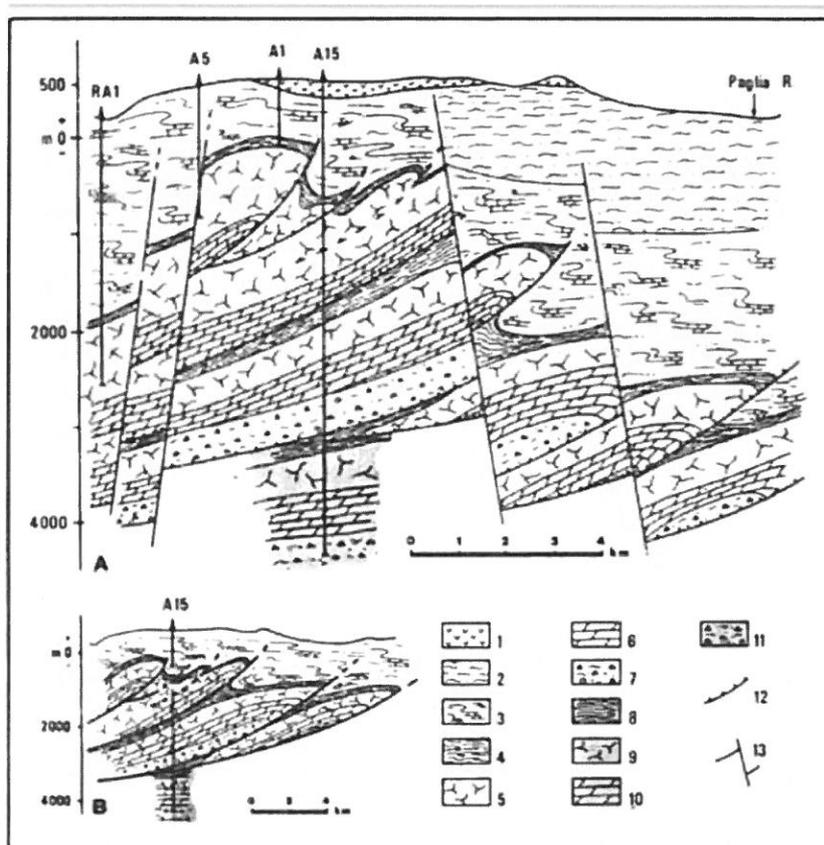


Figura 3. Sezione geologico-strutturale attraverso il campo geotermico di Torre Alfina – Castel Giorgio estrapolata dalla stratigrafia del sondaggio profondo A15. La sezione A rappresenta la situazione strutturale attuale, con la presenza supposta delle faglie tensionali del Miocene Superiore-Pliocene. Si noti che la struttura della zona che va dal pozzo A15 al Fiume Paglia è del tutto ipotetica non essendovi in questa zona pozzi profondi. 1: Vulcaniti Quaternarie, 2: Sedimenti Neogenici, 3: Liguridi, 4-7: Unità Toscana, 8-11: Sequenza Umbra, 12: Overthrust, 13: Faglia tensionale (da Buonasorte et al., 1989).

Il modello geologico strutturale e geotermico dell'area, basato sui dati geologici, geofisici e dei sondaggi profondi è presentato nella Fig.4.

Un aggiornamento di questo modello, è stato eseguito tenendo conto dei risultati del pozzo profondo A15, nell'ambito del nuovo modello idrogeologico del serbatoio riportato in Allegato 1.

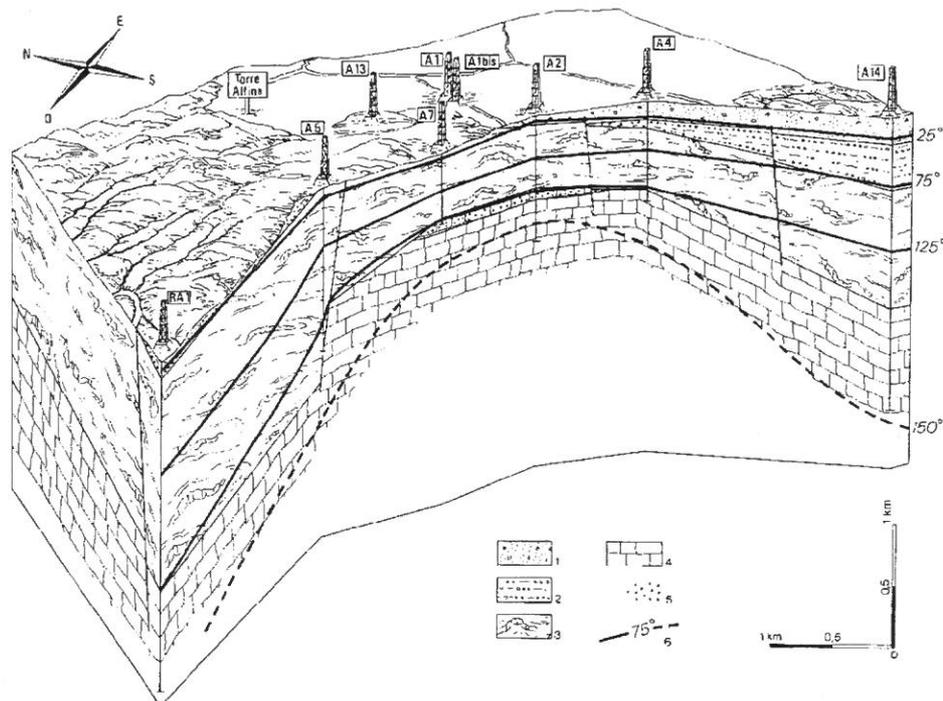


Figura 4. Modello geologico –strutturale dell’area geotermica di Castel Giorgio –Torre Alfina basato sui risultati dei sondaggi profondi. 1: Prodotti vulcanici Quaternari; 2: Depositi marini Neogenici; 3: Copertura impermeabile costituita dai depositi alloctoni del Flysch ligure; 4: Serbatoio geotermico ospitato nei calcari fratturati della serie Toscana; 5: Cappa di gas al tetto del serbatoio nella parte centrale del campo; 6: Isotherme in °C. E’ indicata l’ubicazione dei pozzi geotermici (da Buonasorte et al., 1988).

Nell’insieme questi dati indicano chiaramente che l’area geotermica di Castel Giorgio-Torre Alfina è caratterizzata dalla presenza di un alto strutturale delle rocce carbonatiche del serbatoio, permeabile per fratturazione, legato verosimilmente a strutture di tipo overthrust. Nella parte centrale della struttura, il tetto del serbatoio si trova ad una profondità di soli 500÷600m dal p.c. e la sua parte più alta ospita una cappa di gas (essenzialmente CO₂, prodotta per anni dal pozzo A13).

Al di sopra del serbatoio vi è la formazione impermeabile che agisce come copertura del sistema geotermico, costituita da terreni prevalentemente argillosi dei flysch Liguri. Questa copertura è molto efficace, tanto che solo in un sito, corrispondente alla manifestazione a gas delle Solfanare poco a sud di Torre Alfina, si trova una piccola faglia a direzione NW-SE che mette in comunicazione il serbatoio con la superficie consentendo la risalita di gas (prevalentemente CO₂). Le prospezioni di flusso di CO₂ dal suolo condotte dall’INGV per conto del proponente (vedi Carapezza et al., 2015), hanno dimostrato infatti che solo alle Solfanare si registra un’emissione anomala di gas geotermico, mentre in tutto il resto dell’area il flusso di CO₂ è molto basso, compatibile con un’origine organica da “respirazione” del suolo vegetale.

Le indagini di sismica a riflessione hanno dato scarsi risultati perché la penetrazione è stata debole a causa della presenza della copertura di rocce vulcaniche (Buonasorte et al., 1995).

I risultati di tre profili di sismica a rifrazione, uno dei quali interessa l'area geotermica di Castel Giorgio – Torre Alfina, sono stati pubblicati da Biella et al. (1987) e da Amato et al. (1991) (vedi ubicazione in Fig. 5).

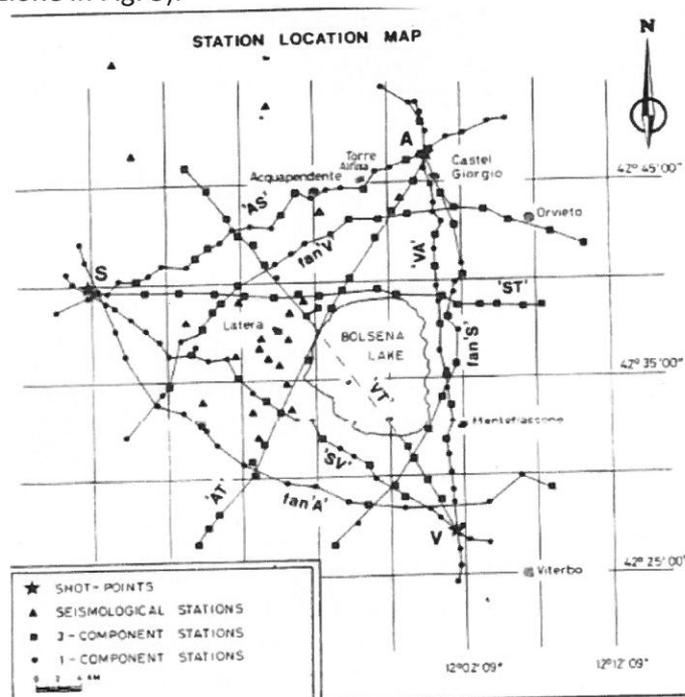


Figura 5. Ubicazione dei profili di sismica a rifrazione e delle stazioni sismiche (da Biella et al., 1987). Il profilo S-A è quello che passa attraverso l'area geotermica del progetto.

Il modello sismico ottenuto e la relativa interpretazione geologica (vedi Fig.6), confermano chiaramente la presenza dell'alto strutturale delle rocce carbonatiche del serbatoio nella zona di Torre Alfina. Dall'alto verso il basso, sono stati distinti tre livelli sismici:

- un livello superficiale con velocità delle onde P di 4,1-4,5 km/s (4,3 km/s a Torre Alfina), corrispondente sia alle rocce vulcaniche sia a quelle del flysch alloctono che non sono distinguibili dalla sismica a rifrazione per l'esiguo spessore del vulcanico
- un livello intermedio con V_p di 5,3-5,9 km/s (5,4-5,6 km/s a Torre Alfina), corrispondente alle formazioni carbonatiche Mesozoiche (serbatoio geotermico); la geometria irregolare del tetto di questo livello corrisponde alla struttura tettonica dell'area (es. horst di Torre Alfina).
- un livello profondo ad andamento piatto che comincia a circa 5 km di profondità nella zona di Torre Alfina, caratterizzato da V_p da 6,8 a 7,1 km/s, corrispondente verosimilmente al basamento metamorfico.

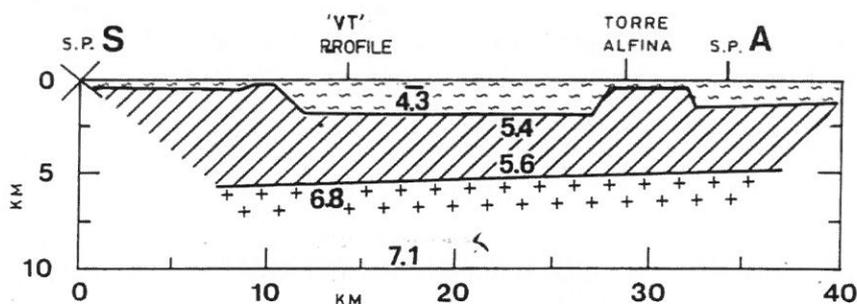


Figura 6. Modello sismico e interpretazione geologica del profilo S-A di sismica a rifrazione. 1: copertura vulcano-flyschoidale, 2: rocce carbonatiche del serbatoio, 3: basamento metamorfico ad alta V_p (modificata da Biella et al., 1987).

Altri risultati utili al modello sismico-strutturale della zona si ricavano dagli studi di tomografia sismica condotti nella regione dell'Amiata – Vulsini comprendente anche la zona di Torre Alfina (Chiarabba et al., 1995). Invertendo i tempi di arrivo di terremoti registrati dalle reti microsismiche locali nel periodo 1977-1992, è stata ricostruita la struttura tridimensionale delle velocità delle onde P. Il modello 3D delle velocità delle onde P in quattro livelli crostali (layer 1, 2, 3, 4 alla profondità di rispettivamente 1,3,5 e 7 km) è mostrato nella Fig.7, nella quale la zona di Torre Alfina è collocata circa a 1/3 della congiungente Lago di Bolsena – M. Amiata. Nei primi 3 km, che sono in parte ben conosciuti dai dati dei pozzi geotermici profondi, le variazioni di velocità sono determinate dalle strutture in alti e bassi (horst e graben) delle rocce carbonatiche che ospitano il principale serbatoio geotermico.

A Torre Alfina si osserva un'anomalia positiva di velocità la cui geometria corrisponde bene all'andamento dell'alto strutturale dei carbonati sepolti (confronta Fig. 4 e Fig. 6), mentre velocità più basse corrispondono ai terreni di copertura (flysch e depositi vulcano-sedimentari). Il tetto del serbatoio carbonatico corrisponde ad un'isolinea di $V_p = 4,8$ km/s e le alte velocità tra 1 e 3 km corrispondono alla struttura positiva dei carbonati che, come abbiamo visto, è composta da varie unità tettoniche sovrapposte fino ad almeno 5 km di profondità. Questo spiega anche perché non è stato osservato alcun contrasto di velocità a 5 km di profondità sotto il campo geotermico di Torre Alfina. Verso nordovest, un'area a bassa velocità è in relazione al forte spessore dei depositi di flysch (zona RA1 in Fig.8).

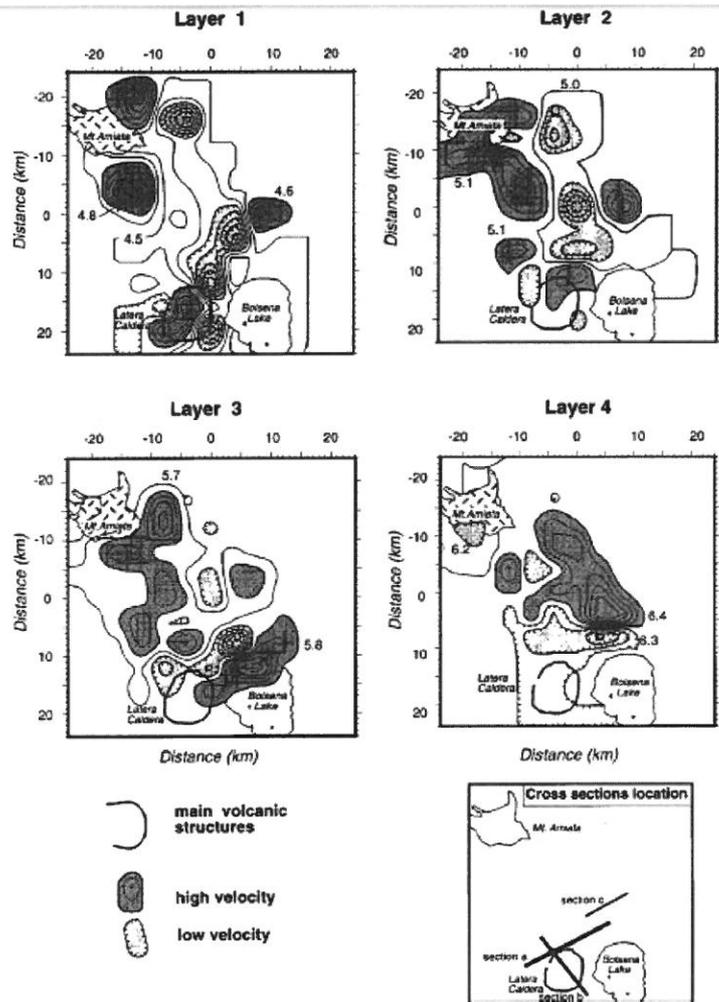


Figura 7. Modello tridimensionale della velocità delle onde P in quattro livelli crostali (profondità 1,3,5 e 7 km) (da Chiarabba et al., 1995).

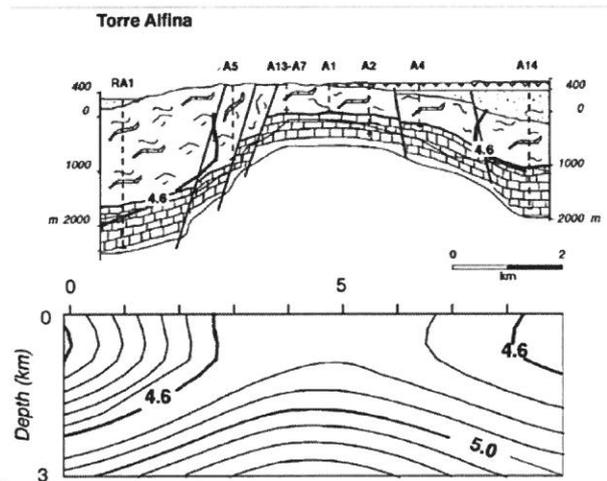


Figura 8. Sezione verticale di tomografia sismica e modello geologico dell'area geotermica di Torre Alfina. L'isolinea $V_p = 4,8$ km/s marca il tetto dei carbonati Mesozoici che ospitano il

serbatoio geotermico (modificato, da Chiarabba et al., 1995).

3. CONDIZIONI IDRAULICHE DEL FLUIDO GEOTERMICO NEL SERBATOIO DI CASTEL

GIORGIO - TORRE ALFINA

Nel seguito si prende in esame lo stato del serbatoio geotermico di Castel Giorgio - Torre Alfina con l'obiettivo di accertare l'esistenza di differenze nei valori della pressione di strato tra punti diversi del serbatoio geotermico. L'obiettivo è verificare se esistono condizioni fisiche per l'instaurarsi di un movimento del fluido geotermico di entità apprezzabile e quindi potenzialmente in grado di interferire con il processo industriale di sfruttamento.

3.1 Analisi dello stato fisico e comportamento dei pozzi

Parte del tetto del serbatoio è interessato dalla presenza di una cappa di gas la quale conferisce localmente alle stesse caratteristiche del tutto particolari in termini di pressione. Altrove, in particolare nella zona di Castel Giorgio, il serbatoio si comporta in condizioni statiche come un acquifero senza che il contenuto di gas (in prevalenza CO₂), peraltro totalmente disciolta nel liquido, abbia influenza sulla pressione alla testa dei pozzi che connettono il serbatoio con la superficie.

Questo dato trova piena conferma sperimentale nel comportamento dei pozzi Alfina 4 e Alfina 14 (nel seguito A4 e A14), pozzi che dopo decenni dal termine della perforazione e delle prove di emungimento effettuate da Enel, si sono sempre mantenuti con pressione (effettiva) nulla a testa pozzo, condizione che esprime equilibrio idrostatico all'interno di ciascuno di essi.

La ragione fisica di questo comportamento risiede nel fatto che, geometricamente, il rapporto tra il diametro dei pozzi e la loro lunghezza (profondità) è talmente basso che il gradiente di concentrazione del gas disciolto nel fluido del serbatoio è tale per cui il movimento di gas che si determina nei pozzi è insignificante e comunque lontanissimo dai valori che potrebbero provocare l'innescio spontaneo della produzione di fluido geotermico. Nell'analisi che segue si utilizzano i dati rilevati da misure nei pozzi effettuate negli anni antecedenti la loro chiusura mineraria, avvenuta a fine 2013, per ricavare alcune grandezze fisiche che caratterizzano lo stato del serbatoio geotermico in corrispondenza dei due pozzi A4 e A14 che corrispondono rispettivamente al polo produttivo e a quello re iniettivo del progetto Castel Giorgio.

I due pozzi realizzavano la connessione tra la superficie e lo stesso serbatoio geotermico, a partire da due profondità differenti, rispettivamente a 830m e 2050m circa, dove erano state incontrate fratture.

Periodicamente sono state fatte misure di controllo della temperatura e della pressione lungo l'asse dei pozzi dal piano campagna fino alla loro profondità massima di agibilità. Nel seguito ci si riferisce in particolare ai rilievi del settembre 2003 disponibili presso , dopo circa 30 anni dalla fine delle operazioni di perforazione, quando, senza ombra di dubbio, i due pozzi erano in equilibrio con il serbatoio geotermico.

Dai rilievi del settembre 2003 disponibili presso la Regione Umbria, risulta che nel pozzo A4 la pressione a circa 825m dal piano campagna (cioè a $-825 + 530 = -295$ m dal livello del mare), agli effetti pratici coincidente con la prima e unica frattura produttiva incontrata poco sotto il contatto tra copertura flyschoidale e serbatoio, è esattamente 6,20 MPa con un livello in pozzo determinabile a circa 173m.

Il pozzo Alfina 14 ha raggiunto il serbatoio ad una profondità sensibilmente superiore, circa 1600m. In esso il livello idraulico in pozzo è determinabile a circa 230m, quindi circa 57m più profondo, rispetto al proprio piano campagna, che in A4. Tuttavia i due valori di livello

statico dal piano campagna non sono direttamente confrontabili perché la profondità della frattura più alta (la “prima”) determina condizioni diverse di temperatura della colonna che rendono difficile il confronto in termini di densità media della colonna.

E' stata allora presa a riferimento la pressione misurata alla profondità di circa 825m in A4 (assunta per semplicità corrispondente a quella della frattura di 830m) e a 2050m in A14, cioè in corrispondenza della prima frattura incontrata in ciascuno dei due dove pozzi è quindi certa la connessione con il serbatoio. Il raffronto tra i due valori di pressione fornisce un'indicazione molto precisa della differenza di pressione idrostatica a parità di tale quota slm in entrambi i pozzi.

La quota slm del piano campagna di A14 è pari a 535m; alla profondità di 2050m dal piano campagna, in prossimità della prima frattura incontrata dal pozzo, è stata valutata una pressione di 17,465MPa, valore ottenuto interpolando linearmente quelli misurati a 2000 e 2100m.

Questi rilievi di pressione hanno particolare importanza sia per la notevole precisione dello strumento utilizzato per la rilevazione, sia perché, come detto sopra, sono rappresentativi delle condizioni statiche del sistema pozzo – serbatoio e permettono di accertare la pressione in due zone distinte del serbatoio poste alla stessa quota sul livello del mare, quindi su uno stesso piano orizzontale.

La pressione sulla verticale di **A4** alla stessa profondità di 2050m rispetto ad A14 (ovvero a 2045m dal piano della postazione A4) si può ritenere con buona approssimazione pari alla somma della pressione rilevata a 825m (in pratica la profondità della frattura), sempre in A4, e quella dovuta al carico idrostatico tra 825 e 2045m. Tale carico è noto perché il campo è costituito da un acquifero alla temperatura di 140°C. Cioè $6,20\text{MPa} + 925,92 \cdot (2045 - 825) \cdot 1.003 \cdot 9,81 / 1.000.000 = 17,3\text{MPa}$, essendo $925,92\text{kg/m}^3$ la densità dell'acqua alla temperatura di 140°C e 1.003 il fattore correttivo della densità dovuto alla salinità della soluzione. Per la precisione si nota che eventuali modeste differenze di temperatura, anche dell'ordine di $\pm 5^\circ\text{C}$, non sarebbero in grado di produrre variazioni apprezzabili del valore della densità dell'acqua considerato nel calcolo.

La differenza tra la pressione misurata in **A14** alla profondità di 2050m e quella stimata in A4 alla stessa profondità (2045m dal piano campagna) risulta $17,465 - 17,3 = 0,16\text{MPa}$.

Ai fini del bilancio idrogeologico del serbatoio geotermico, in assenza di disturbi del campo, la zona del serbatoio dove è ubicato il polo reiniettivo risulta pertanto leggermente pressurizzata rispetto a quella del polo produttivo.

3.1.1 Piezometrie

Sulla base dei valori di pressione di cui sopra possono essere determinate le piezometriche in corrispondenza dei pozzi A4 e A14. Dal momento che la colonna idrostatica ha, fisicamente, una temperatura e una densità variabili lungo la sua altezza, si assume come riferimento la densità $925,92\text{kg/m}^3$ conseguente alla temperatura di 140°C. Il risultato è il seguente:

- piezometrica in A14 a 2050m dal p.c., $2050 - (17,465 \cdot 10^6 / (9,81 \cdot 925,92)) = 2050 - 1922,7 = 127,2\text{m}$ dal piano campagna A14 (535m slm), ovvero 408m slm

- piezometrica in A4 a 2045m (corrispondente a 2050m dal piano di A14) = $2045 - (17,30 \cdot 10^6 / (9,81 \cdot 925,92)) = 2045 - 1905 = 140\text{m}$ ovvero 390m slm; la differenza tra le due piezometriche risulta di 18m di colonna d'acqua alla temperatura del serbatoio.

Considerato che nelle varie carte la quota sul livello del mare è indicata con valori talvolta leggermente diversi e del diverso allungamento termico tra condizioni di perforazione e stato

dei pozzi al momento delle misure, i valori di cui sopra sono stati arrotondati a **391m** per A4 e a **409m** per A14.

4. Modello idrogeologico del serbatoio carbonatico

In Allegato 1 è riportato il modello idrogeologico del serbatoio geotermico ottenuto utilizzando un modello matematico che riproduce il campo come risulta dai vari lavori pubblicati sia dall'Enel che da altri autori e utilizzando valori di permeabilità in linea con quelli che mediamente si riscontrano nelle litologie incontrate e, per quanto riguarda il serbatoio carbonatico, gli stessi valori impiegati nella simulazione numerica riportata in Allegato 3 del Progetto Definitivo Castel Giorgio utilizzato nella procedura di VIA.

Il codice di calcolo impiegato è il MODFLOW. Esso prevede di utilizzare un unico tipo di fluido a temperatura costante, pertanto il fluido geotermico è stato simulato con acqua a 140°C avente densità di 925,92kg/m³ e, analogamente, per la viscosità dell'acqua richiesta dal codice, è stata assunta quella che corrisponde alla temperatura del serbatoio; inoltre si è fatto riferimento ad un ulteriore scenario di ricarica che prevede apporto di acqua dalla struttura elevata del M.Cetona secondo l'ipotesi avanzata da Buonasorte ed al., 1988.

Per lo sviluppo del calcolo di simulazione è stato ricostruito il modello geologico del sottosuolo, fino alla profondità di circa 3500 m, con il quale sono stati definiti i rapporti fra le varie formazioni geologiche e soprattutto la geometria del serbatoio geotermico che risulta compartimentato in due sottoserbatoi da una formazione geologica intermedia a più bassa permeabilità.

Per la descrizione delle condizioni al contorno del modello litologico, del sistema di faglie, dei valori assunti per il "potenziale imposto" e delle proprietà idrauliche considerate si rimanda direttamente all'Allegato 1.

Su queste basi è stato costruito lo stato stazionario (ante disturbo per l'attività industriale). L'infiltrazione, nell'ambito del complesso il vulcanico di superficie, è stata messa in conto con un valore efficace di 230mm annui. Le isopieze relative sono riportate nella Fig. 18 dell'Allegato 1.

4.1 Scenari analizzati

Un primo scenario analizzato considera l'ipotesi che l'acqua nel serbatoio scorra da Nord verso Sud con riferimento al lavoro di Buonasorte et al., 1988. In esso si ipotizza che il flusso di acqua abbia origine dal M. Cetona e che determini le piezometriche riportate in Fig. 3 dell'Allegato 1. In effetti, questo scenario è stato considerato prevalentemente per ragioni di completezza e di valutazione della sensitività della modellazione. In questo scenario viene preso a riferimento il livello di acqua rilevato nel pozzo A14 (circa 305m slm) e assunto questo valore come piezometrica perché coincidente con la isoipsa 300m. Assunto ragionevolmente un gradiente medio dell'1%, sulla base del livello in A14 viene stabilito anche il livello in A4 che risulta di 323m slm, valore effettivamente non molto diverso dal livello riscontrato in pozzo.

Questi due valori del livello di acqua nei pozzi Alfina 4 e Alfina 14 sono assunti come riferimento per la calibrazione del modello, ottenuta variando i carichi di ingresso da Nord e di uscita Sud, rispetto all'area modellata, fino a raggiungere un grado di confidenza del 96% (Fig. 20 dell'Allegato 1) e utilizzando le piezometrie di Fig. 21 di Allegato 1 che caratterizzerebbero, nelle ipotesi fatte, l'acquifero del carbonatico.

Il disturbo dovuto alla coltivazione, arrecato allo stato stazionario dai prelievi attraverso i pozzi produttivi e la reiniezione nei pozzi reiniettivi, è stato riferito per uniformità con il Progetto Definitivo e con le precedenti valutazioni alla portata di 1050t/h che è conservativa rispetto alla soluzione finale.

Per meglio simulare geometricamente nello spazio l'ubicazione delle zone di prelievo dei pozzi produttivi i rami deviati sono stati suddivisi in 5 tratti attribuendo a ciascuno dei quali una portata pari a 1/5 del valore di progetto.

Nei pozzi reiniettivi deviati, essendo i singoli rami deviati troppo lunghi per adottare per ciascuno di essi lo stesso criterio, il ramo deviato open hole è stato ubicato in posizione intermedia tra la verticale e il fondo pozzo.

I risultati della simulazione evidenziano uno scambio tra acquifero vulcanico e profondo che non viene alterato dall'esercizio del campo e che è dominato esclusivamente dalle condizioni di isolamento del flysch.

Al cap. 6. dell'Allegato 1 è riportata la distribuzione della portata di fluido nel serbatoio carbonatico durante l'esercizio del campo e quindi le variazioni che, in condizioni stazionarie, si verificano negli scambi sui fronti Nord e Sud a seguito dell'interscambio tra i poli produttivo e reiniettivo.

L'abbassamento di pressione che si verifica nella zona dei pozzi produttivi risulta 90m di colonna d'acqua con un massimo di 110m, pari a 10bar.

L'aumento di pressione massimo che si verifica nella zona del polo reiniettivo risulta 110m di colonna d'acqua con un massimo di 130m, pari a 12bar.

Il transitorio iniziale ha una durata effettiva di circa un anno; per i dettagli dello studio del transitorio legato allo scenario considerato si rimanda comunque all'Allegato I.

Il fluido ricircolato tramite i pozzi di reiniezione e che raggiunge i pozzi di estrazione è circa il 65% di quanto estratto; il restante 35% viene fornito dall'ingresso di ulteriore acqua da Nord.

4.2 Secondo scenario

Questo scenario prevede un flusso di fluido nel serbatoio da Sud verso Nord ed è più realistico del precedente in quanto prende in esame la condizione fisica del serbatoio carbonatico così come risulta dai rilievi periodici eseguiti dall'Enel e comunicati alla Regione Umbria. In particolare ci si riferisce ai dati raccolti nel 2003 dai quali si può dedurre la pressione esatta a una stessa profondità in corrispondenza di entrambi i pozzi A4 e A14, come sopra riportato (vedi Piezometrie, capitolo 3.1.1).

La calibrazione del modello per definire lo stato stazionario è stata fatta, al solito, variando le condizioni fino a riprodurre in A4 e A14 la piezometrica che si deduce dalle misure fatte nei pozzi medesimi, con un grado di confidenza del 95% (vedi Fig. 32 dell'All. 1). Ovviamente la piezometrica in questione è quella che compete alla colonna idrostatica avente la temperatura del serbatoio, quindi densità $925,92\text{kg/m}^3$, e con riferimento alle determinazioni precedentemente descritte nel cap. 3.1.1, 409m slm in A14 e 391m slm in A4. Il fluido ricircolato tramite i pozzi di reiniezione, e che raggiunge i pozzi di estrazione, è circa il 75% della portata estratta; il restante 25% viene fornito dall'ingresso di ulteriore fluido da Sud.

I **risultati** della simulazione confermano che:

- la riduzione di pressione intorno ai pozzi produttivi rimane nell'intorno 90-110m di colonna d'acqua a 140°C equivalente a $8 - 10\text{kg/cm}^2$ (0,78 – 0,98 MPa);

- la pressurizzazione intorno ai pozzi reiniettivi rimane nel range 110-130m di colonna d'acqua a 140°C equivalente a 10 -12kg/cm² (0,98 – 1,17MPa).

E' interessante osservare che:

- i valori di depressione 8 e 10kg/cm² sono in linea con i risultati della simulazione riportata in All. 3 del Progetto Definitivo;

- il valore massimo di depressurizzazione, 10kg/cm², ha carattere puntuale essendo limitato ad un solo pozzo;

- anche il valore massimo di sovrappressione, 12kg/cm², è allineato ai risultati ricavati con la simulazione riportata in All. 3 del Progetto Definitivo dopo 30 anni di esercizio dell'impianto.

Infine si osserva che dopo meno di un anno (250 giorni) dall'arresto dell'esercizio dell'impianto, il sistema ha ripristinato le condizioni iniziali.

4.3 Conclusioni

La modellizzazione è stata eseguita sia sullo scenario 2, che trae origine da precise osservazioni e misure nei pozzi di osservazione disponibili fino al 2013, quindi è sicuramente realistico, sia sullo scenario 1. Quest'ultimo, completamente diverso dal primo, risponde all'esigenza di prendere in esame un ampio campo di variabilità del gradiente di pressione nel serbatoio carbonatico fino a valori tali da permettere un'inversione del flusso dell'acqua geotermica.

La simulazione numerica dimostra la sostenibilità dei prelievi nel lungo periodo in entrambe le situazioni esaminate e mette in evidenza che la realizzazione del progetto non produce effetti sul bilancio idrogeologico della falda idropotabile presente nell' acquifero vulcanico che è separato dal serbatoio geotermico da un consistente spessore di sedimenti flyschoidi con bassissima permeabilità che rende i due sistemi idrogeologici indipendenti agli effetti pratici.

Infine, si fa osservare che alcuni rilievi richiesti dalla prescrizione A.1.i) possono essere eseguiti o trovare conferma solo a seguito della perforazione dei pozzi profondi (rilevamenti geochimici sugli acquiferi, verifica delle caratteristiche litologiche delle formazioni attraversate, caratteristiche idrogeologiche dell'acquifero geotermico).

Una volta acquisiti i nuovi dati scientifici e tecnici sul serbatoio, in particolare nel caso in cui emergessero informazioni anche solo parzialmente difformi rispetto a quanto già noto dalle attività svolte in passato dall'Enel, per la ricostruzione della struttura del serbatoio saranno programmate prospezioni geofisiche in aggiunta a quelle già realizzate in passato utilizzando tecniche di prospezione (sismica 3D, geoelettrica, magnetotellurica, ecc.) compatibili con la situazione geologica realmente incontrata, in particolare della presenza e spessore delle vulcaniti.

Si osserva inoltre che i test previsti nella risposta alla prescrizione A.2.a), alla quale si rimanda per maggiori dettagli, in particolare le prove di simulazione della reiniezione, potrebbero offrire indicazioni per modificare l'ubicazione del target di fondo pozzo di alcuni pozzi reiniettivi ottimizzando quella prevista in progetto, pur mantenendo inalterato il programma di perforare tutti i pozzi reiniettivi dalla stessa postazione CG14.

Riferimenti Bibliografici

- AMATO A., BIELLA G., DE FRANCO R. (1991). *Velocity structure of the Vulsinian Volcanic Complex (Latium, Italy) from seismic refraction data and three-dimensional inversion of travel times*. J. Geophys. Res., 96, 517-535.
- BIELLA G., DE FRANCO R., LOZEJ A., AMATO A. (1987). *Is there a shallow body of lower crust under the Vulsinian Volcanic Complex?* Per. Mineral. 56, 303-318.
- BUONASORTE G., CATALDI R., CECCARELLI A., COSTANTINI A., D'OFFIZZI S., LAZZAROTTO A., RIDOLFI A., BALDI P., BARELLI A., BERTINI G., BERTRAMI R., CALAMAI A., CAMELI G., CORSI R., DACQUINO C., FIOREDELISI A., GHEZZO A., LOVARI F., (1988). *Ricerca ed esplorazione nell'area geotermica di Torre Alfina (Lazio Umbria)*. Boll. Soc. Geol. It. 107, 265-337.
- BUONASORTE G., FIOREDELISI A., PANDELI E. (1989). *Deep exploration in the Torre Alfina geothermal field (Italy): the test hole Alfina 15*. European geothermal update, 98-108.
- BUONASORTE G., ENRICO P., ADOLFO F. (1991). *The Alfina 15 well: deep geological data from northern Latium (Torre Alfina geothermal area)*. Boll. Soc. Geol. It., 110, 823-831.
- BUONASORTE G. et al. (1995). *Seismic reflection in the Bolsena lake : a contribution to the knowledge of a caldera controlled geothermal system*. World Geothermal Congress, Florence, Italy.
- CARAPEZZA M.L., RANALDI M., GATTUSO A., PAGLIUCA N., TARCHINI L. (2015). *The sealing capacity of the cap rock above the Torre Alfina geothermal reservoir (Central Italy) revealed by soil CO₂ flux investigation*. J. Volcanol. Geotherm. Res. 291, 25-34.
- CHIARABBA C., AMATO A., FIOREDELISI A. (1995). *Upper crustal tomographic images of the Amiata-Vulsini geothermal region, Central Italy*. J. Geophys. Res., 100, 4053-4066.
- COSTANTINI A., GHEZZO C., LAZZAROTTO A. (1984). *Geologic map of the Torre Alfina geothermal field, Siena, Viterbo and Terni provinces*. Boll. Soc. Geol. It., 107.
- TERRA ENERGY (2013). *Modellizzazione numerica del sistema geotermico di Castel Giorgio (TR)*. Rapporto per ITW&LKW Geotermia Italia spa
- TERRA ENERGY (2014). *Modellizzazione numerica del sistema geotermico di Torre Alfina-Castel Giorgio*. Rapporto per ITW&LKW Geotermia Italia spa