



METODI DI ESPLORAZIONE DI SISTEMI GEOTERMICI A MEDIA E ALTA ENTALPIA

Adele Manzella

CNR - Dipartimento Scienze del Sistema Terra e Tecnologie per l'Ambiente

Istituto di Geoscienze e Georisorse

vigor@igg.cnr.it

www.vigor-geotermia.it



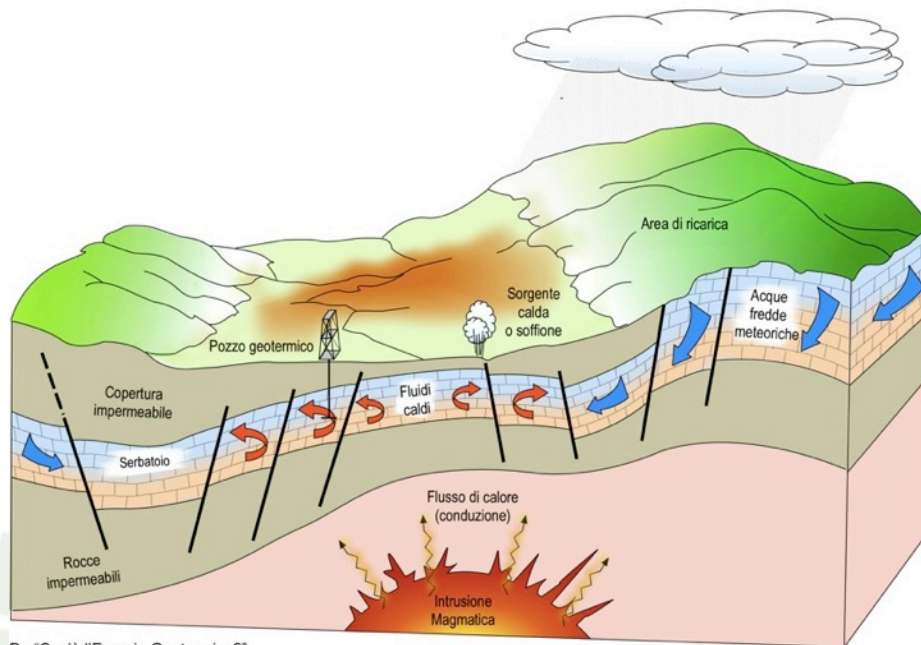
Consiglio Nazionale delle Ricerche
DTA



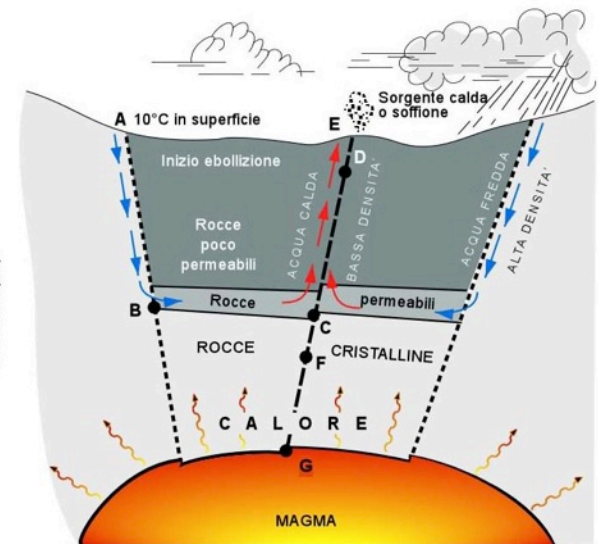
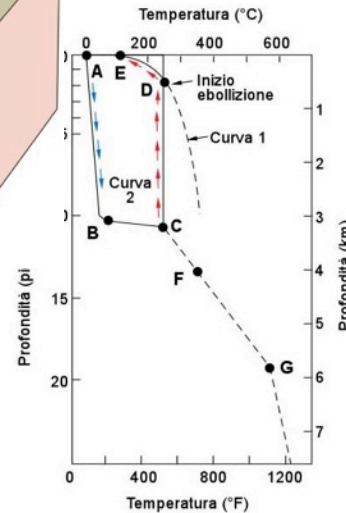
Programma Operativo Interregionale
ENERGIE RINNOVABILI E
RISPARMIO ENERGETICO
2007 - 2013
Una scelta illuminata



Funzionamento di un sistema geotermico



Da "Cos'è l'Energia Geotermica?"
IGA
<http://iga.igg.cnr.it/geo/geoenergy.php?lang=it>



www.vigor-geotermia.it





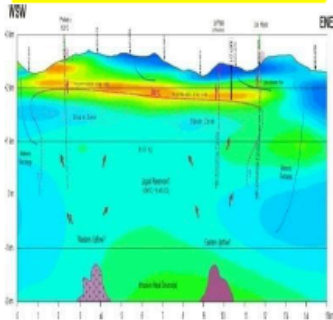
Fasi di un progetto geotermico

ESPLORAZIONE

PERFORAZIONE
POZZI

COSTRUZIONE
IMPIANTI

ESERCIZIO &
MANUTENZIONE
IMPIANTI



Valutazione, mitigazione e monitoraggio ambientale

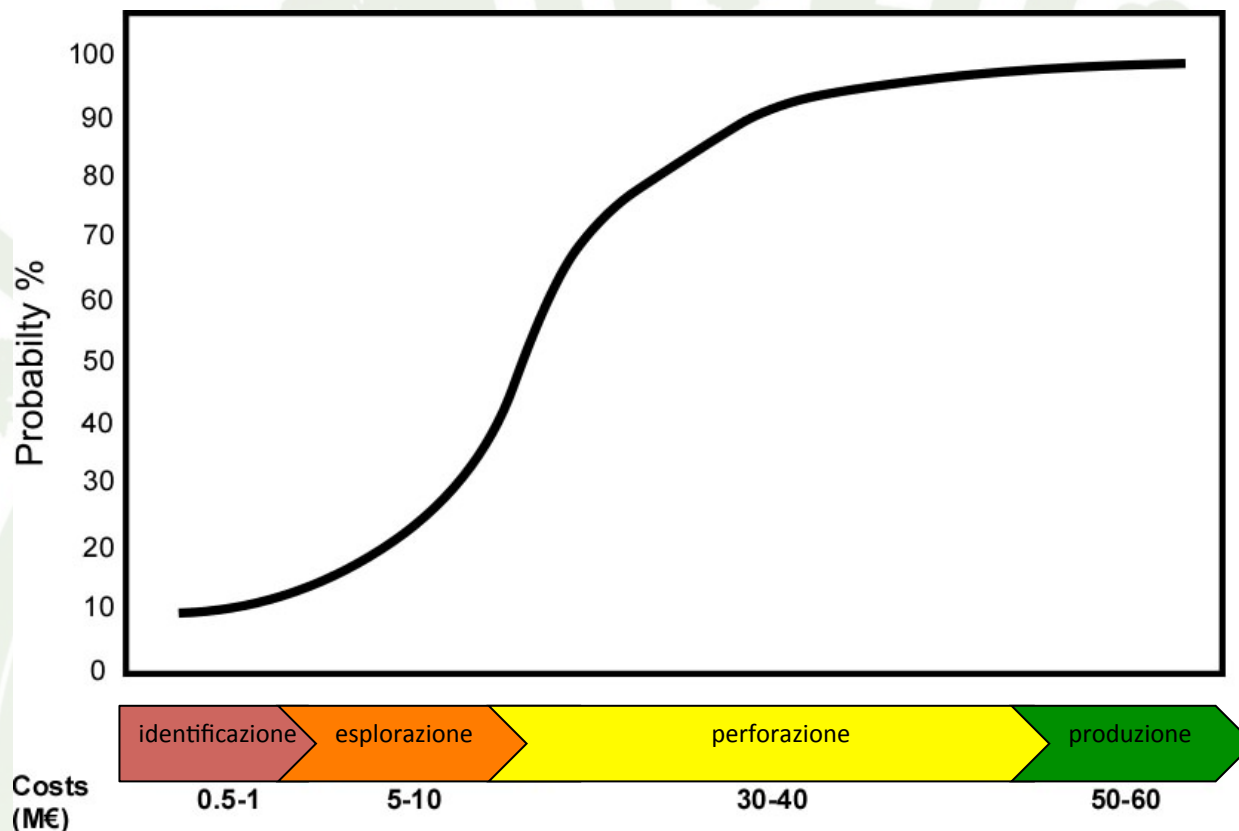
(Modificato da ENEL)

www.vigor-geotermia.it





Importanza dell'esplorazione



www.vigor-geotermia.it



Consiglio Nazionale delle Ricerche
Dipartimento Terra e Ambiente



Programma Operativo Interregionale
ENERGIE RINNOVABILI E
RISPARMIO ENERGETICO
2007 - 2013
Una scelta illuminata



Risorsa Geotermica

L'investigazione di un sito richiede di definire chiaramente le condizioni ed i criteri per una utilizzazione produttiva e sostenibile da sistemi idrotermali.

La produzione geotermica è definita dalla relazione:

$$P_{THERM} = Q \cdot [\rho c_P]_f \cdot (T_{PROD} - T_{REINJ})$$

dove

- P_{THERM} la potenza termica prodotta;
- T_{PROD} la temperatura di produzione,
- T_{REINJ} la temperatura di reiniezione,
- $[\rho c_P]_f$ la capacità termica del fluido (approx. $4.2 \times 10^6 [J \cdot m^{-3} \cdot K^{-1}]$ per un serbatoio a liquido-dominante),
- Q la portata [$m^3 \cdot s^{-1}$].

Si vede chiaramente che la produttività termica di un impianto aumenta linearmente con la temperatura e la portata.

www.vigor-geotermia.it





Cosa individuare

Campo di Temperatura:

- Generalmente aumenta tra $20 - 30 \text{ K}^\circ \text{ km}^{-1}$
- In situazioni specifiche il gradiente $> 100 \text{ K}^\circ \text{ km}^{-1}$
- Fattore più importante per un sistema geotermico utilizzabile
- Occorre tener presente le temperature di produzione per le tecnologie di conversioni efficienti (minimo $\sim 85^\circ\text{C} - 100^\circ\text{C}$).
- Determina le necessarie profondità di perforazione, che a loro volta determinano sensibilmente i costi (relazione profondità di perforazione e costi non lineare)

Portata:

- La produttività di un sistema geotermico aumenta con la portata.
- La permeabilità è un parametro molto variabile da $< 10^{-18} \text{ m}^2$ fino a $> 10^{-12} \text{ m}^2$.
- Alte permeabilità spesso comportano convezione
- Portate tipiche tra 10 kg/s fino a $> 100 \text{ kg/s}$
- Se troppo alta aumenta incredibilmente il consumo energetico delle pompe

Focus preferenziale in aree con

- Alta permeabilità naturale
- Alta temperatura

Regime di Stress:

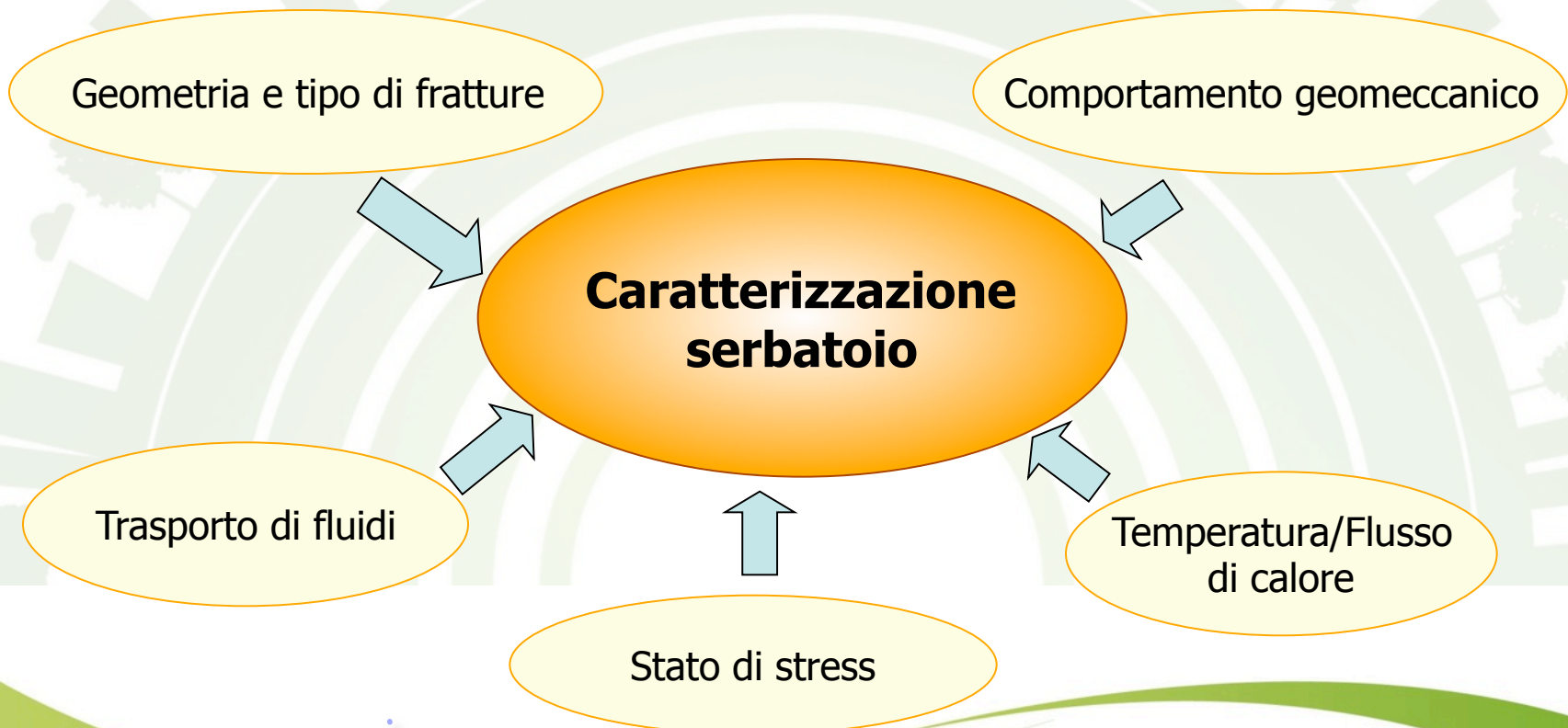
Importante per perforazione, reiniezione e stimolazione





Obiettivi da raggiungere con l'esplorazione

Per capire il potenziale geotermico di un serbatoio occorre definire alcune importanti proprietà



www.vigor-geotermia.it



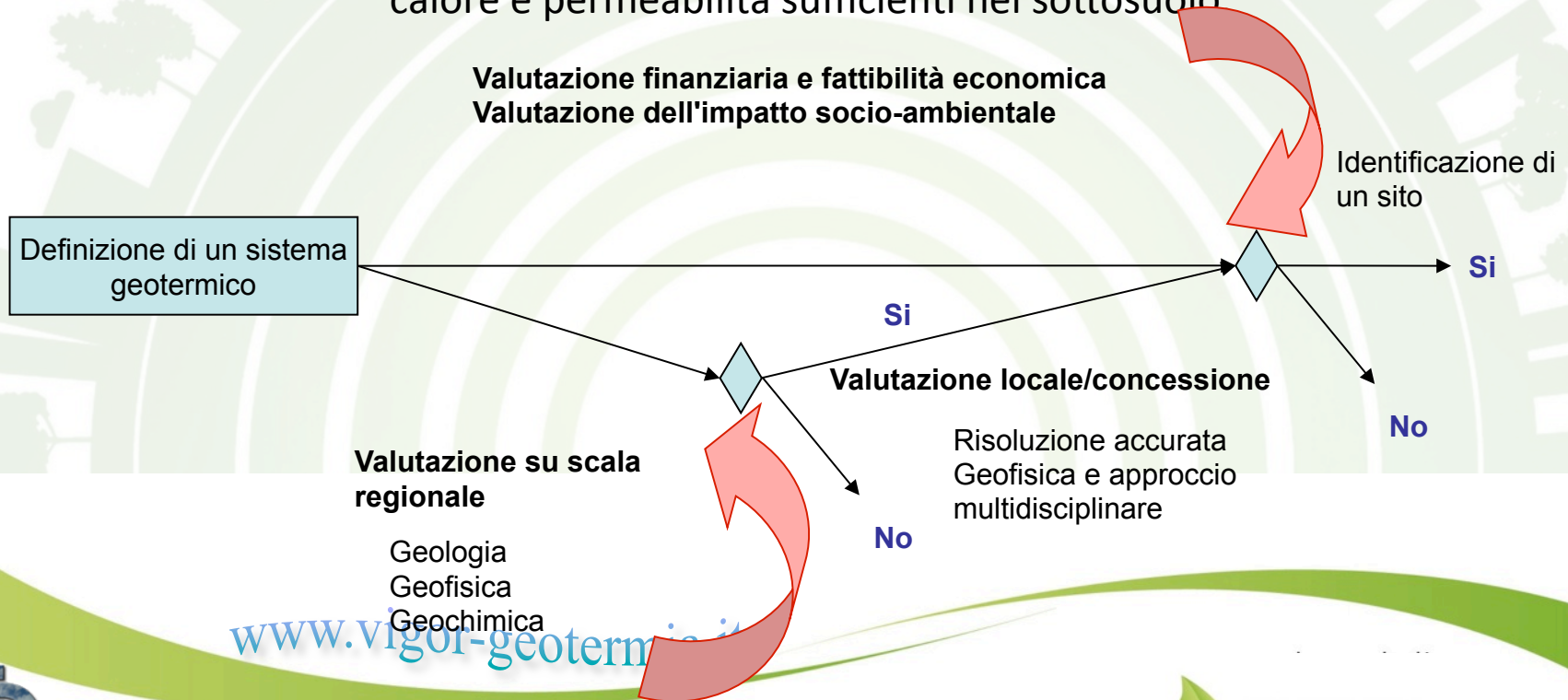


Individuazione del sito

Non è corretto indicare una specifica sequenza di sondaggi come applicabile a tutti i serbatoi potenziali.

Entro certi limiti la scelta del metodo dipende dall'accessibilità (costo).

Dopo l'acquisizione di una serie di diversi e dettagliati dati geofisici dovremmo arrivare ad avere un set convincente di indicazioni che evidenzino la presenza di calore e permeabilità sufficienti nel sottosuolo



www.vigor-geotermia.it





Individuazione del sito

I. A scala continentale

OBIETTIVO: Panoramica qualitativa del potenziale geotermico in un continente

- Definizione di zone d'interesse
- Modelli termo-meccanici della crosta
- Neo-tettonica

II. A scala regionale

OBIETTIVO: Quantificazione e rappresentazione del potenziale geotermico in una data zona geologica

- Studi geofisici su larga scale
- Remote sensing

III. A scala locale (ordine di grandezza di 50x50km²)

OBIETTIVO: Individuazione di un sito per un pozzo di esplorazione

- Geochimica
- Studi geofisici su scale intermedie
- Potenziale della risorsa
- Controllo incrociato rispetto ad altri fattori economici

IV. A scala del serbatoio (ad esempio area di 2x2km²)

OBIETTIVO: Individuazione di siti per ulteriori pozzi

- Geologia tridimensionale
- Investigazione del pozzo e geofisica di precisione
- Geochimica e geotermometria
- Stress locale
- Modello concettuale e modellazione del serbatoi



Obiettivi da raggiungere

1: prima e durante la produzione

- Identificare possibili serbatoi senza perforare
- Definire i limiti (laterali and verticali) (**accessibilità**)
- Identificare gli obiettivi di perforazione (**produttività**)

La permeabilità è determinata fundamentalmente da fratture e faglie.

>30% dei pozzi non sono economici

www.vigor-geotermia.it



Programma Operativo Interregionale
ENERGIE RINNOVABILI E
RISPARMIO ENERGETICO
2007 - 2013
Una scelta illuminata



Obiettivi da raggiungere

2: durante e dopo la produzione

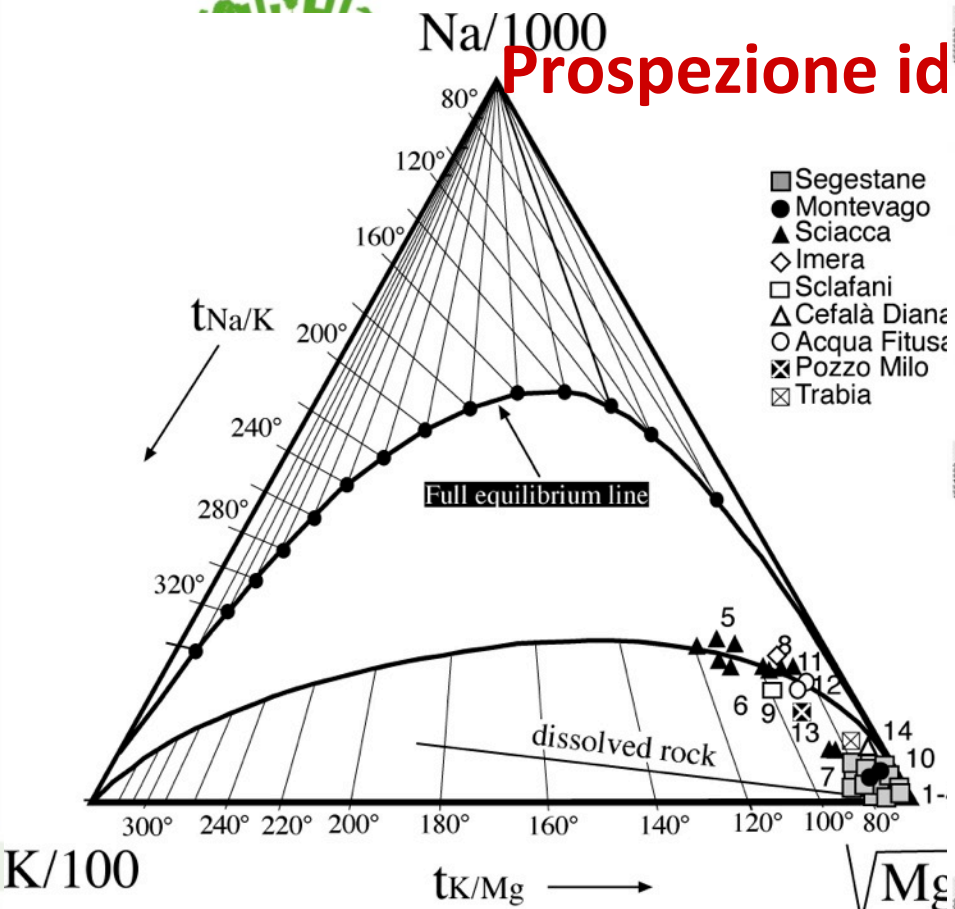
- Caratterizzare continuamente il serbatoio durante l'estrazione di energia
- Monitorare gli effetti della produzione e della redistribuzione dei fluidi, compresa la formazione di cappe di vapore o gas
- Caratterizzare la matrice roccia per definire le modalità di circolazione dei fluidi nel serbatoio
- Predirre la circolazione dei fluidi durante la stimolazione
- Tracciare i fluidi inniettati
- Caratterizzare le formazioni geologiche durante la perforazione profonda e la stimolazione per predirre la performance e la durata di un serbatoio (**efficienza e sostenibilità**)

www.vigor-geotermia.it



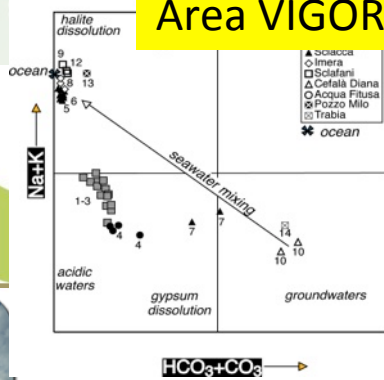
ESPLORAZIONE





Area VIGOR di Mazara del Vallo

• etc



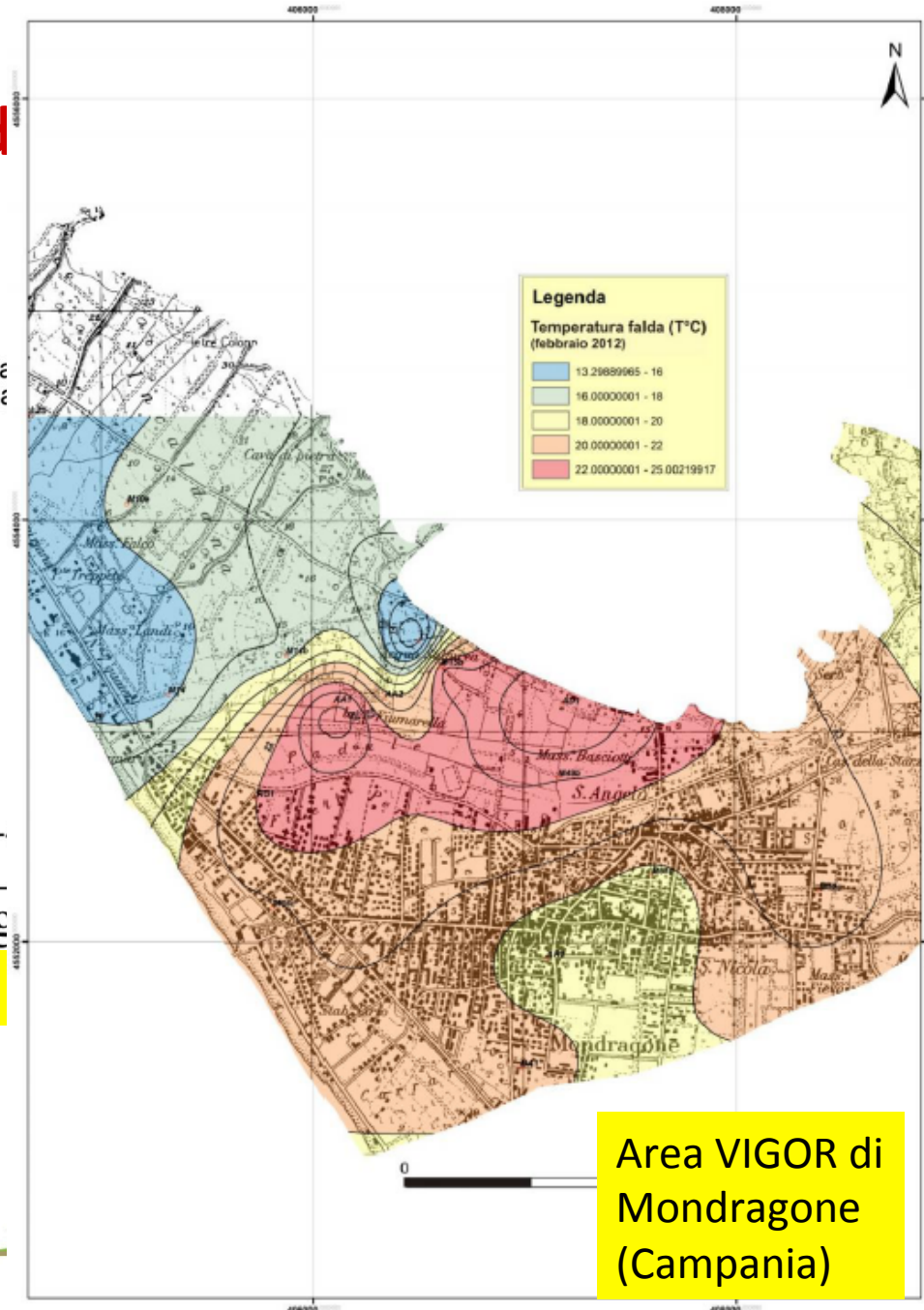
gorg-geotermia.it



Ministero
dello Sviluppo Economico

Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

Assessorato Regionale Regionale



**Area VIGOR di
Mondragone
(Campania)**

Allegato 11. Carta delle temperature (T°C) della falda (dati VIGOR febbraio 2012).



Prospezione idrogeologica

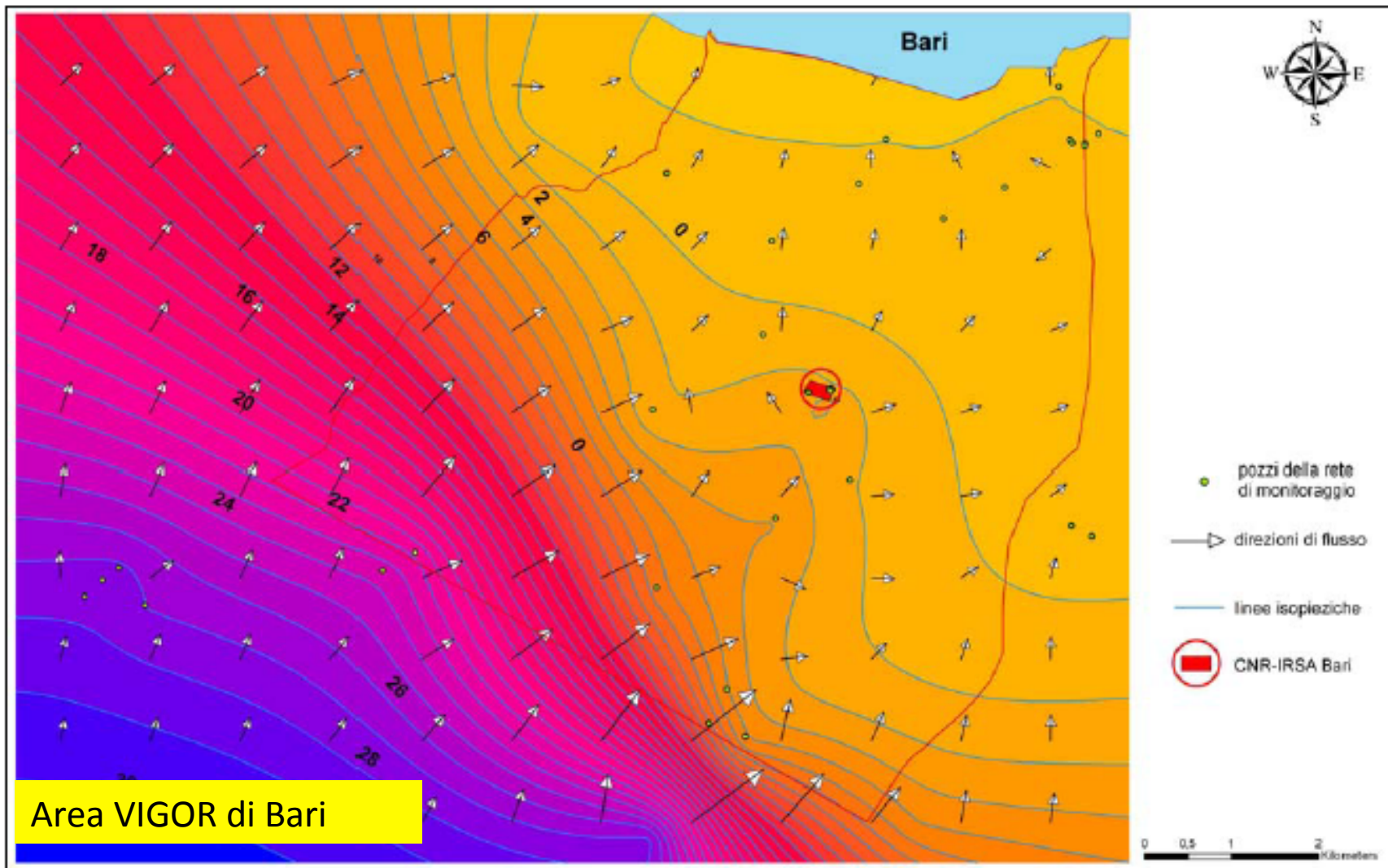


Figura 18: Cartografia piezometrica





Esplorazione geologica

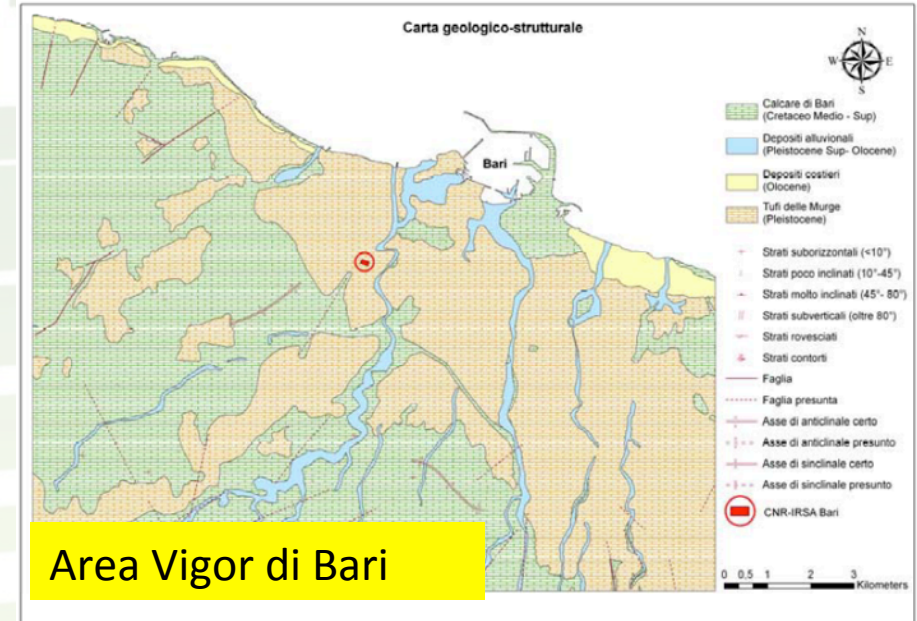
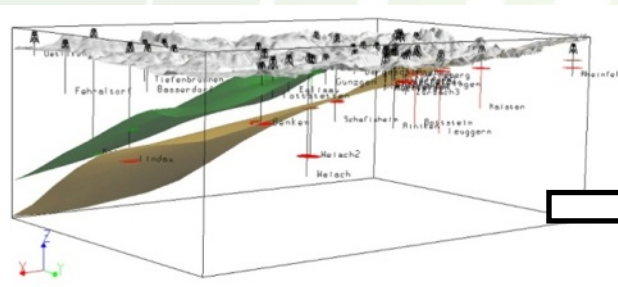
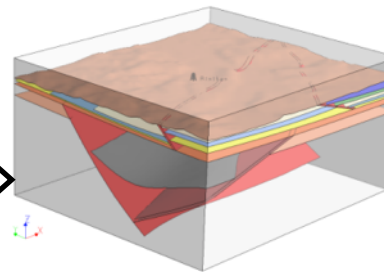


Figura 10: Carta geologico-strutturale dell'area campione di Bari

Raccolta dati



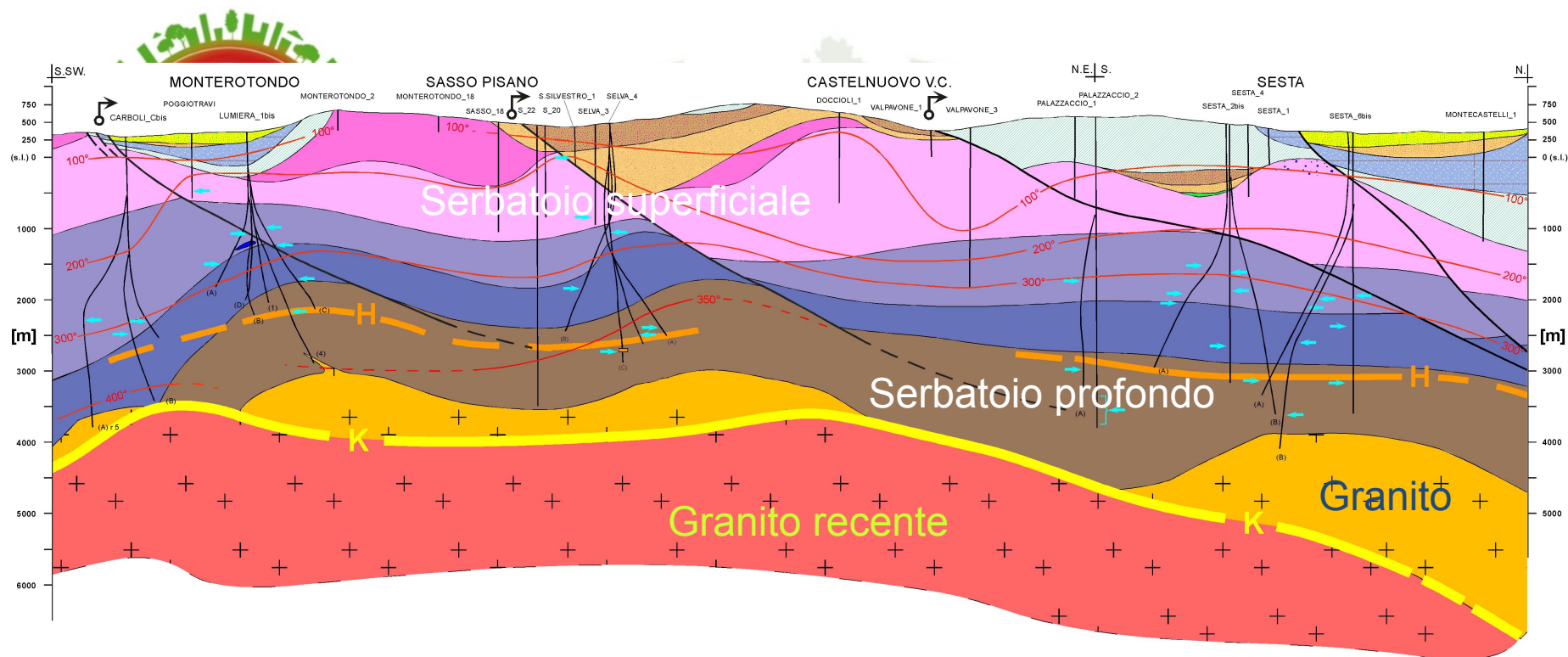
Modello geologico 3D



www.vigor-geotermia.it

- Ricostruzione geometrie
- Ricostruzione campo di fratturazione





Unità
Neogeniche

Flysch

Falda toscana

Basamento metamorfico

intrusione granitica

Fratture produttive

H - K Riflettori sismici

150°C Isotherme

Manifestazioni

da Bertini et al., 2006.

www.vigor-geotermia.it





Esplorazione geologica

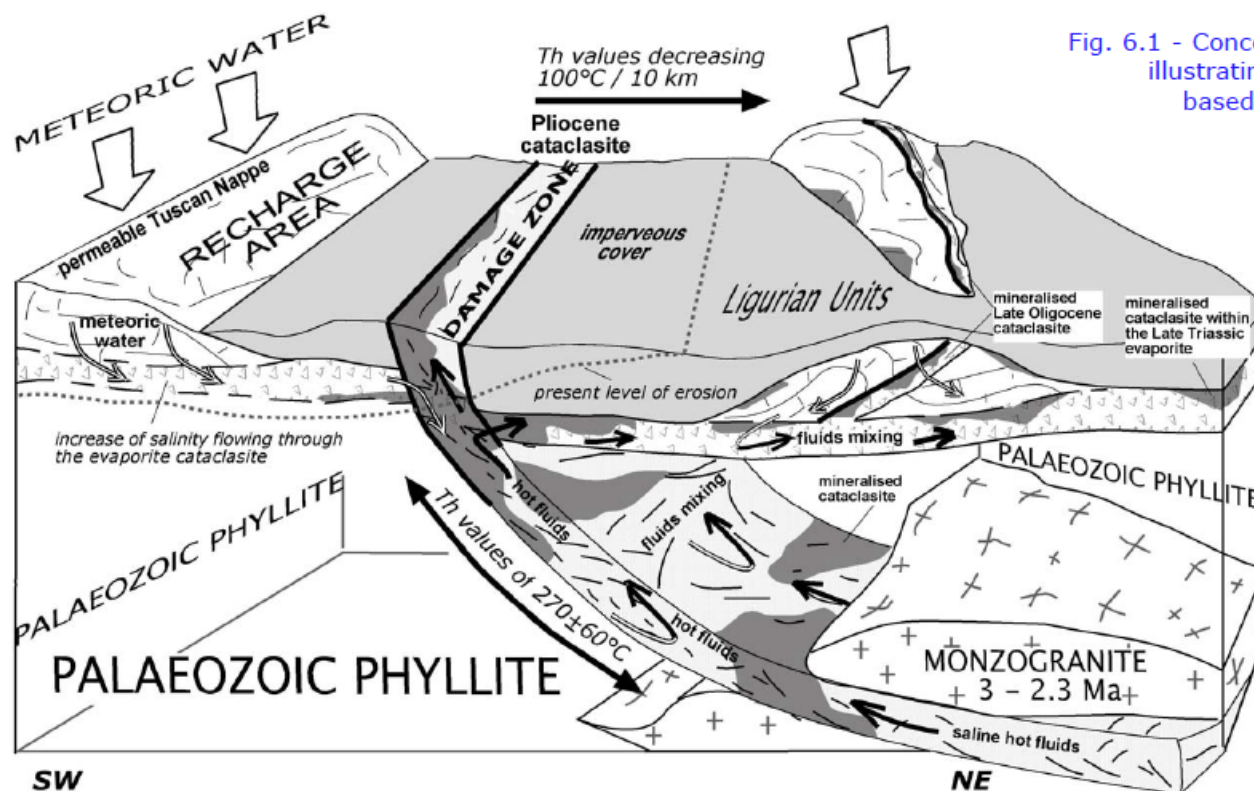


Fig. 6.1 - Conceptual cartoon, not to scale, illustrating the path of the fluid flow, based on the results of our study.

Meteoric water infiltrated to depth through the damage zone of the Boccheggiano fault and trough the permeable Tuscan Nappe fractured and porous rocks. At depth, down to the monzogranite, heating and mixing with deep fluids originated hydrothermal mineralizing fluids, upflowing toward the surface and pervading the existing cataclasites and locally mixing with meteoric water (From Liotta et al., 2010).

www.vigor-geotermia.it



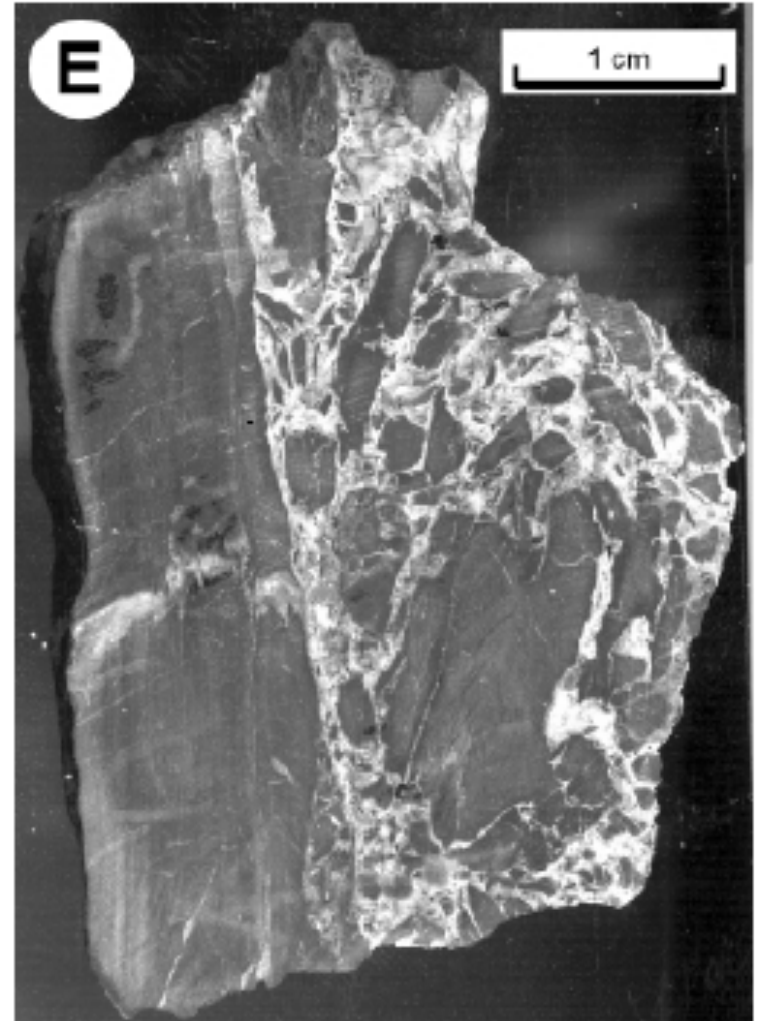


Permeabilità

La fratturazione idraulica e tettonica fa aumentare la permeabilità di rocce a bassa porosità



www.vigor-geotermia.it

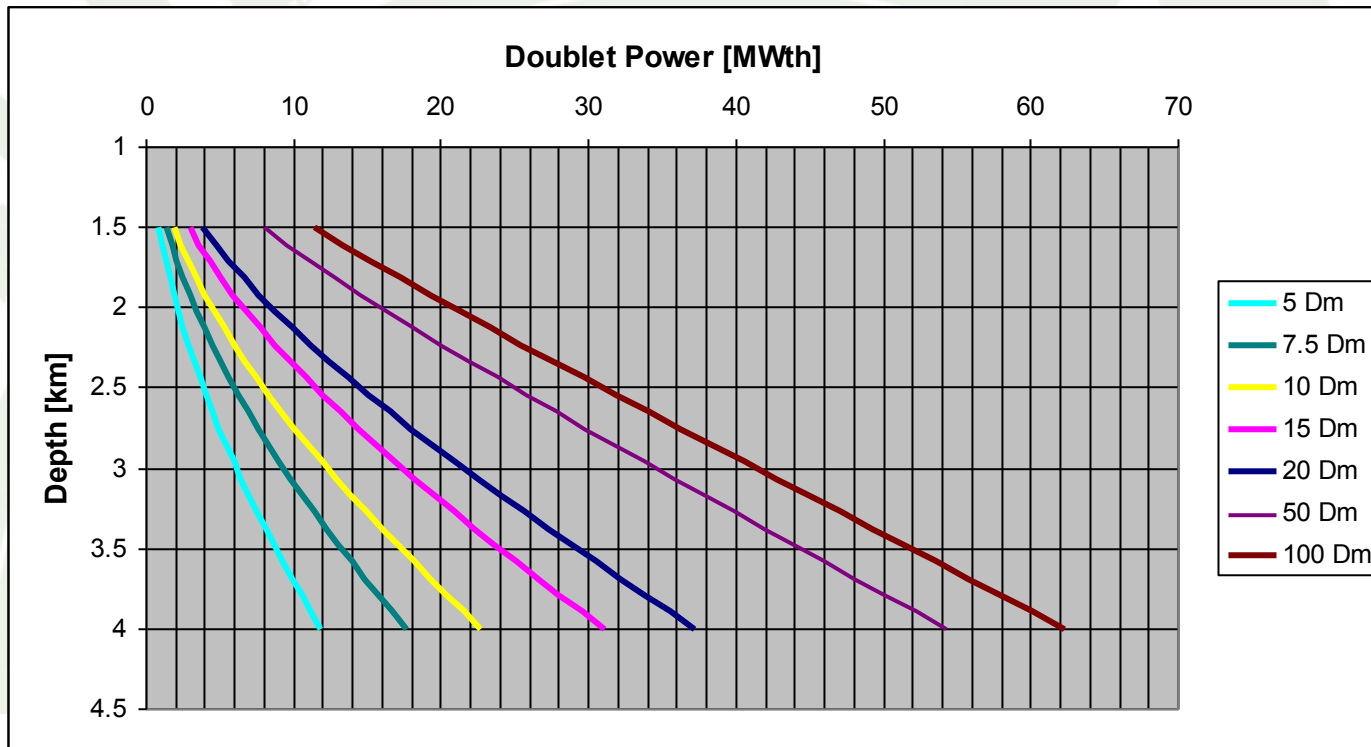


from Gianelli, 2008.



Importanza della transmissività (kH)

Thermal gradient = 30C/km
COP = 15



www.vigor-geotermia.it





Esplorazione geofisica

Considerate le alte temperature coinvolte, sia nel serbatoio geotermico che nella sorgente di calore, ci può aspettare che avvengano grandi variazioni nei valori dei parametri fisico-chimici e nelle caratteristiche geologiche delle rocce. Queste variazioni rappresentano il principale obiettivo di un progetto di esplorazione.

Siccome il calore si diffonde, anche l'alterazione ad esso correlata si diffonde, e il volume di roccia interessato da anomalie delle proprietà fisico-chimiche sarà, conseguentemente, piuttosto elevato.

www.vigor-geotermia.it



Programma Operativo Interregionale
ENERGIE RINNOVABILI E
RISPARMIO ENERGETICO
2007 - 2013
Una scelta illuminata



Esplorazione geofisica

Un sistema geotermico di solito causa disomogeneità nelle proprietà fisiche del sottosuolo, che possono essere osservate in vario grado come anomalie misurabili dalla superficie.

Principali parametri fisici che subiscono variazioni:

- Temperatura (sondaggi termici)
- Resistività elettrica (sondaggi geoelettrici ed elettromagnetici)
- Proprietà elastiche che influenzano la propagazione di onde sismiche (sondaggi sismici)
- Densità (sondaggi gravimetrici)
- Suscettività magnetica (sondaggi magnetici)

www.vigor-geotermia.it





Esplorazione geofisica

Considerate le alte temperature coinvolte, sia nel serbatoio geotermico che nella sorgente di calore, avvengano variazioni nei valori dei parametri fisico-chimici e nelle caratteristiche geologiche delle rocce. Queste variazioni rappresentano il principale obiettivo di un progetto di esplorazione.

Siccome il calore si diffonde, anche l'alterazione ad esso correlata si diffonde, e il volume di roccia interessato da anomalie delle proprietà fisico-chimiche sarà, conseguentemente, piuttosto elevato.

www.vigor-geotermia.it





Esplorazione geofisica

Grado di relazione tra le proprietà misurate e quelle di interesse

	Densità	Suscettività magnetica	Resistività elettrica	Permittività dielettrica	Velocità sismica
Porosità	Forte	Nessuna	Forte	Moderata	Moderata
Permeabilità	Nessuna	Nessuna	Debole	Debole	Debole
Contenuto Acqua	Moderata	Nessuna	Forte	Forte	Moderata
Qualità acqua	Nessuna	Nessuna	Forte	Nessuna	Nessuna
Contenuto argilla	Debole	Nessuna	Forte	Debole	Moderata
Contenuto minerali magnetici	Moderata	Forte	Debole	Nessuna	Nessuna
Contenuto minerali metallici	Forte	Nessuna	Forte	Nessuna	Moderata
Proprietà meccaniche	Moderata	Nessuna	Moderata	Debole	Forte
Struttura sottosuolo	Moderata	Moderata	Moderata	Forte	Forte

Forte

Moderata

Debole

Nessuna

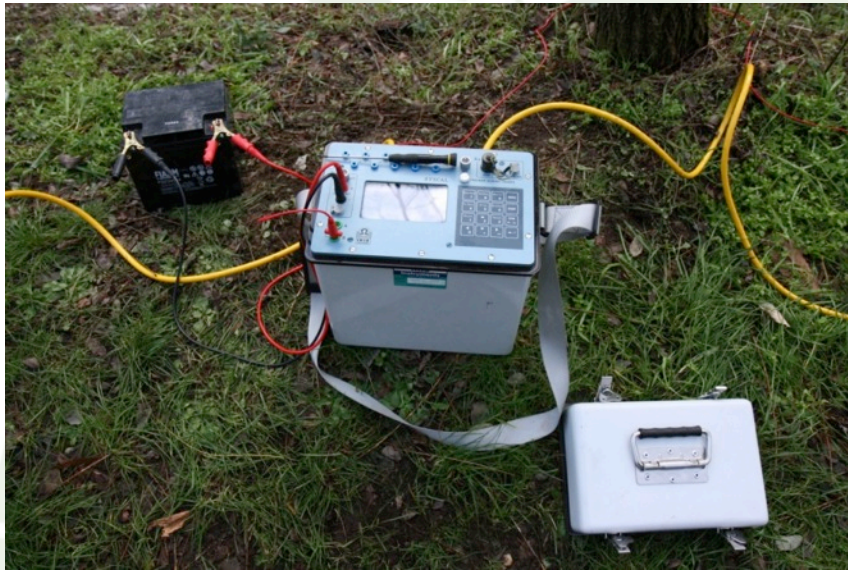
www.rigor-geotermia.it



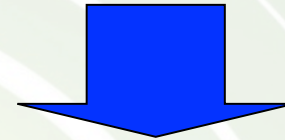


Esplorazione geofisica

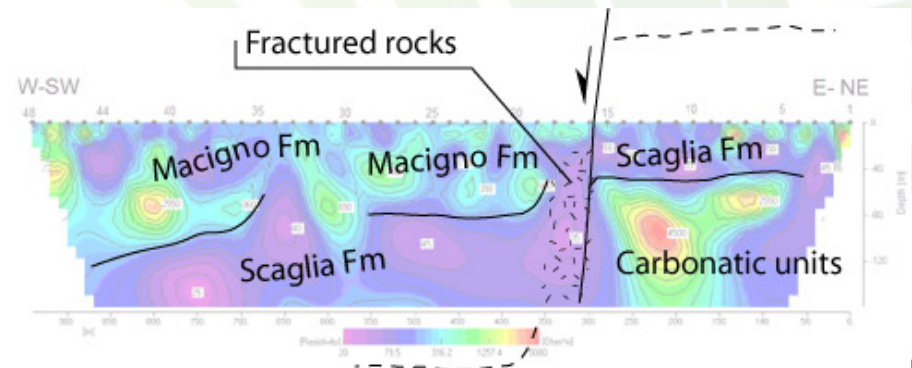
Metodologia ERT - Electrical Resistivity Tomography



Metodo attivo
Differenza di potenziale



Distribuzione di resistività (ρ_a) nel sottosuolo



www.vigor-geotermia.it

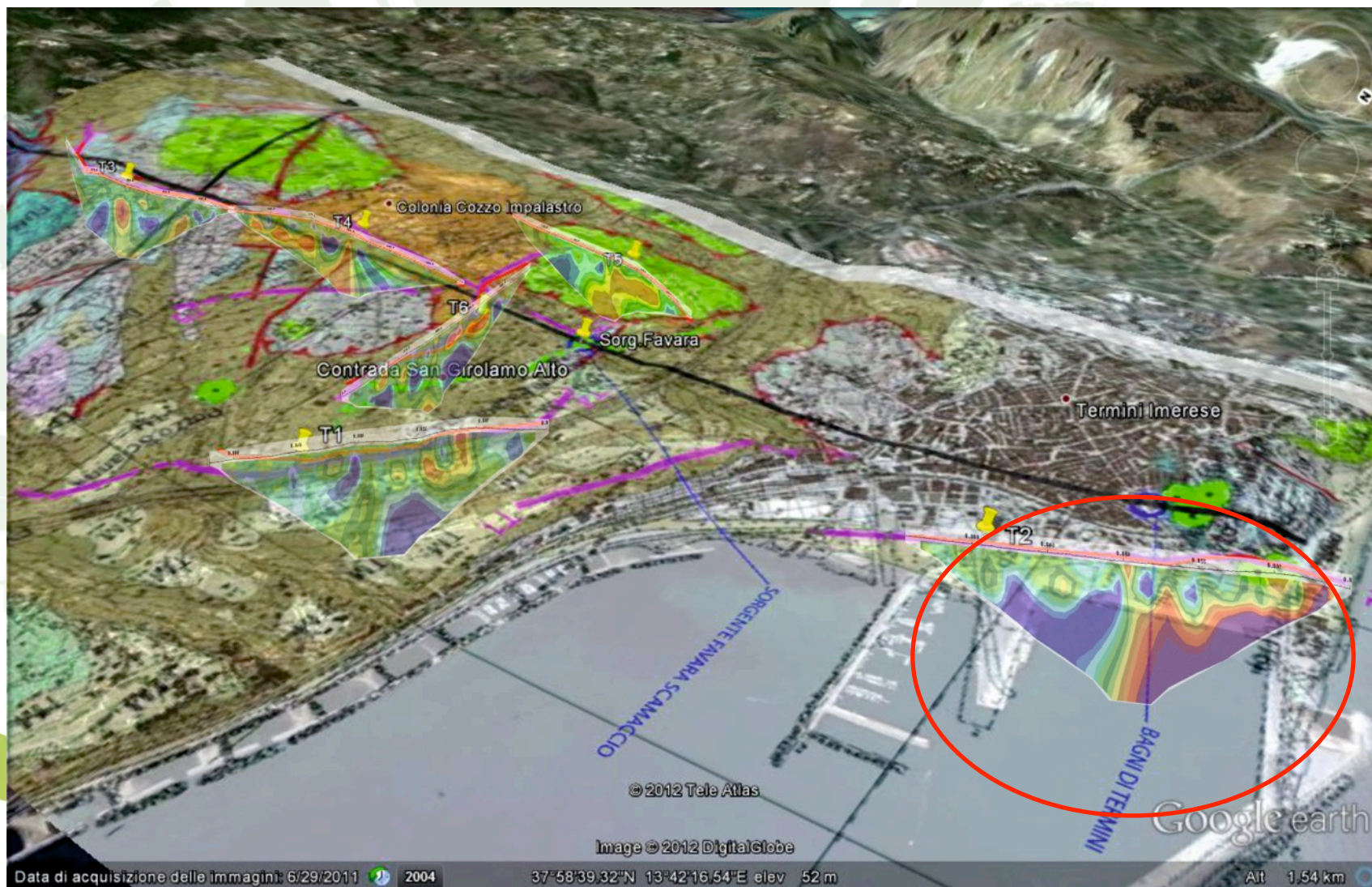




Esplorazione geofisica

Metodologia ERT - Electrical Resistivity Tomography

Area VIGOR di Termini Imerese (Sicilia)





Esplorazione geofisica

Metodologia ERT - Electrical Resistivity Tomography

Area VIGOR di Mondragone (Campania)

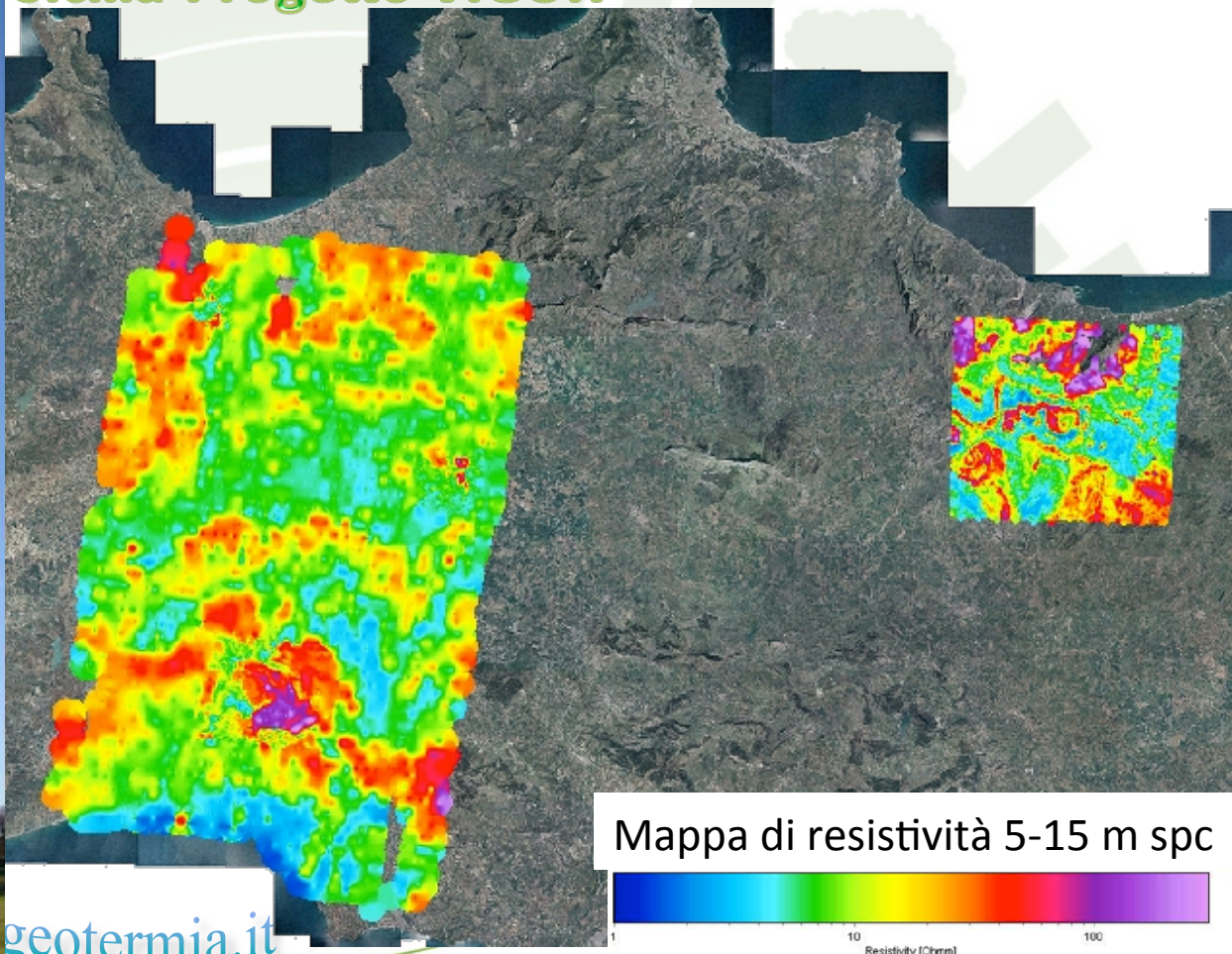
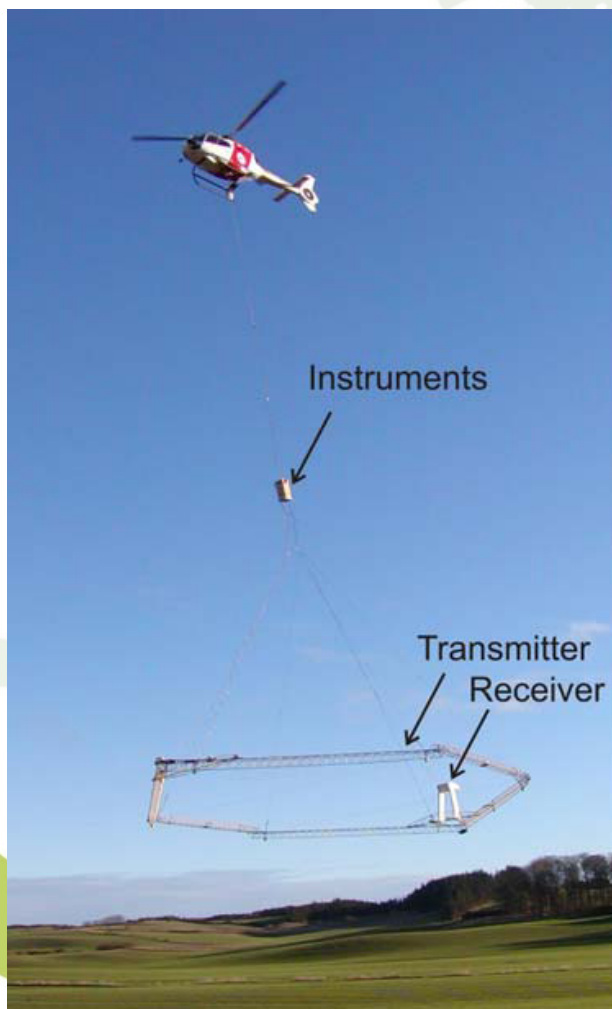




Esplorazione geofisica

SkyTEM: metodo elettromagnetico elitrasportato

Sicilia-Progetto VIGOR



geotermia.it



Consiglio Nazionale delle Ricerche
Dipartimento Terra e Ambiente

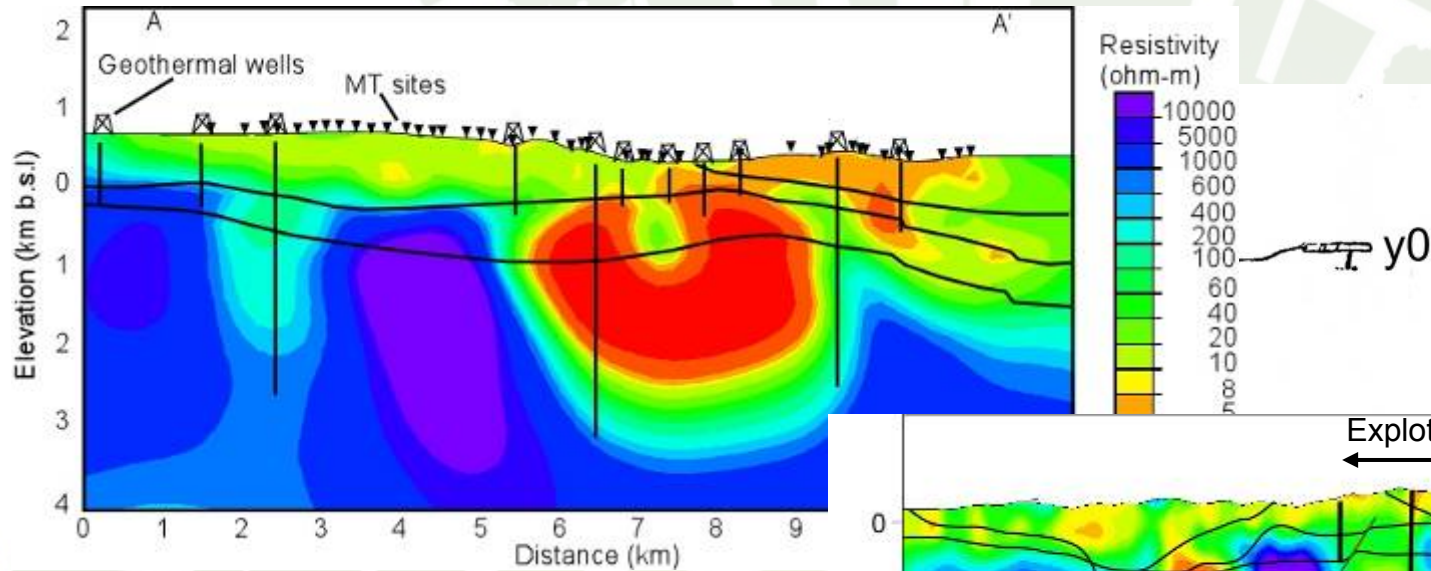


Programma Operativo Interregionale
ENERGIE RINNOVABILI E
RISPARMIO ENERGETICO
2007 - 2013
Una scelta illuminata



Esplorazione geofisica

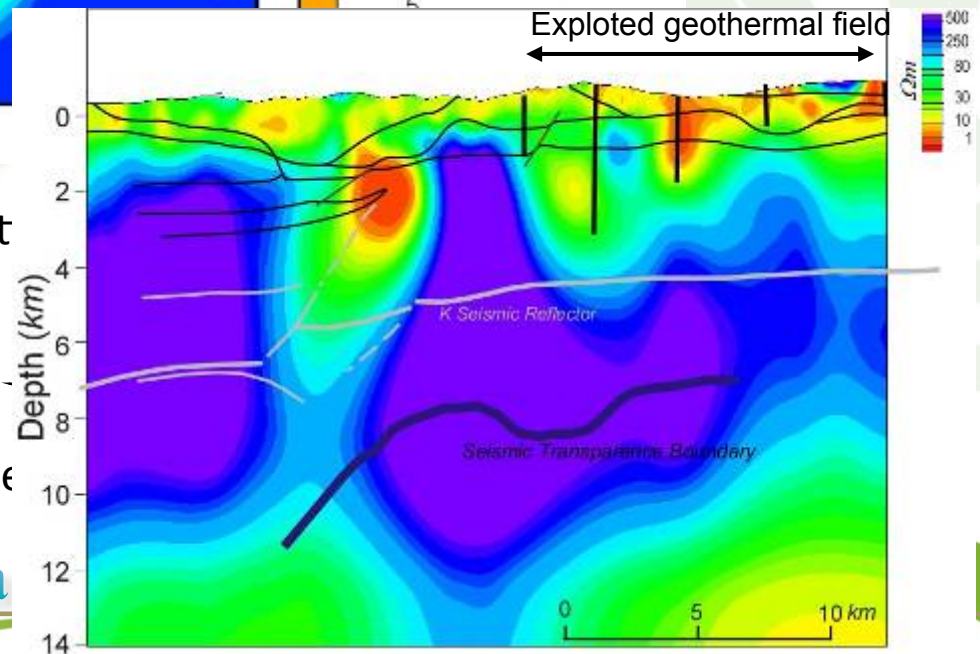
Prospezione Magnetotellurica (MT)



Campo elet

Distribuzione

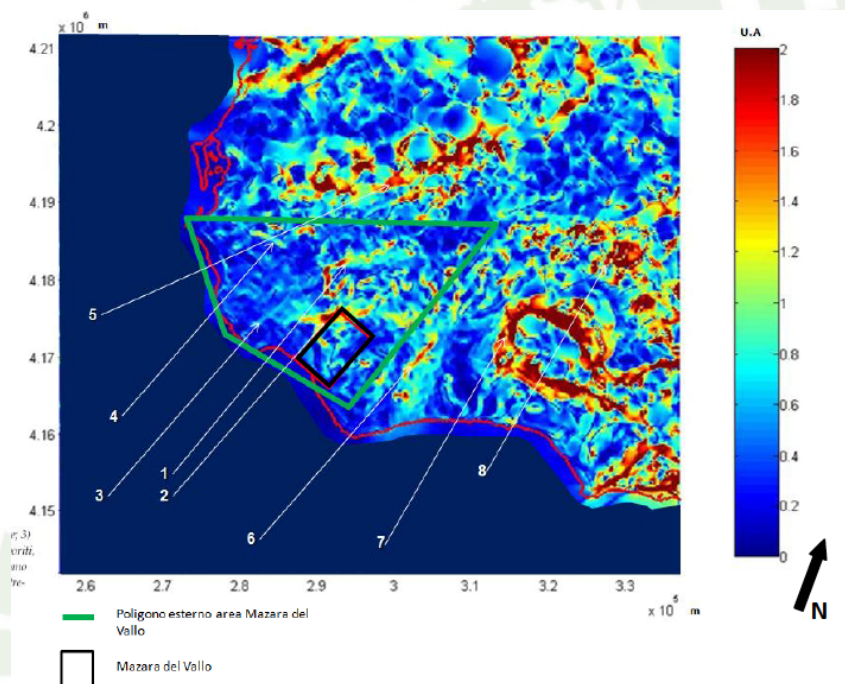
www.vigor-geotermia



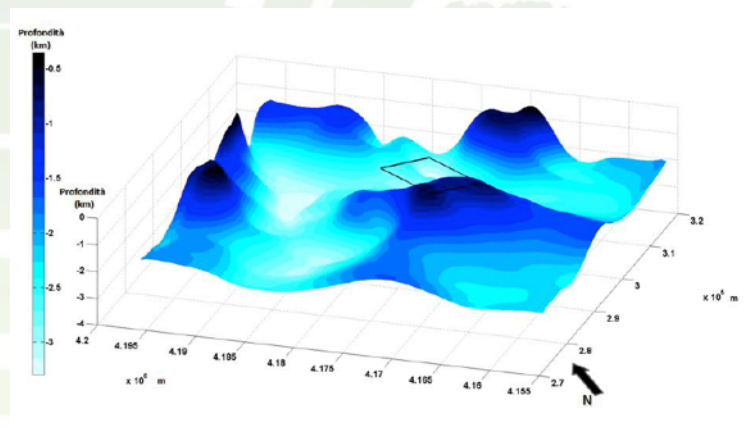


Esplorazione geofisica

Prospezione gravimetrica



Risultati della Multiscale Derivative Analysis dei dati gravimetrici. Le frecce individuano lineamenti utilizzati nella ricostruzione geologica.



Ricostruzione tridimensionale del tetto del basamento carbonatico Mesozoico dell'area

Area VIGOR di Mazara(Sicilia)

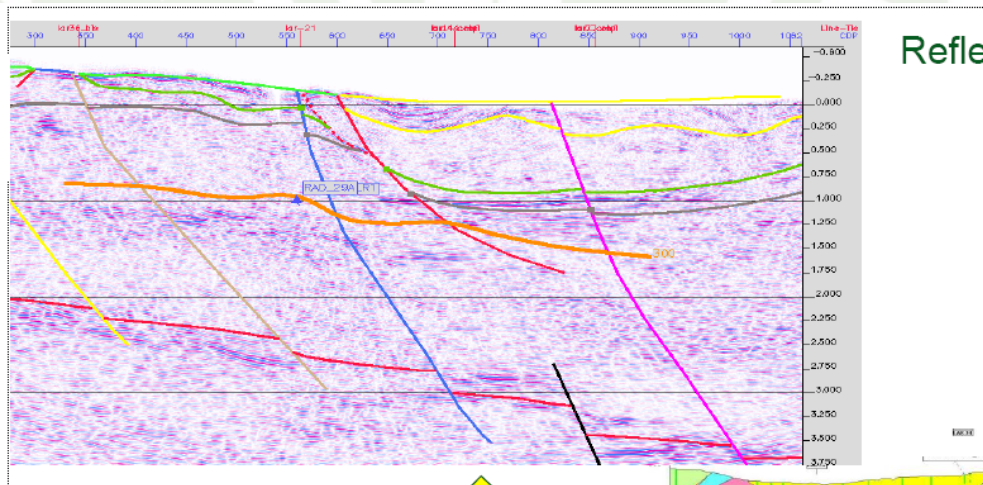
www.vigor-geotermia.it



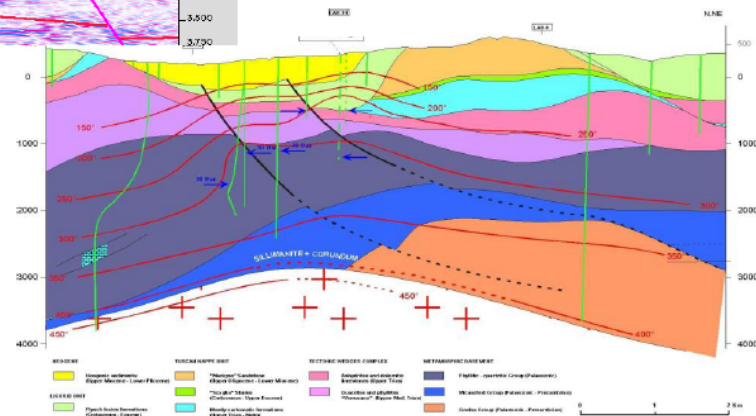
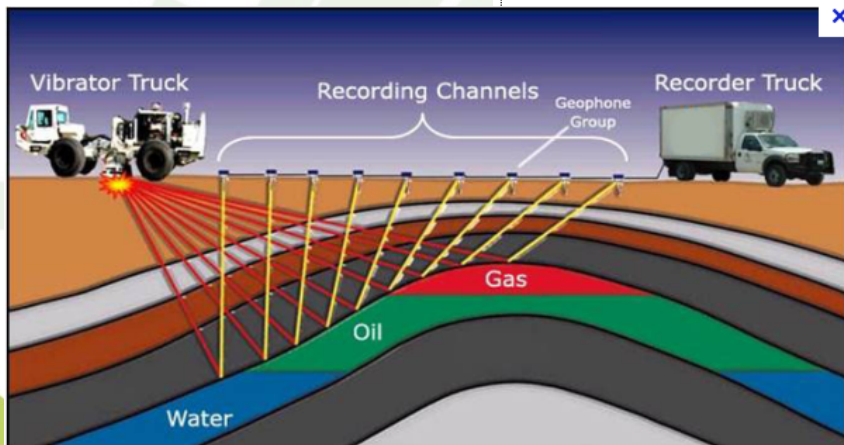


Esplorazione geofisica

Prospezione Sismica attiva



Reflection seismic



www.vigor-geotermia.it



Consiglio Nazionale delle Ricerche
Dipartimento Terra e Ambiente

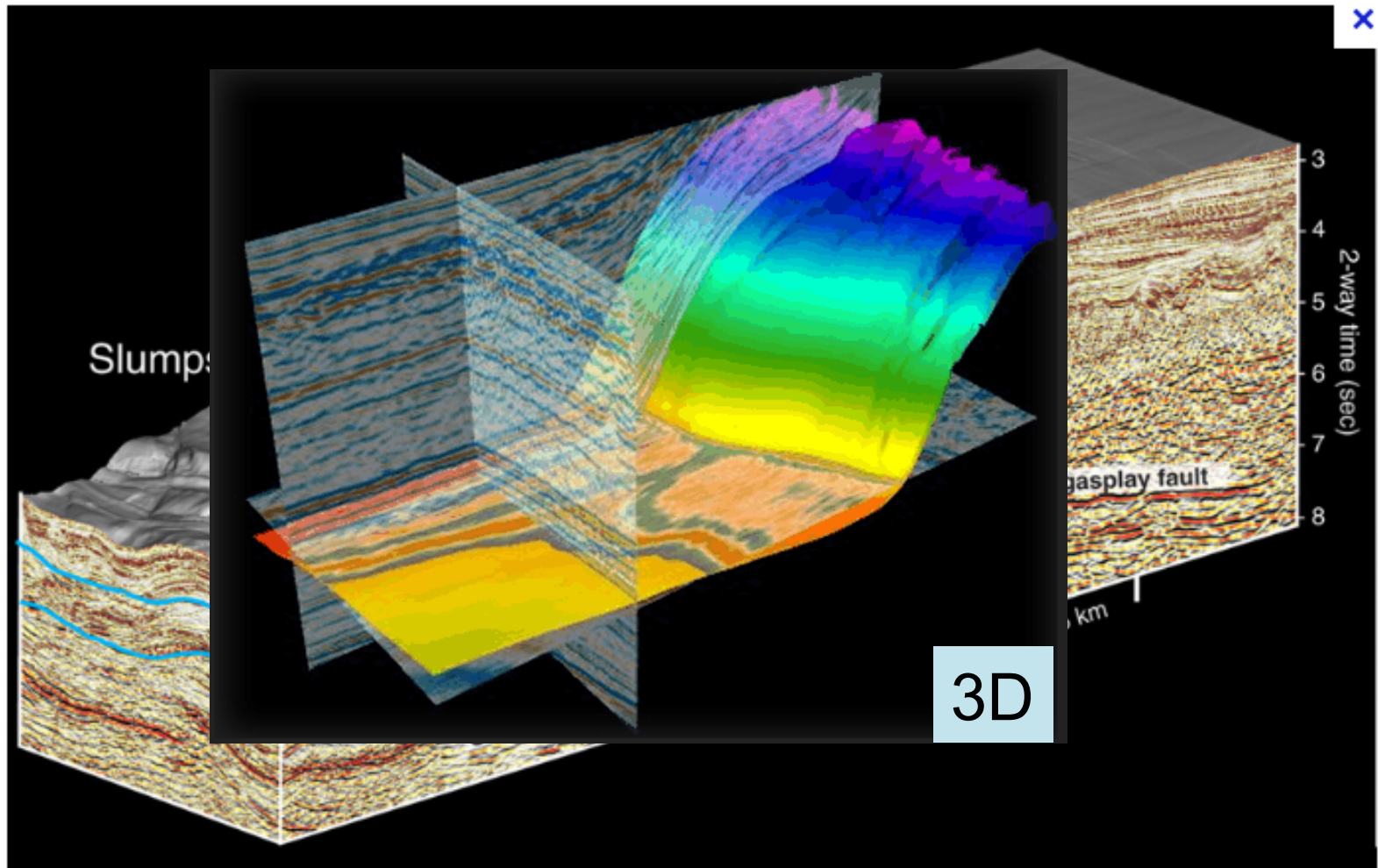


Programma Operativo Interregionale
ENERGIE RINNOVABILI E
RISPARMIO ENERGETICO
2007 - 2013
Una scelta illuminata



Esplorazione geofisica

Prospezione Sismica attiva

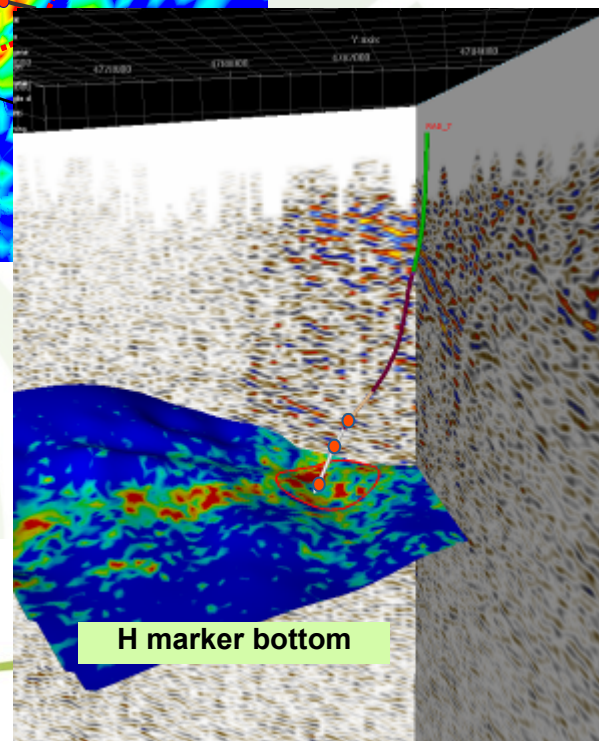
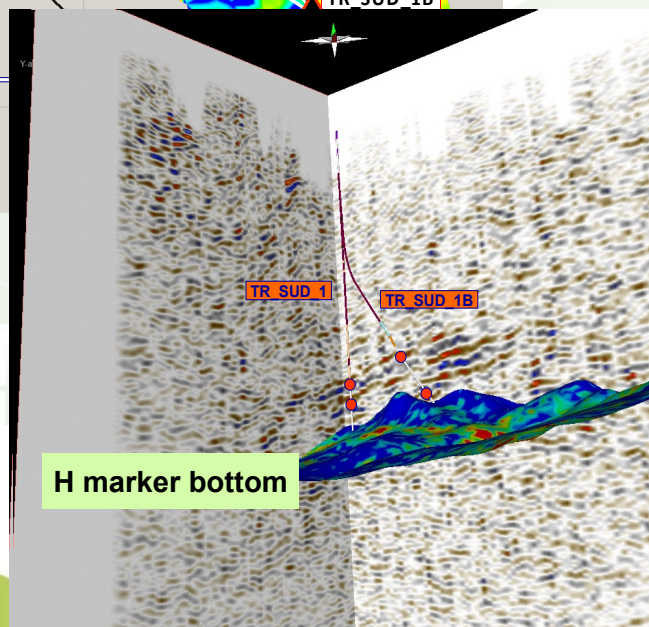
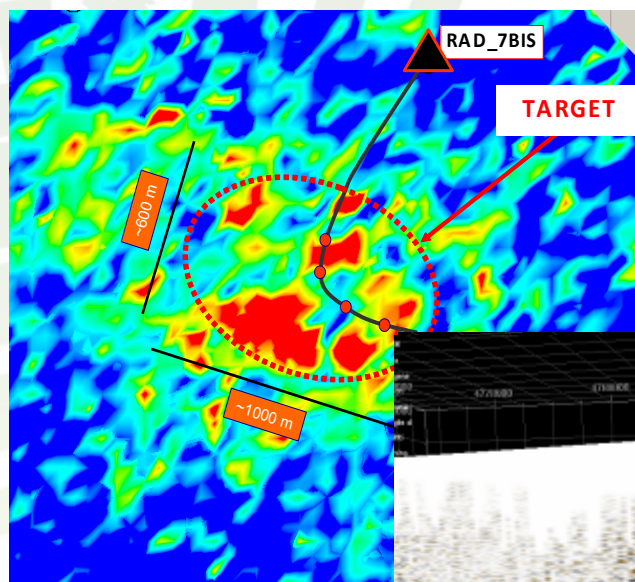
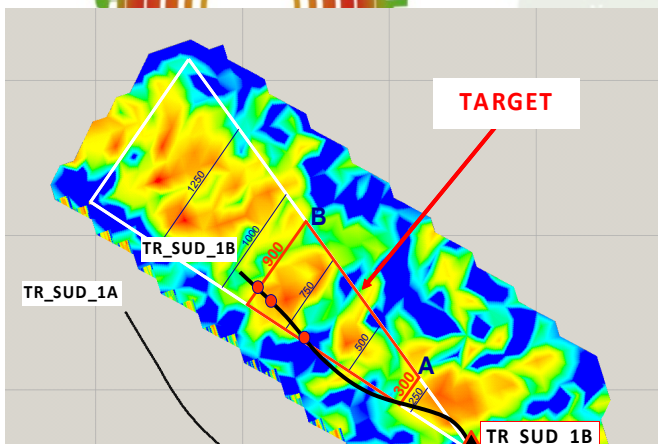




Esplorazione geofisica

Prospezione Sismica attiva

● Fractured levels





Esplorazione geofisica

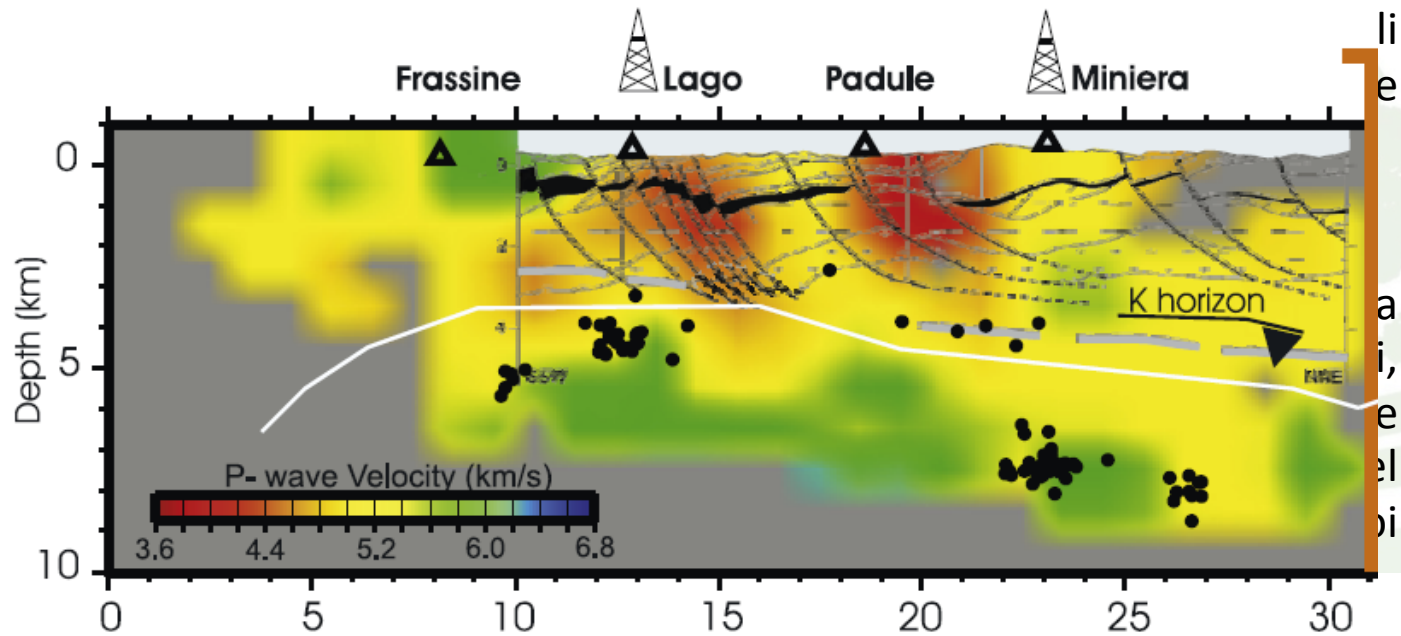
Prospezione Sismica passiva

Sismologia

La sismologia è una scienza finalizzata allo studio dei terremoti e all'analisi della propagazione delle corrispondenti onde sismiche. Si tratta di un settore di grande interesse per i centri di ricerca e per la costruzione di infrastrutture.

Tomografia

La tomografia sismica studia la velocità e i tempi di arrivo delle onde sismiche, che dipendono dalle proprietà elastiche del mezzo e dalla presenza di fluidi e di geotermici.



www.vigor-geotermia.it

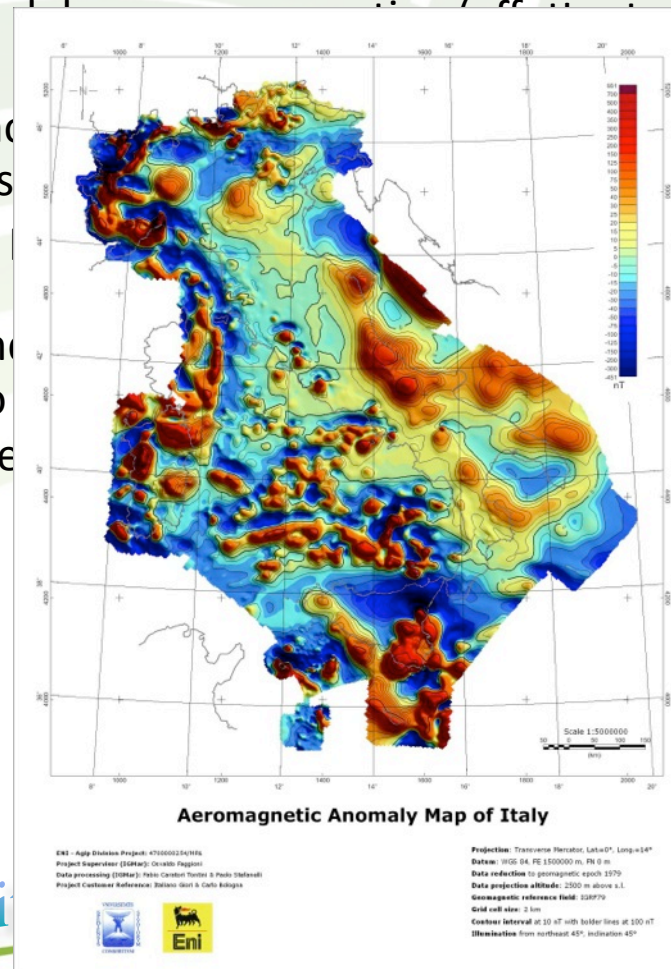


Esplorazione geofisica

Prospezione Magnetica

Le misure della componente statica oppure con una strumentazione ricostruire la distribuzione delle anomalie Curie (ovvero la temperatura al di sopra della temperatura di Curie, proprietà ferromagnetiche). Tale proprietà è correlata con il flusso di calore. A questo metodo può essere utilizzato quando la qualità del flusso di calore, quando è uniforme oppure quando è presente anomalie termiche locali.

Il suolo
te per
tura di
le loro
mente
questo
buona
modo
omalie



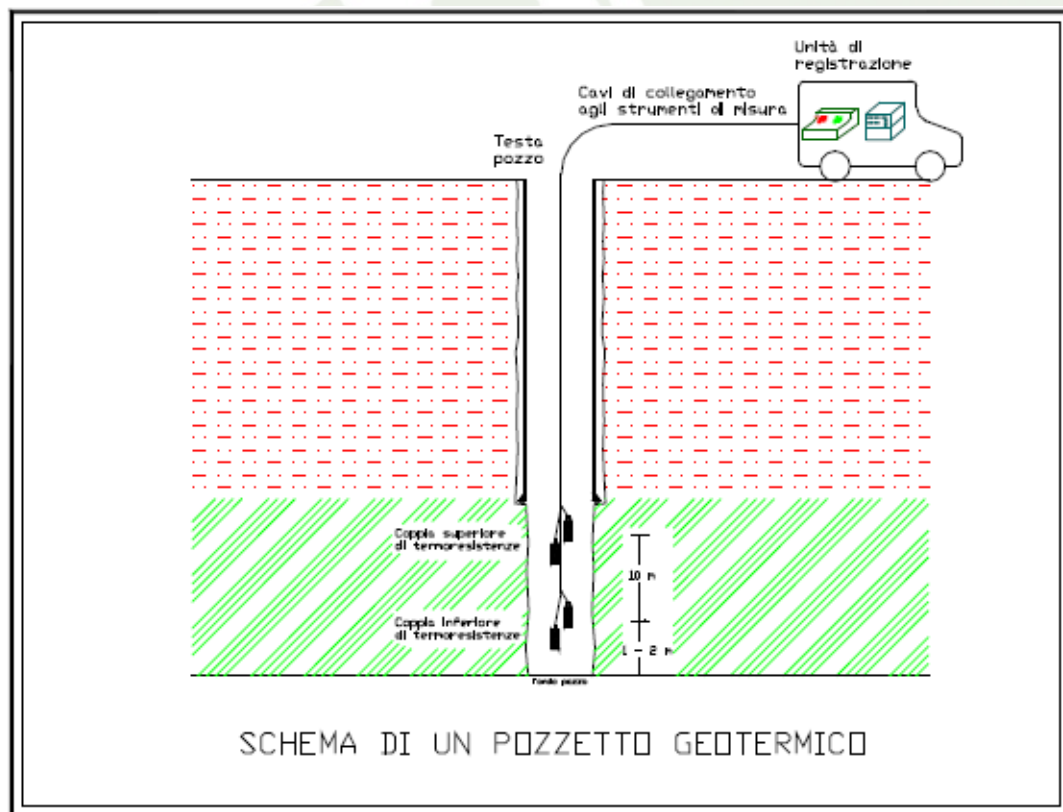
www.vigor-geotermia.it





Esplorazione geofisica

Prospezione Termica



Misure di temperatura in pozzetti di piccola profondità (100- 300 m), mediante termoresistenze posizionate a varie quote. Le misure proseguono nel tempo fino alla completa stabilizzazione delle temperature (~ 60 giorni) per calcolare un valore indisturbato del gradiente geotermico. Misure di conducibilità termica su carote opportunamente prelevate consentono la determinazione del flusso di calore.

www.vigor-geotermia.it



Consiglio Nazionale delle Ricerche
Dipartimento Terra e Ambiente



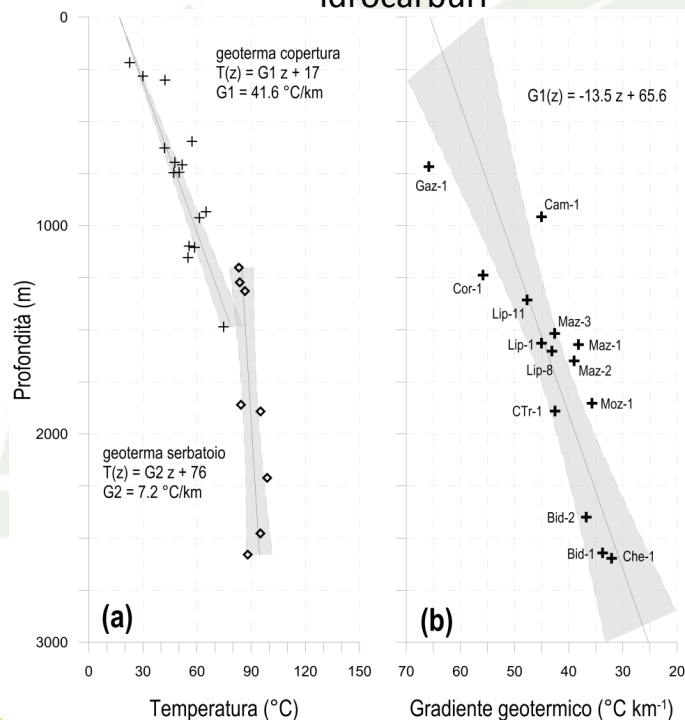
Programma Operativo Interregionale
ENERGIE RINNOVABILI E
RISPARMIO ENERGETICO
2007 - 2013
Una scelta illuminata



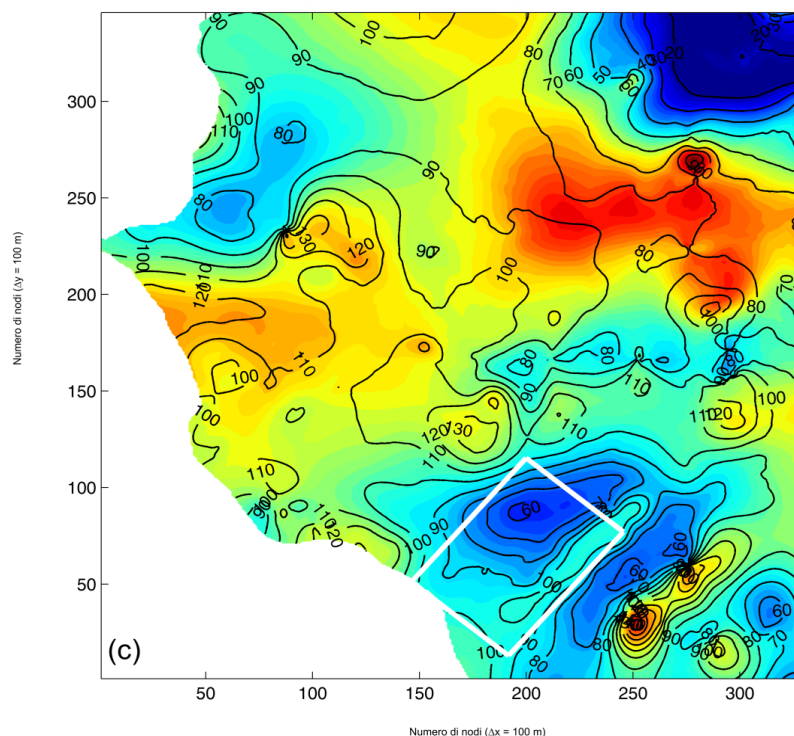
Esplorazione geofisica

Prospezione Termica

Revisione delle temperature nei pozzi
profondi perforati per la ricerca di
idrocarburi



Temperature calcolate al top del serbatoio



Area VIGOR di Mazara(Sicilia)

www.vigor-geotermia.it



Consiglio Nazionale delle Ricerche
Dipartimento Terra e Ambiente



Programma Operativo Interregionale
ENERGIE RINNOVABILI E
RISPARMIO ENERGETICO
2007 - 2013
Una scelta illuminata



Esplorazione geofisica

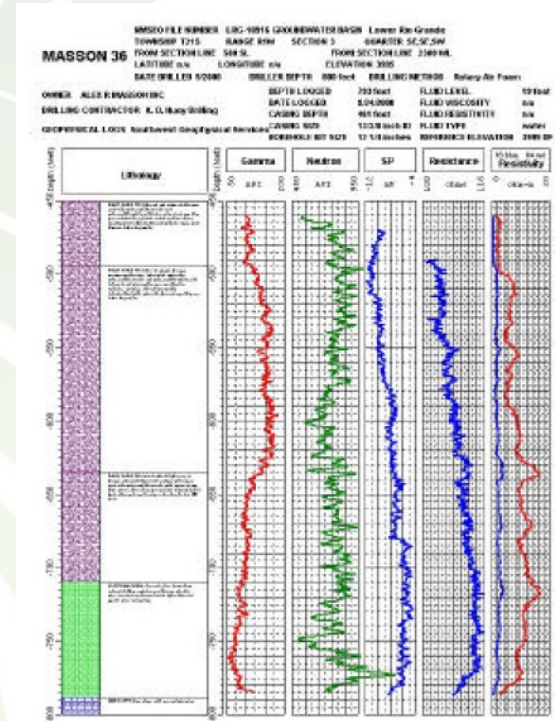
Sondaggi in pozzo

Il profilo sismico verticale consente di identificare strutture ad una certa distanza dal pozzo

I log di visualizzazione acustica e sonici in foro (acoustic and sonic logs) consentono di ottenere informazioni sulle fratture attraversate dal pozzo.

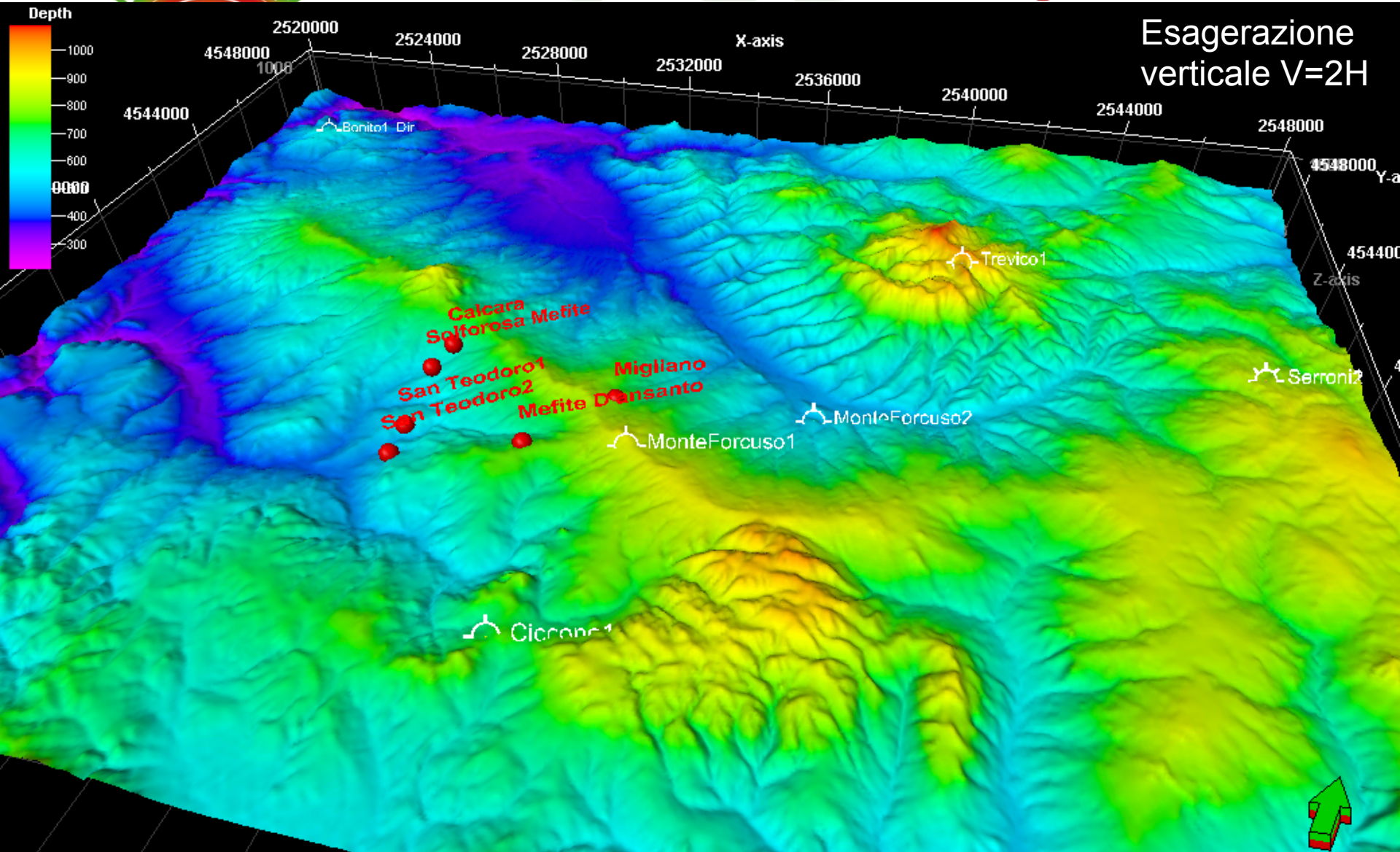
La gravimetria di pozzo può essere d'aiuto per definire le condizioni presenti nel serbatoio

I log di resistività ed di raggi gamma forniscono informazioni relative a materiale che si trova in prossimità dei fori di trivellazione



www.vigor-geotermia.it

Modello 3D: DEM, Pozzi e Sorgenti



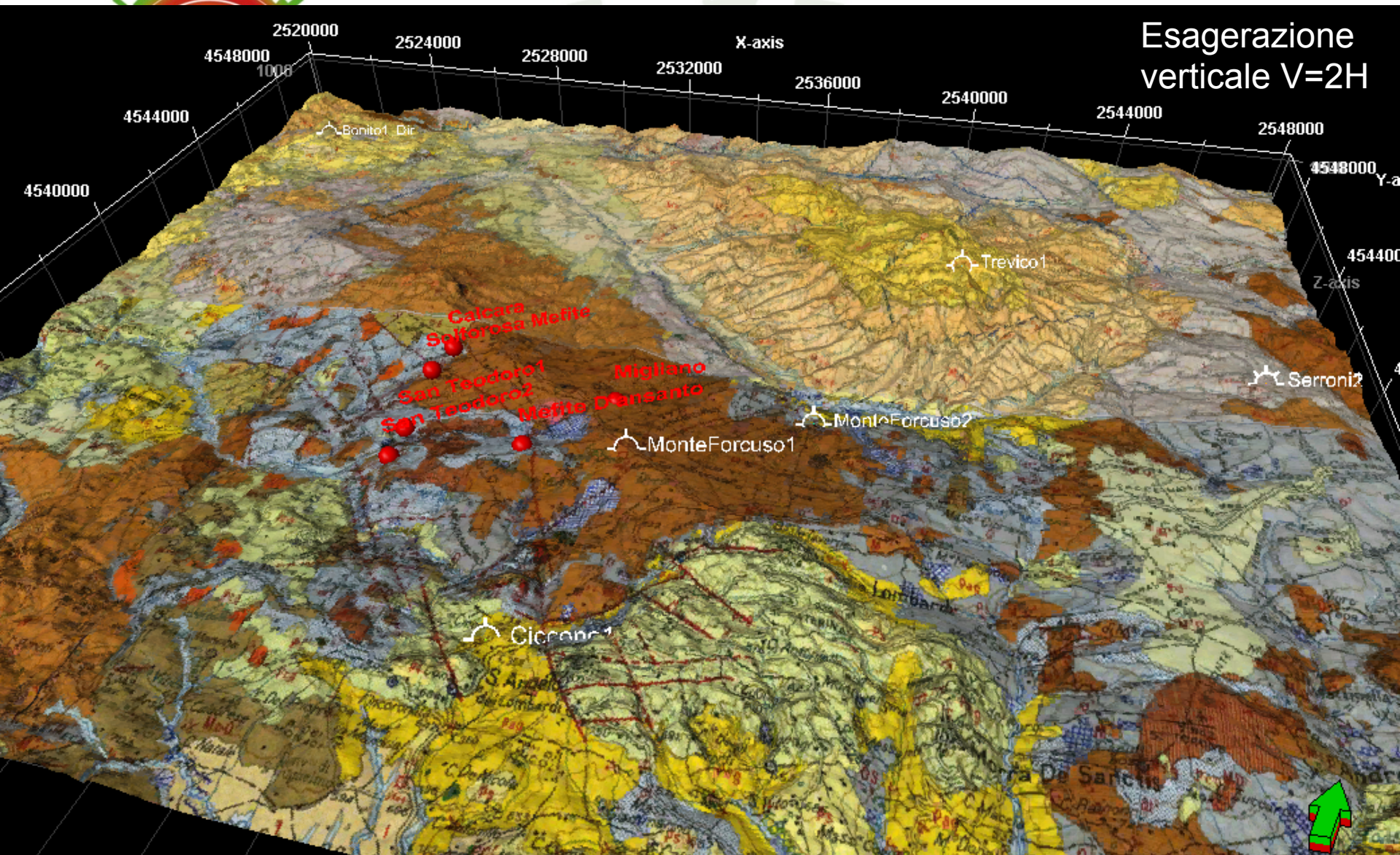
Consiglio Nazionale delle Ricerche
Dipartimento Terra e Ambiente



Programma Operativo Interregionale
ENERGIE RINNOVABILI E
RISPARMIO ENERGETICO
2007 - 2013
Una scelta illuminata



Modello 3D: DEM e Geologia



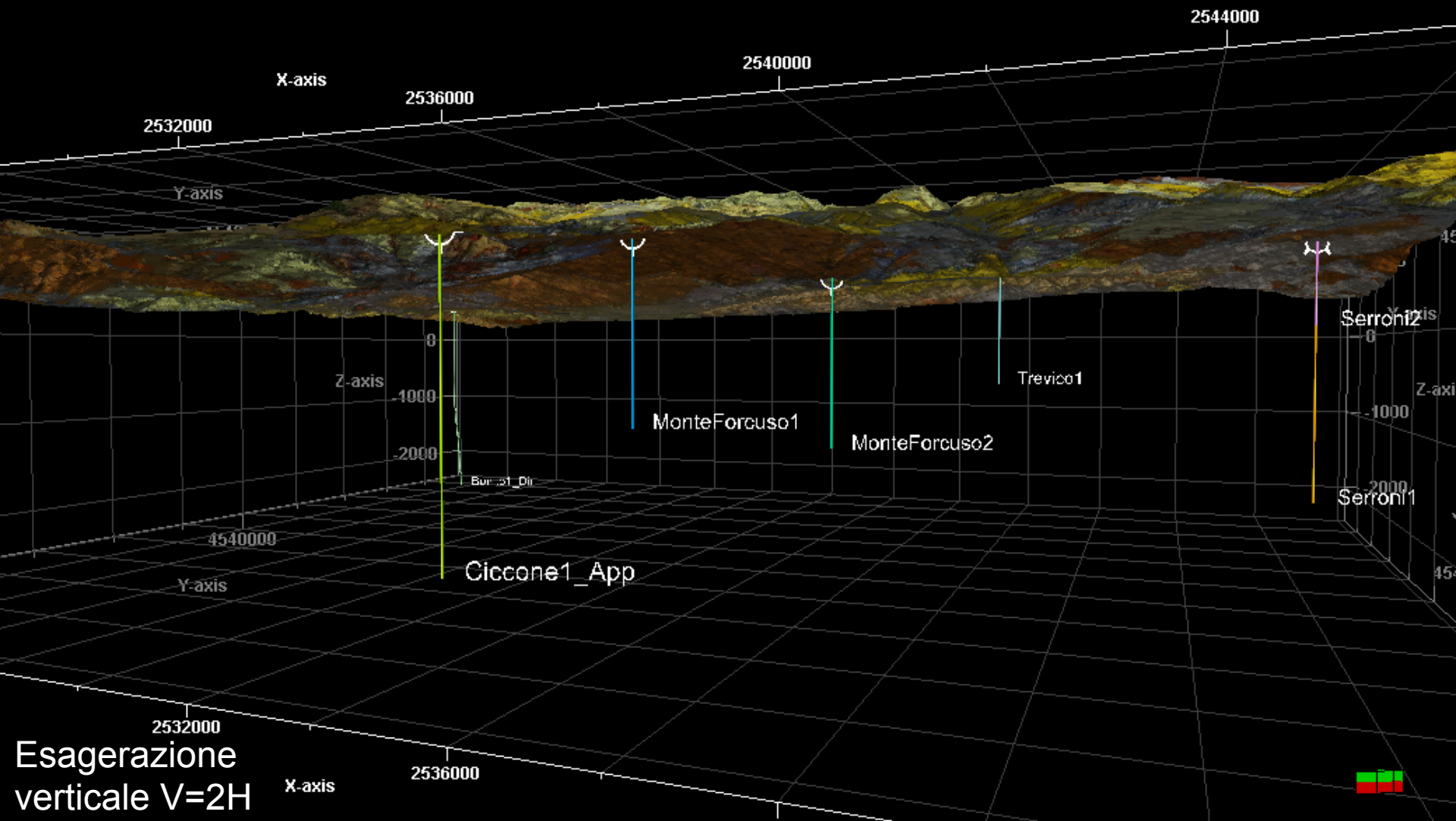
Consiglio Nazionale delle Ricerche
Dipartimento Terra e Ambiente



Programma Operativo Interregionale
ENERGIE RINNOVABILI E
RISPARMIO ENERGETICO
2007-2013
Una scelta illuminata



Modello 3D: Pozzi



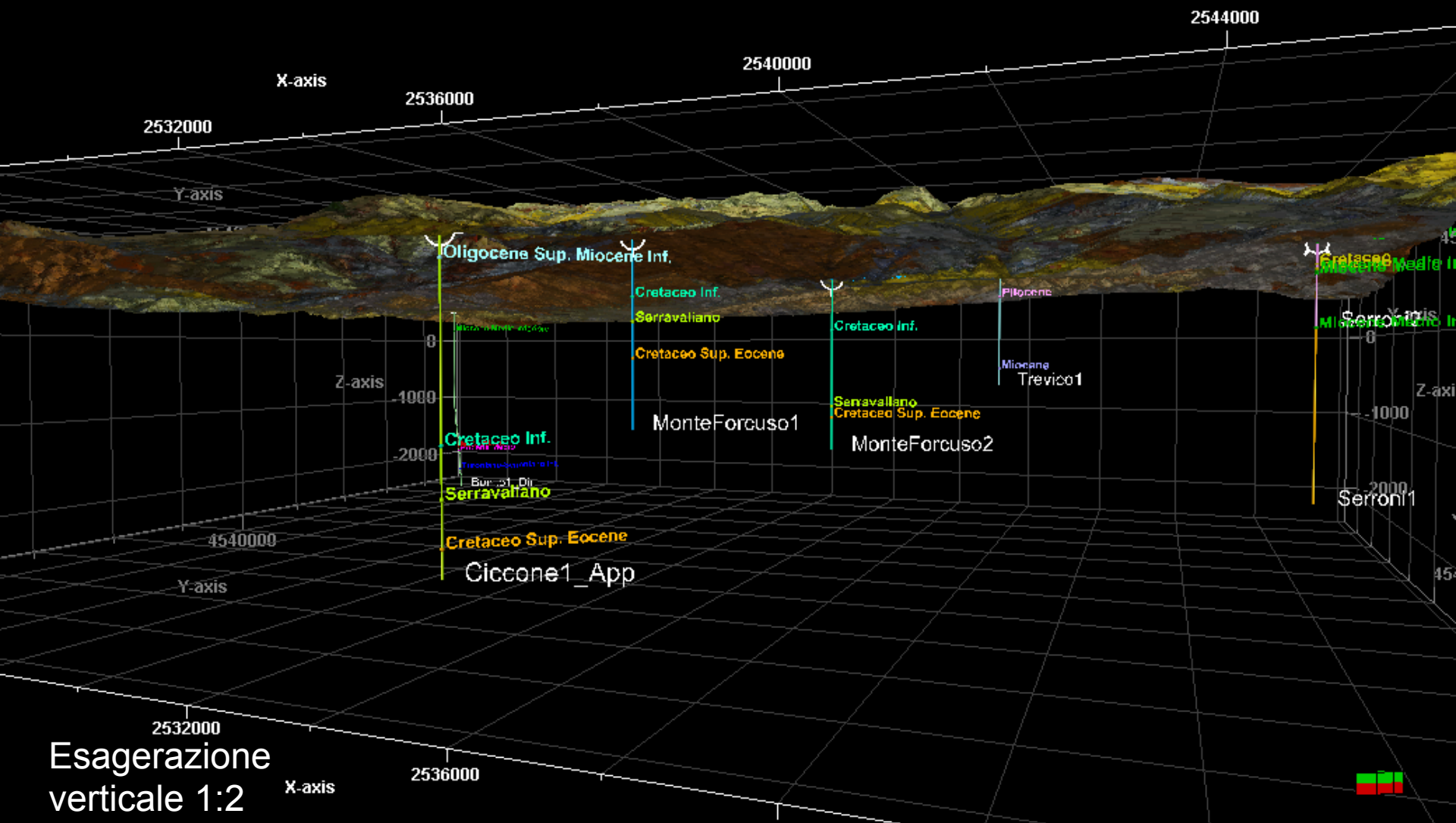
Consiglio Nazionale delle Ricerche
Dipartimento Terra e Ambiente



Programma Operativo Interregionale
ENERGIE RINNOVABILI E
RISPARMIO ENERGETICO
2007 - 2013
Una scelta illuminata



Modello 3D: Top Pozzi

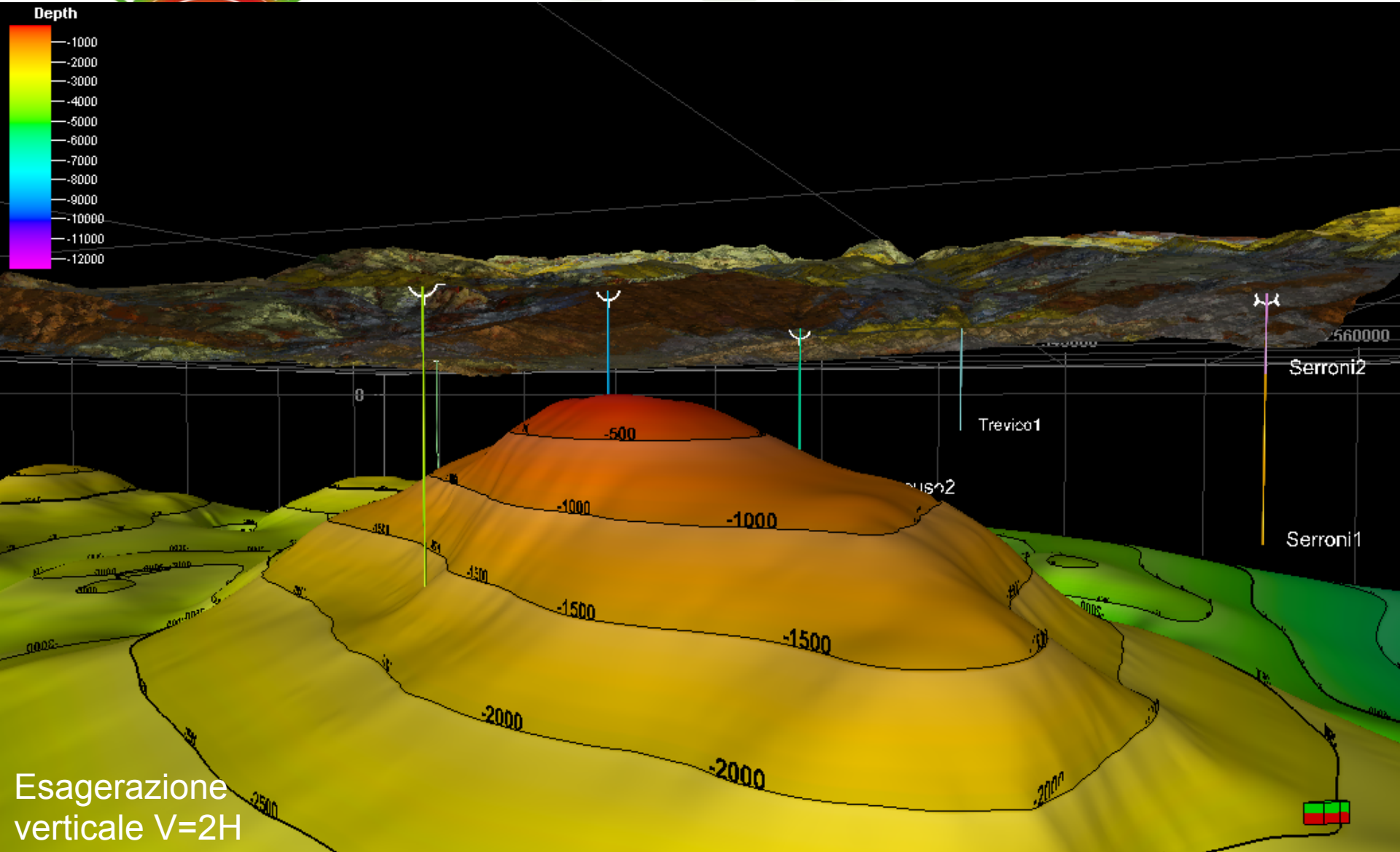


Consiglio Nazionale delle Ricerche
Dipartimento Terra e Ambiente



Programma Operativo Interregionale
ENERGIE RINNOVABILI E
RISPARMIO ENERGETICO
2007 - 2013
Una scelta illuminata

Modello 3D: Isobate Top Reservoir (m.s.l.m.)

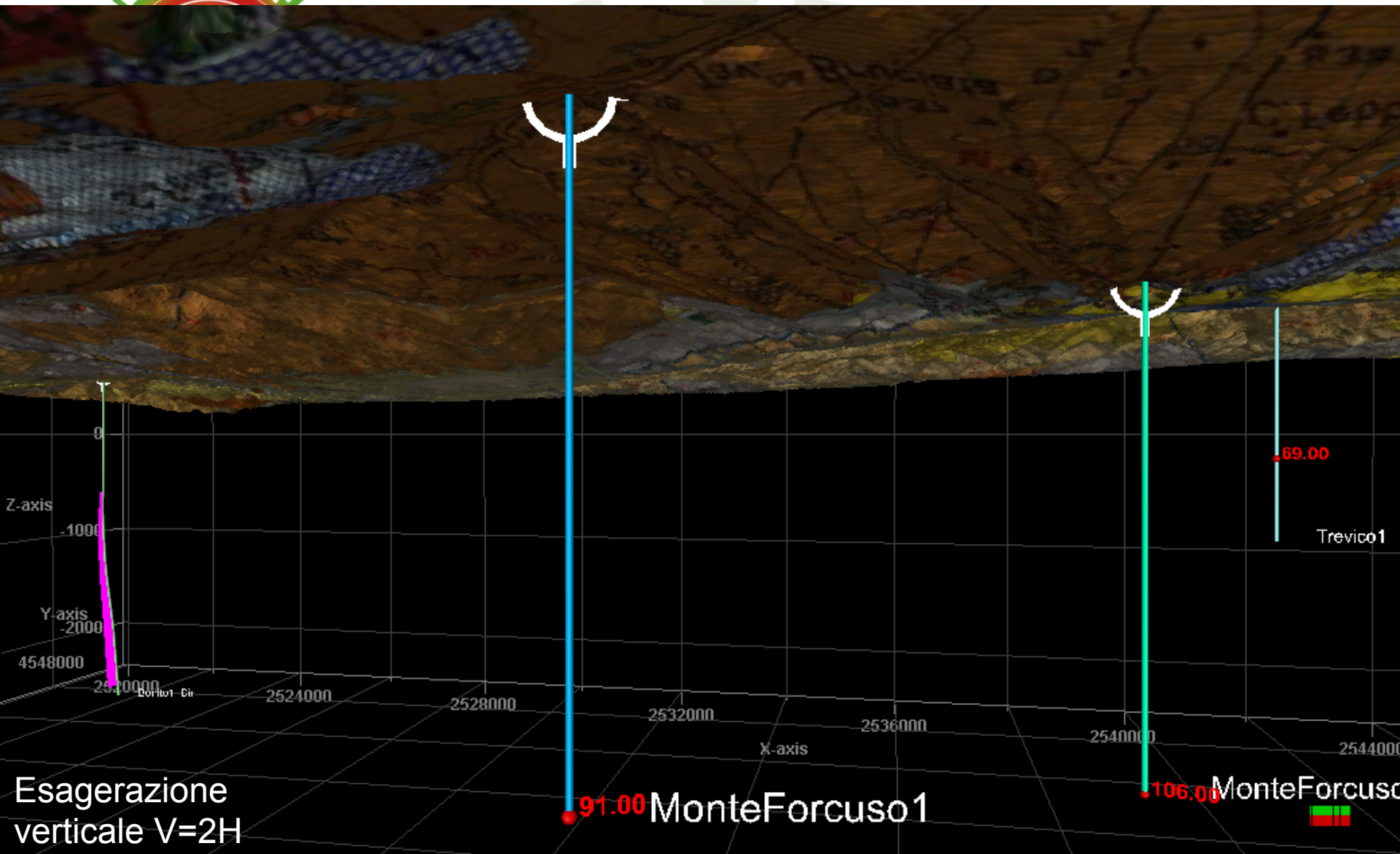


Consiglio Nazionale delle Ricerche
Dipartimento Terra e Ambiente



Programma Operativo Interregionale
ENERGIE RINNOVABILI E
RISPARMIO ENERGETICO
2007 - 2013
Una scelta illuminata

Modello 3D: Dati Temperatura Pozzi



Consiglio Nazionale delle Ricerche
Dipartimento Terra e Ambiente

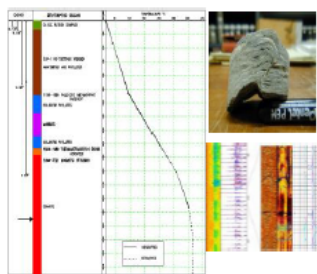
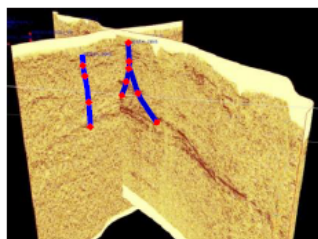
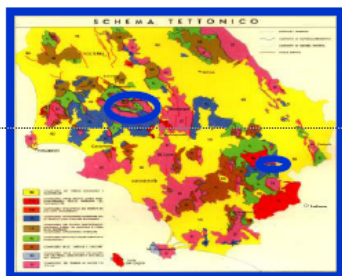


Programma Operativo Interregionale
ENERGIE RINNOVABILI E
RISPARMIO ENERGETICO
2007 - 2013
Una scelta illuminata

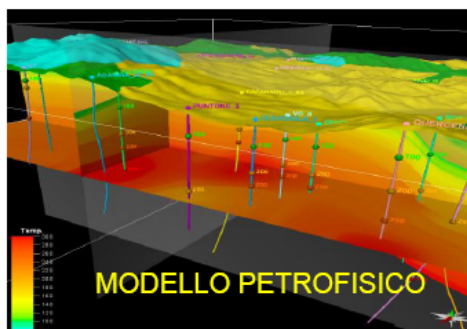
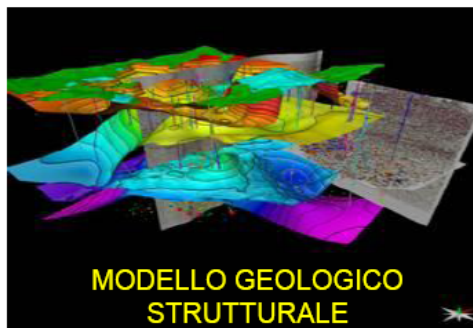


Flusso di lavoro

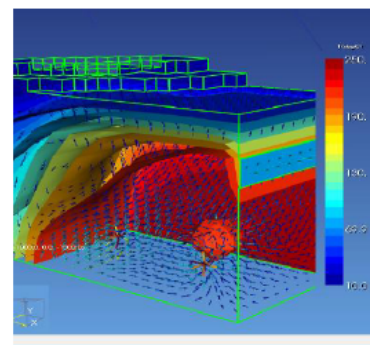
INPUT



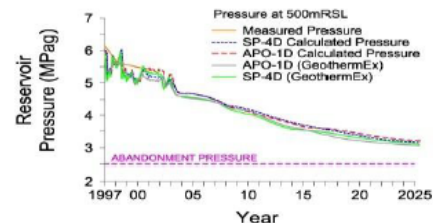
RESERVOIR MODELLING STATIC MODEL



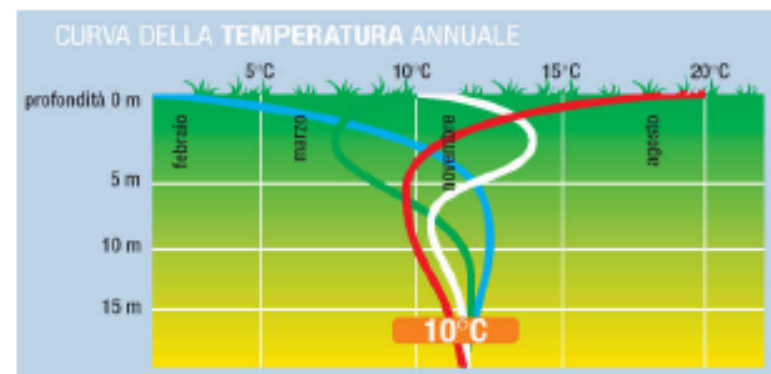
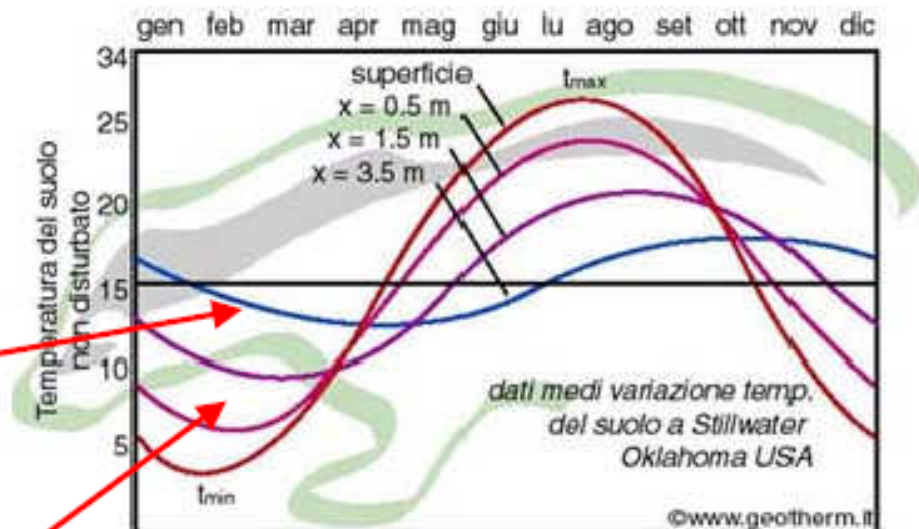
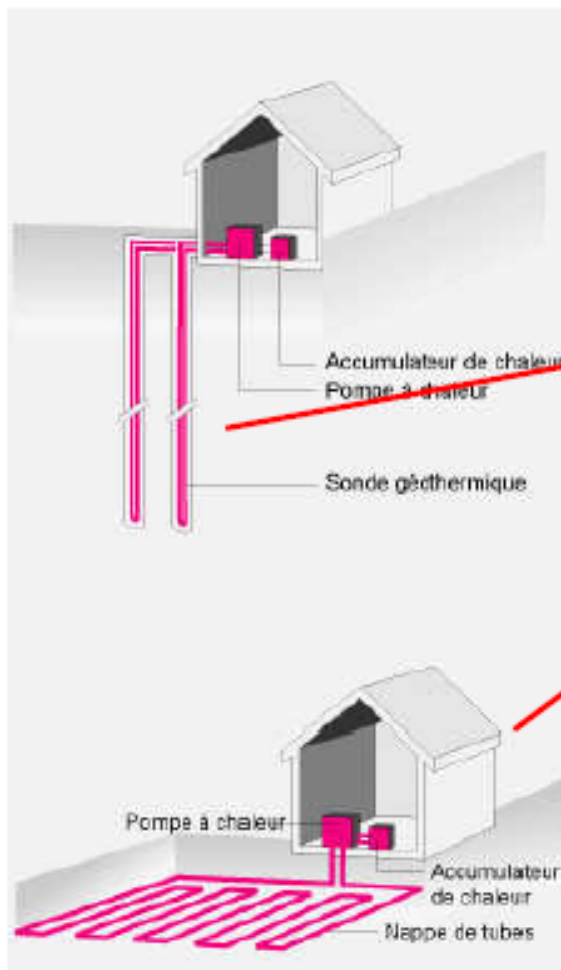
TERMO-FLUIDO-DYNAMIC MODEL



SIMULATED RESULTS



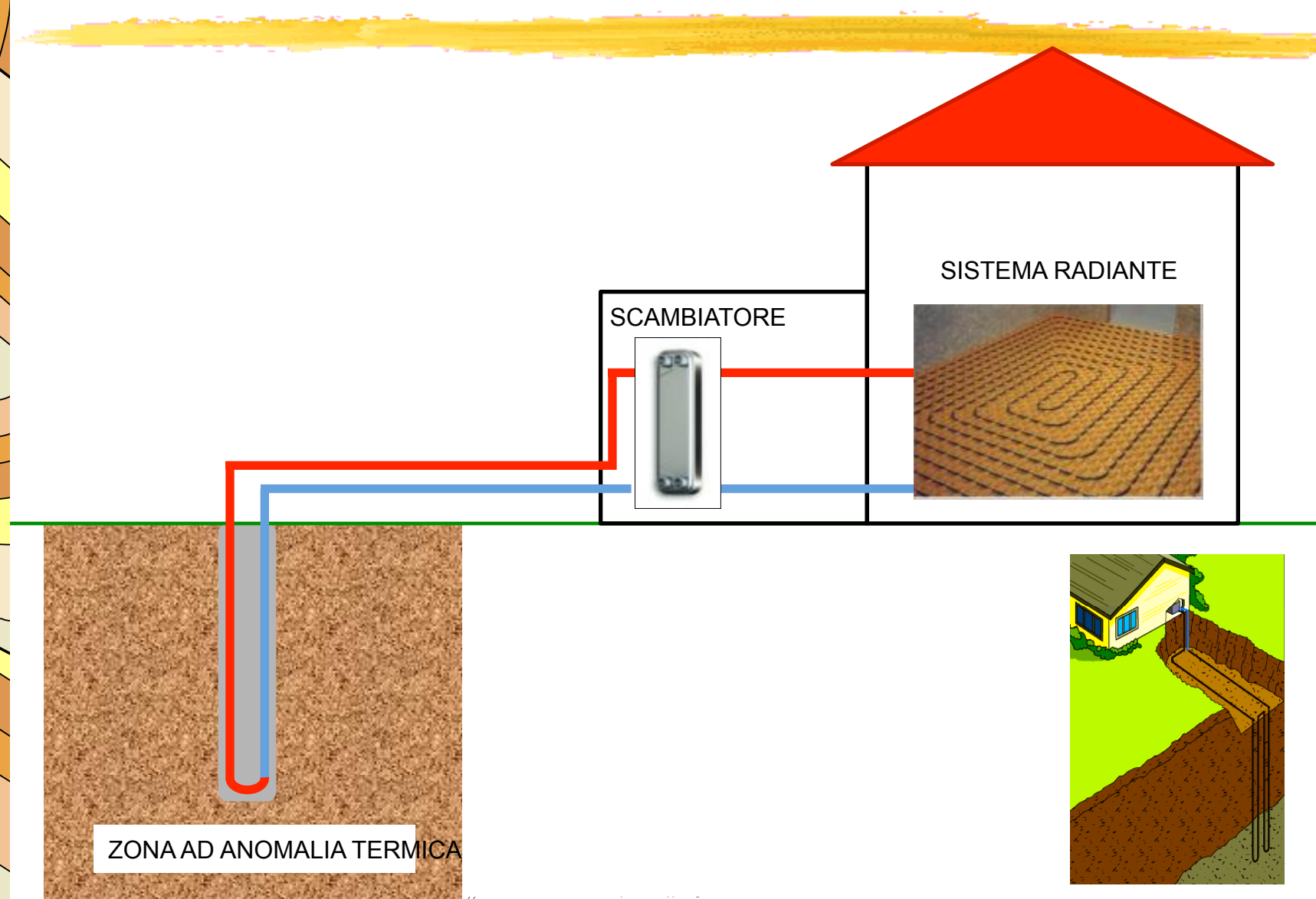
www.vigor-geotermia.it



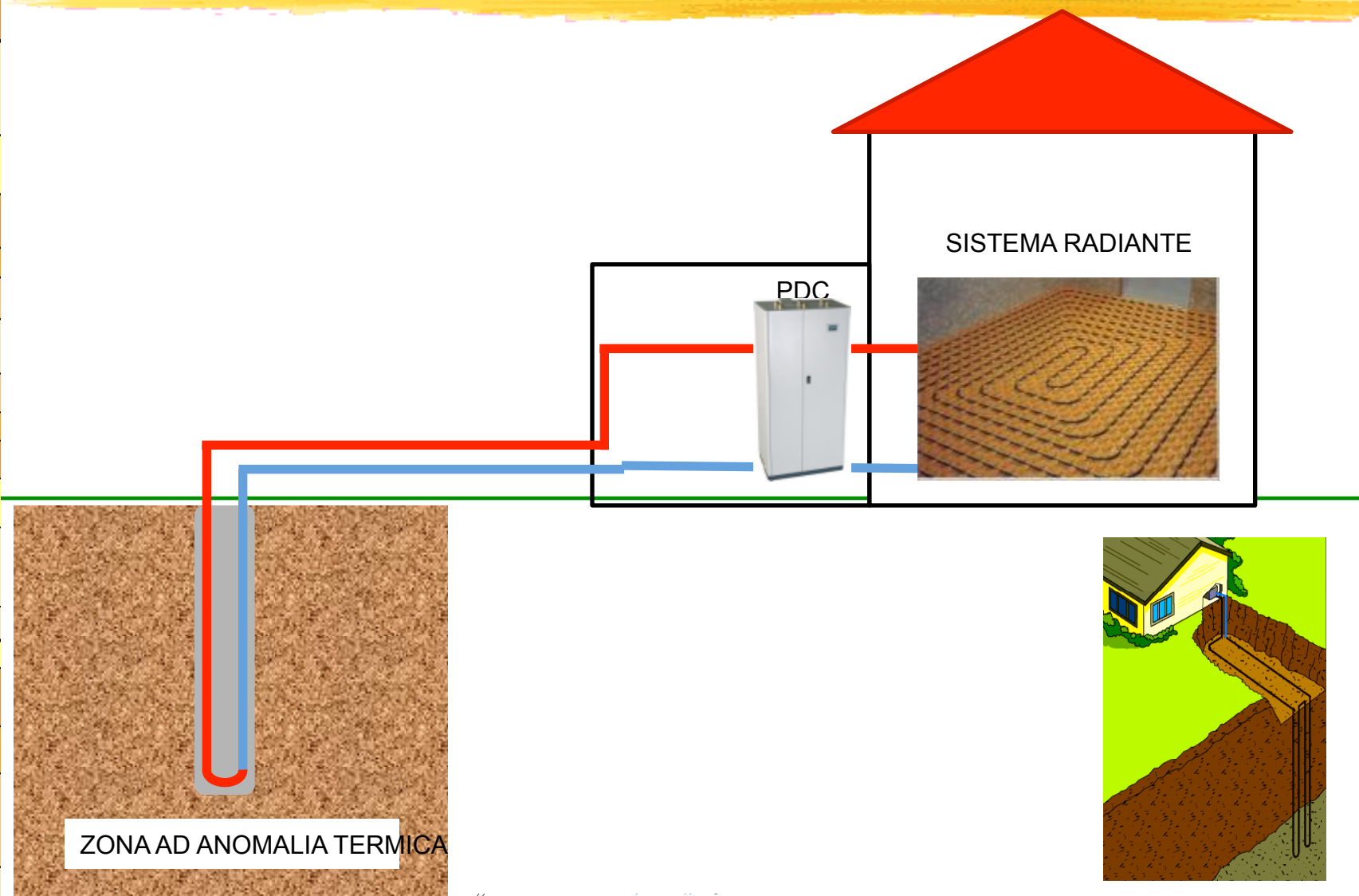
www.vigor-geotermia.it



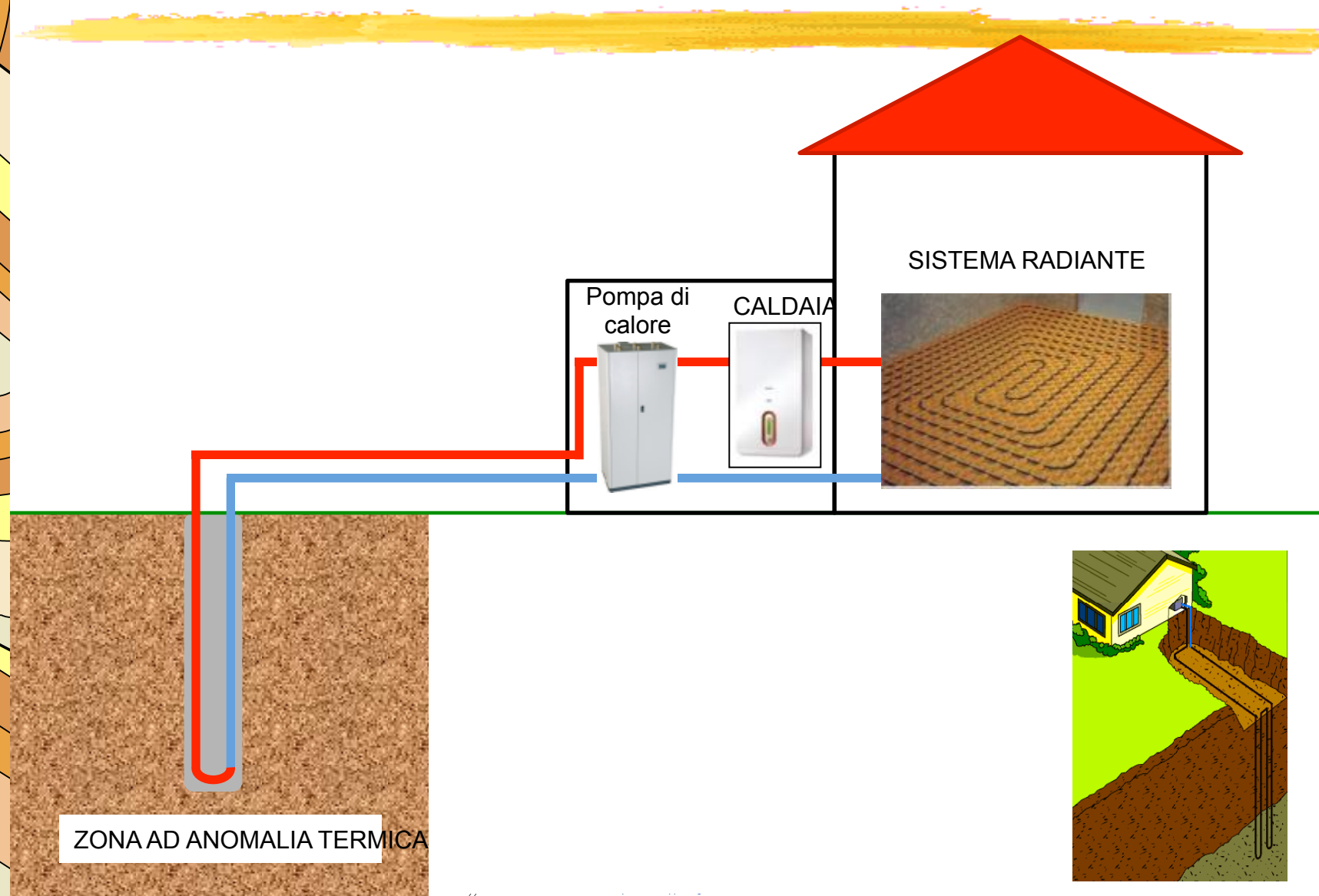
Soluzione 1 – Accoppiamento Diretto



Soluzione 2 – Impianto con PDC

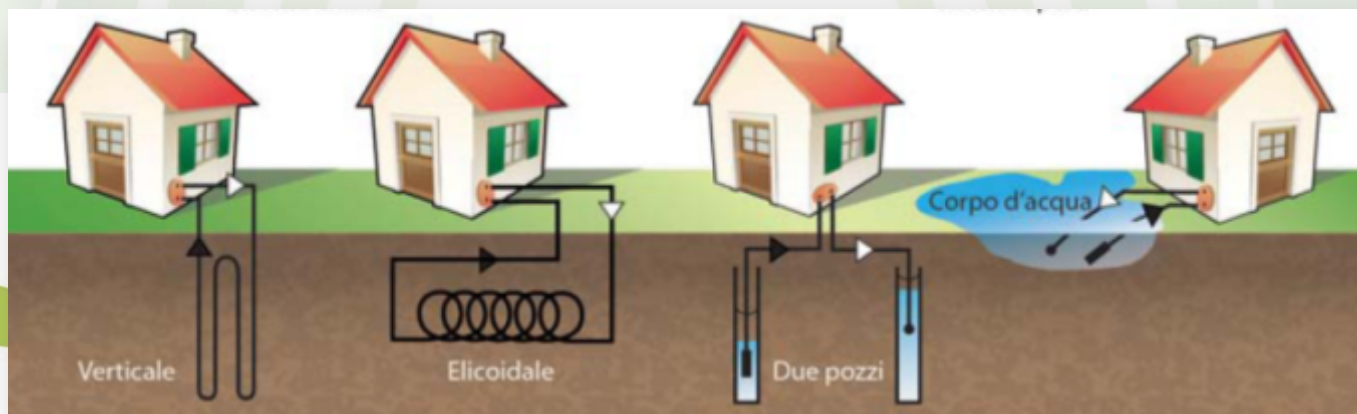
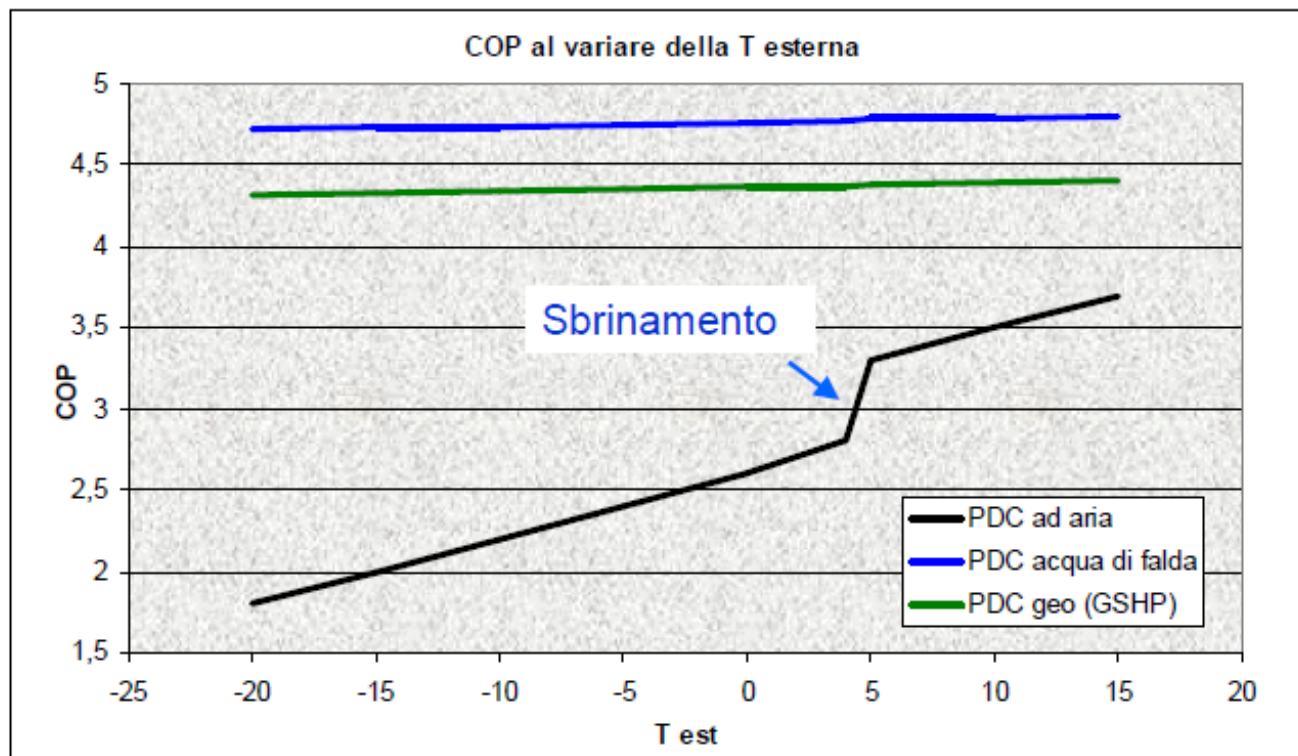


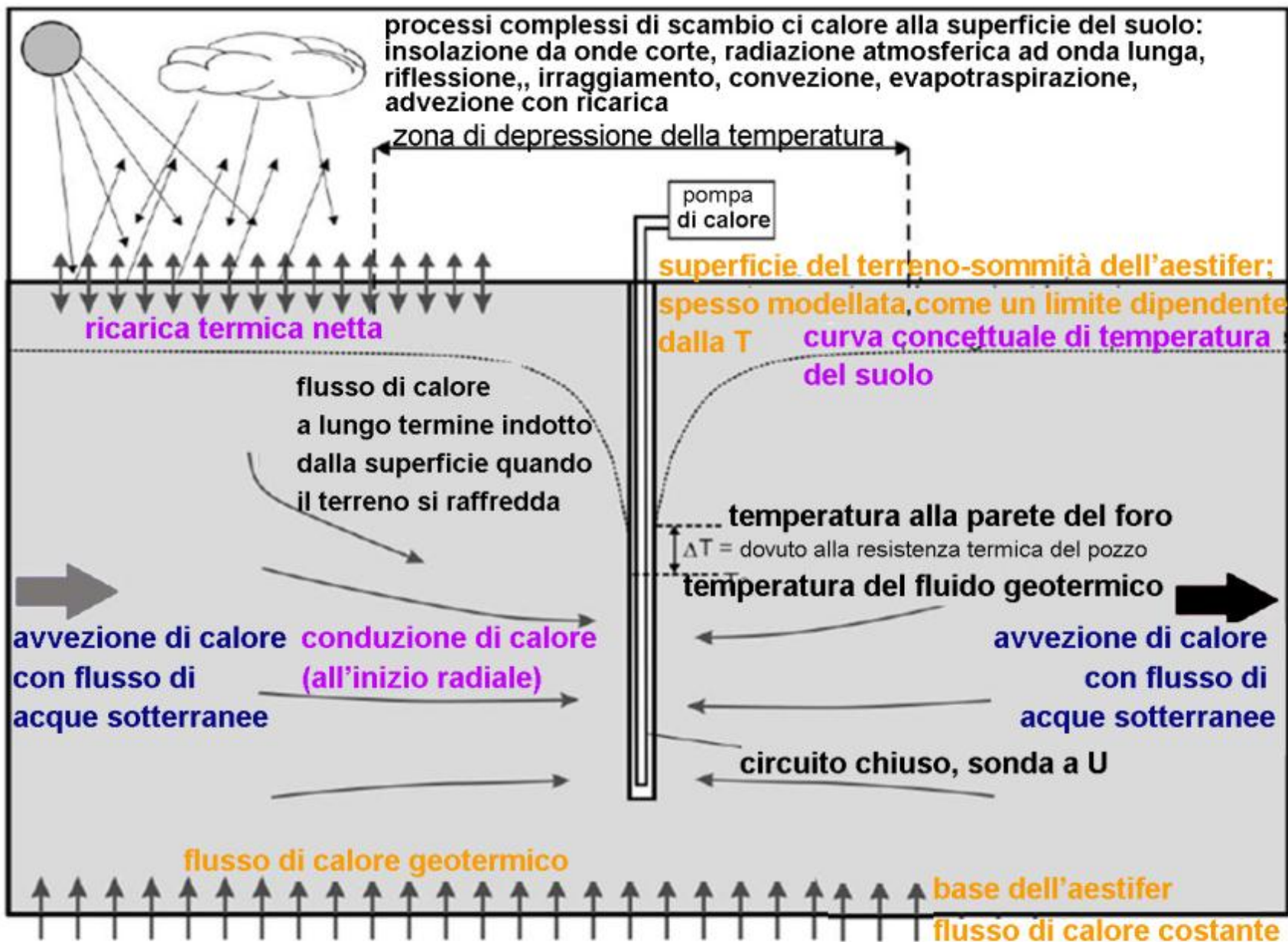
Soluzione 3 – Impianto ibrido





Nella PDC il prezzo del kWh di energia fornita dipende molto dalla sorgente da cui viene prelevato il calore





modello concettuale schematico di uno scambiatore di calore
a circuito chiuso in un aestifer



CONDUCIBILITÀ TERMICA

STUDIO DELLA CARTA GEOLOGICA

RACCOLTA DATI STRATIGRAFICI ED IDROGEOLOGICI

CREAZIONE DI UN DATABASE STRATIGRAFICO

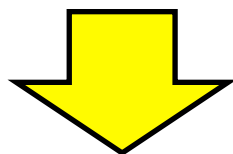
ANALISI GEOSTATISTICA DEI DATI

VALORE DI CONDUCIBILITÀ TERMICA (bibliografico)

MAPPA DELLA CONDUCIBILITÀ TERMICA (litologica)

MAPPA DELLA CONDUCIBILITÀ TERMICA (stratigrafica)

VALIDAZIONE (test su proprietà termiche dei materiali in situ ed in laboratorio)



MAPPA DI SINTESI DELLA CONDUCIBILITÀ TERMICA

www.vigor-geotermia.it



Programma Operativo Interregionale
ENERGIE RINNOVABILI E
RISPARMIO ENERGETICO
2007 - 2013
Una scelta illuminata



Sistemi di geoscambio: ruolo della componente geologica

La situazione geologica costituisce la parte invariante della filiera di impianto, la progettazione termotecnica ed architettonica si deve quindi adeguare ad essa.

E' quindi necessario conoscere adeguatamente la situazione geologica con il massimo dettaglio possibile:

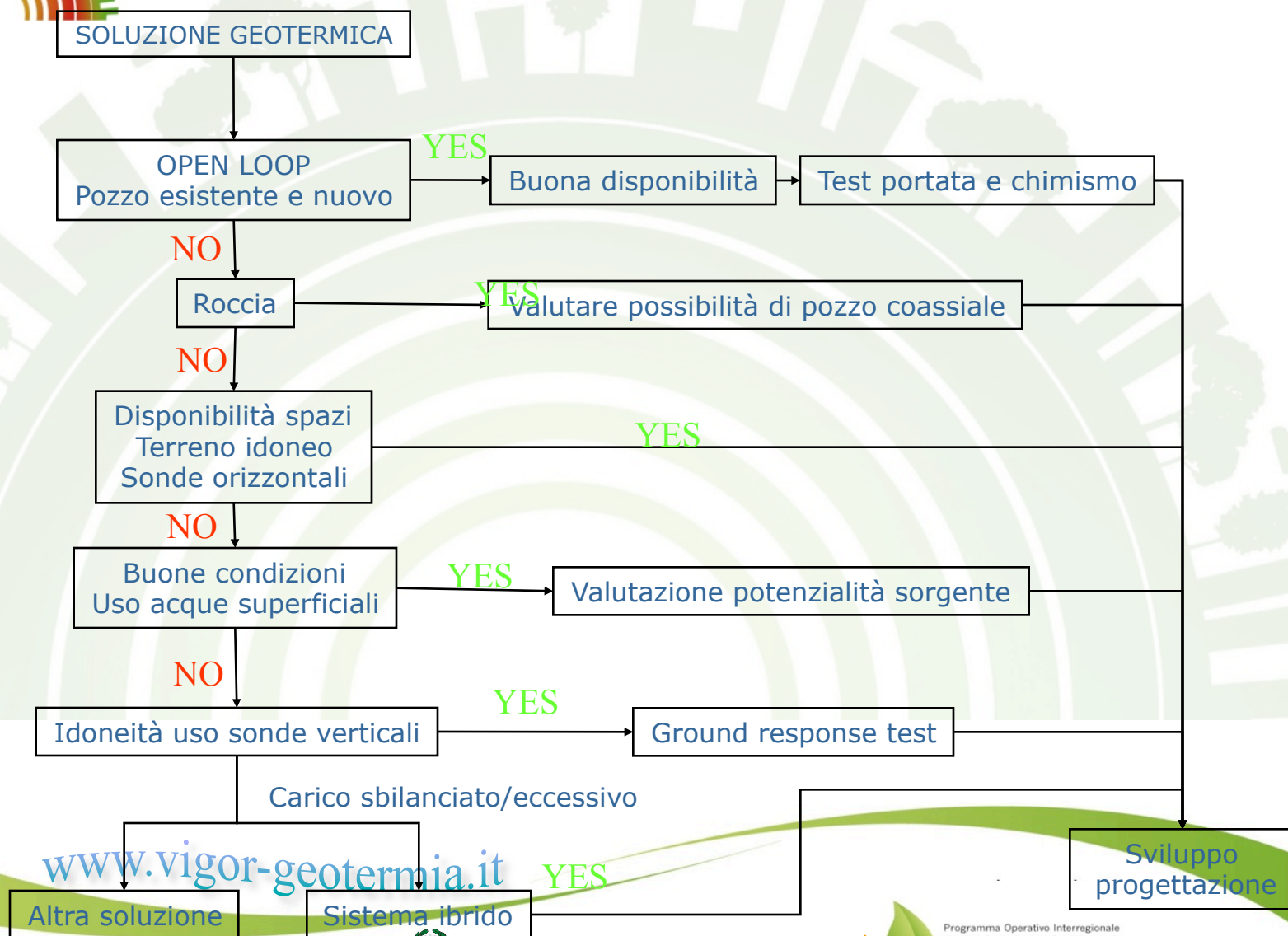
- **Tipo di roccia o sedimento**
(influenza il metodo di perforazione)
- **Caratteristiche termiche del sottosuolo**
(influenzano la progettazione ed il funzionamento)
- **Assetto idrogeologico**
(influenza la progettazione, la perforazione ed il funzionamento)
- **Temperatura del sottosuolo**
(influenza la progettazione dell'impianto)

www.vigor-geotermia.it



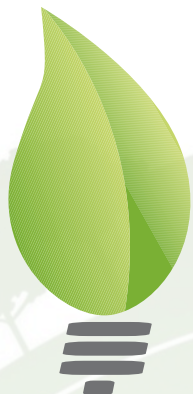


Flusso decisionale



www.vigor-geotermia.it





Programma Operativo Interregionale
**ENERGIE RINNOVABILI E
RISPARMIO ENERGETICO**
2007 - 2013

Una scelta illuminata

ORGANISMI INTERMEDI



REGIONI "CONVERGENZA"



AUTORITA' DI GESTIONE



Dipartimento per l'Energia
Direzione Generale
per l'Energia Nucleare,
le Energie Rinnovabili
e l'Efficienza Energetica
Divisione IX

GRAZIE PER L'ATTENZIONE

