

# L'esplorazione dei campi geotermici di alta e media entalpia



Prof. Franco Berberi - Dipartimento di Scienze Geologiche

Università di Roma Tre

Roma 7 Aprile 2011

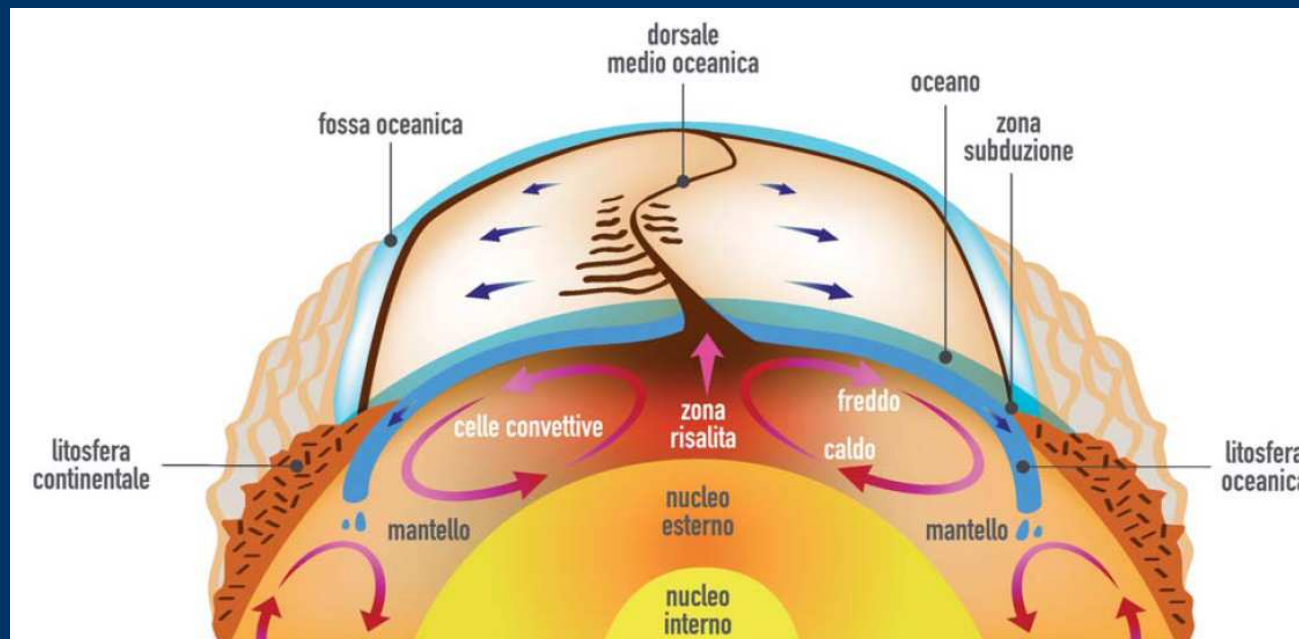
# Energia geotermica

Il calore interno della Terra può essere utilizzato a fini energetici quando l'acqua meteorica si infiltra in profondità lungo sistemi permeabili, viene riscaldata dalla circolazione all'interno di rocce calde profonde, si accumula in serbatoi di rocce permeabili e può venire estratta alla superficie mediante la perforazione di pozzi.



Il pianeta Terra rilascia continuamente calore verso la superficie. Questo flusso di calore è particolarmente elevato nelle zone vulcaniche (dorsali oceaniche, cordigliere, archi di isole, punti caldi) dove il magma fuso, con una T di 800-1100°C, può accumularsi in serbatoi a piccola profondità (<10 km).

Nel nucleo interno della Terra a 6400 km di profondità, la T è superiore a 5000°C. Nello strato di mantello fuso, chiamato astenosfera, i cui moti convettivi sono la causa degli spostamenti delle zolle litosferiche che producono le dorsali medio-oceaniche, le grandi fosse tettoniche e le catene di montagne, la temperatura è superiore a 1200°C.



# Gradiente geotermico

La presenza di queste zone calde profonde implica che in ogni punto della Terra la temperatura aumenta con la profondità. Il gradiente geotermico medio è di circa  $33\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$ , ma può arrivare anche a valori dieci volte superiori nelle zone “calde” al di sopra di serbatoi magmatici.

Il gradiente geotermico scende invece a valori di  $10\text{-}20\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}$  nelle zone “fredde” situate nelle aree geologicamente stabili, lontane dalle frontiere sia divergenti che convergenti tra zolle litosferiche

# Classificazione delle risorse geotermiche

L'entalpia esprime la quantità di energia termica di una data massa di fluido

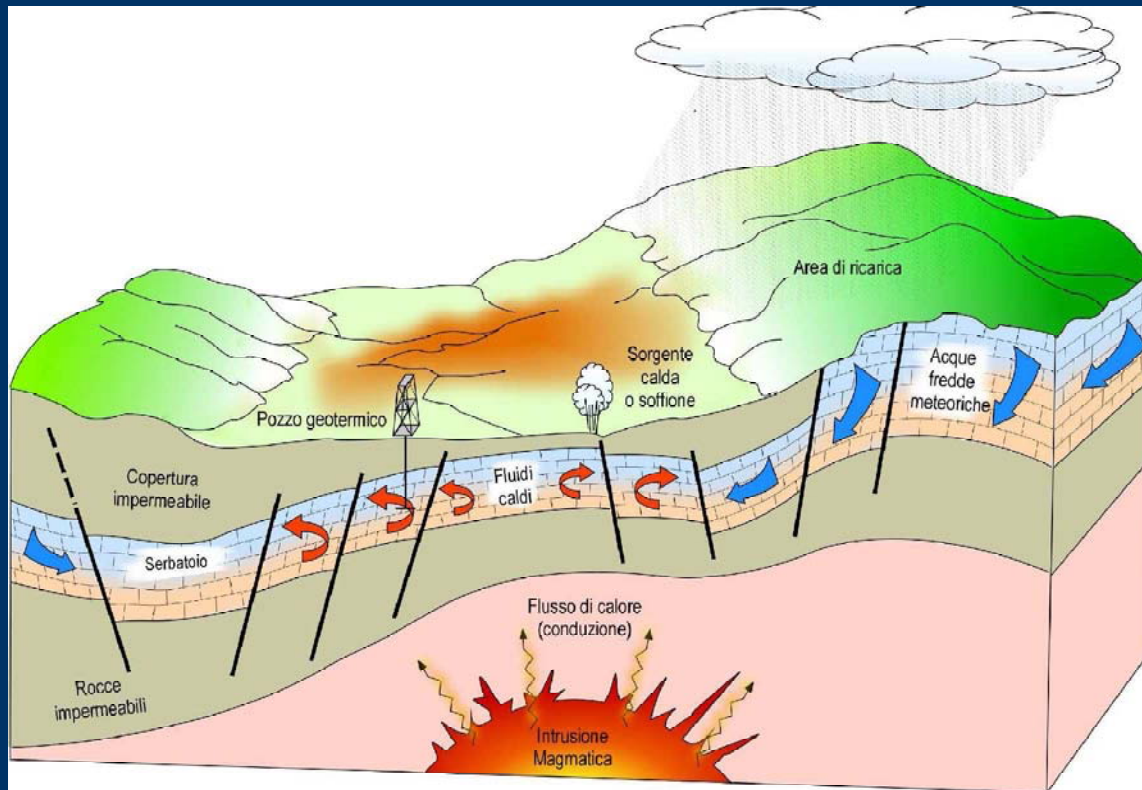
<i>Risorsa</i>	<i>T °C</i>	<i>Usi principali</i>
<b>Alta entalpia</b>	<b>&gt; 150</b>	<b>Generazione di elettricità</b>
<b>Media entalpia</b>	<b>90-150</b>	<b>Elettricità con sistemi binari, utilizzando fluido di servizio a bassa T di vaporizzazione (es. isobutano)</b>
<b>Bassa e bassissima entalpia</b>	<b>13-90</b>	<b>Agricoltura, industria, riscaldamento/affrescamento</b>

# Produzione elettrica dalla geotermia 2010

Paese	Capacità installata <i>MW</i>	Energia prodotta <i>GWh</i>
USA	3093	16.603
Filippine	1904	10.311
Indonesia	1197	9.600
Messico	958	7.047
<b>Italia</b>	<b>843</b>	<b>5.520</b>
Nuova Zelanda	628	4.055
Islanda	575	4.597
Giappone	536	3.064
El Salvador	204	1.422
Costa Rica	166	1.131
Totale nel mondo (24 paesi)	10.715	67.246

# Schema di campo geotermico di entalpia alta o media

Un campo geotermico di entalpia alta o media utilizzabile per produrre energia elettrica, richiede la coesistenza dei seguenti elementi:



Una sorgente di calore profonda

- Un serbatoio geotermico

- Un'adeguata ricarica del serbatoio

- La presenza sopra il serbatoio di una copertura di rocce impermeabili

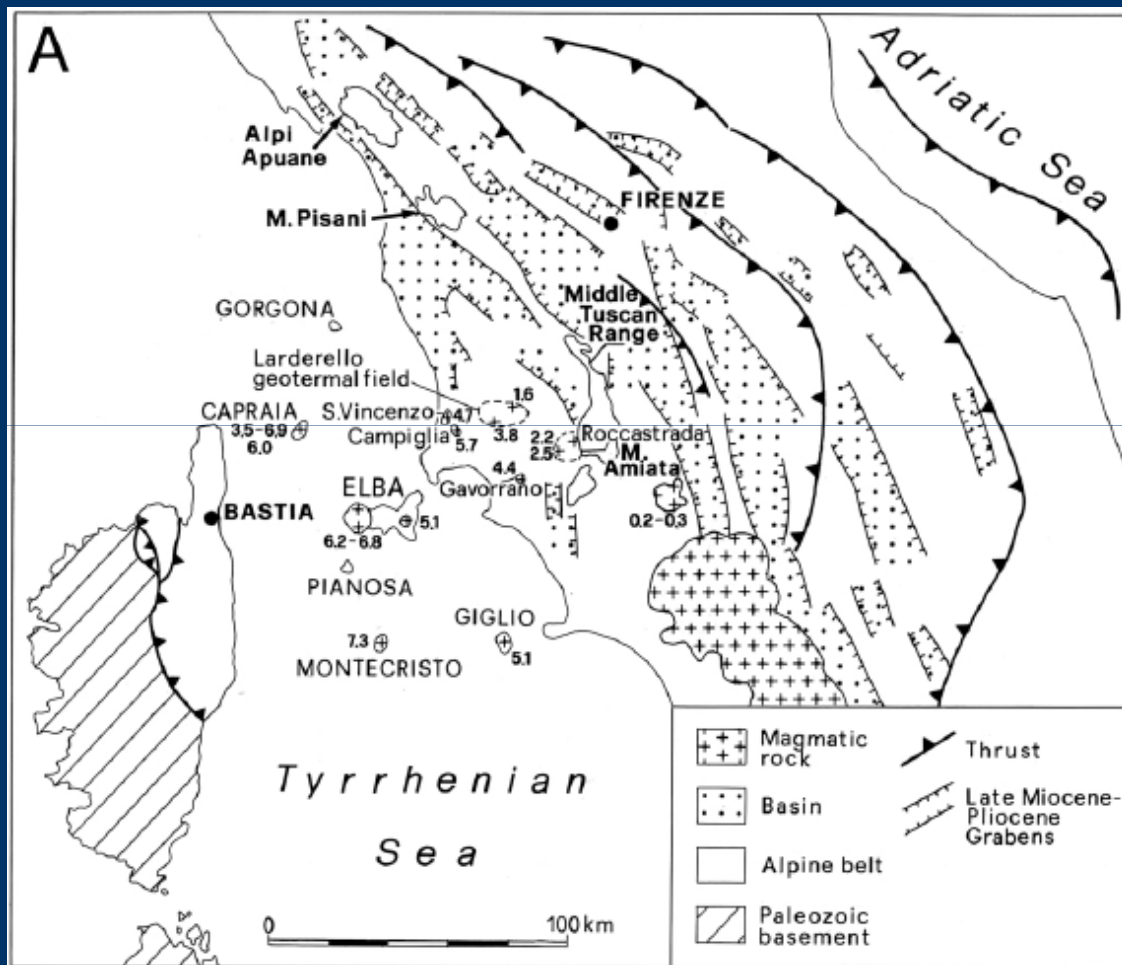
# L'esplorazione geotermica

Gli studi geologici consentono di stimare età, dimensioni, profondità e T della sorgente di calore e di valutare la presenza di copertura e serbatoio.

Gli studi geochimici (sorgenti termali, gas) consentono di stimare T e composizione del fluido profondo e di valutarne il potenziale corrosivo e di incrostazione.

Gli studi geofisici (gravimetria, geoelettrica, MT, sismica) consentono di ricostruire profondità e geometria del serbatoio. Con pozzetti di gradiente si può stimare la T di zone idrogeologicamente note.

# Evidenze di sorgente di calore in aree non vulcaniche (es. Larderello)

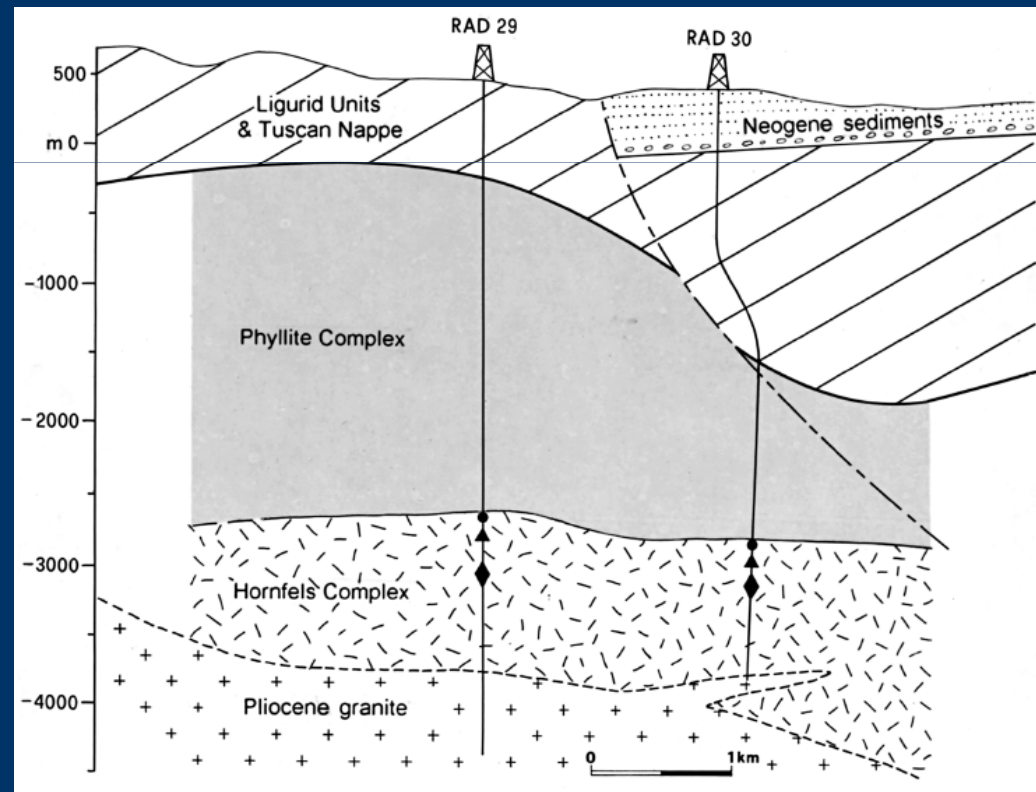


Ubicazione nella  
provincia magmatica  
toscana con  
magmatismo anatettico  
Plio-Quaternario

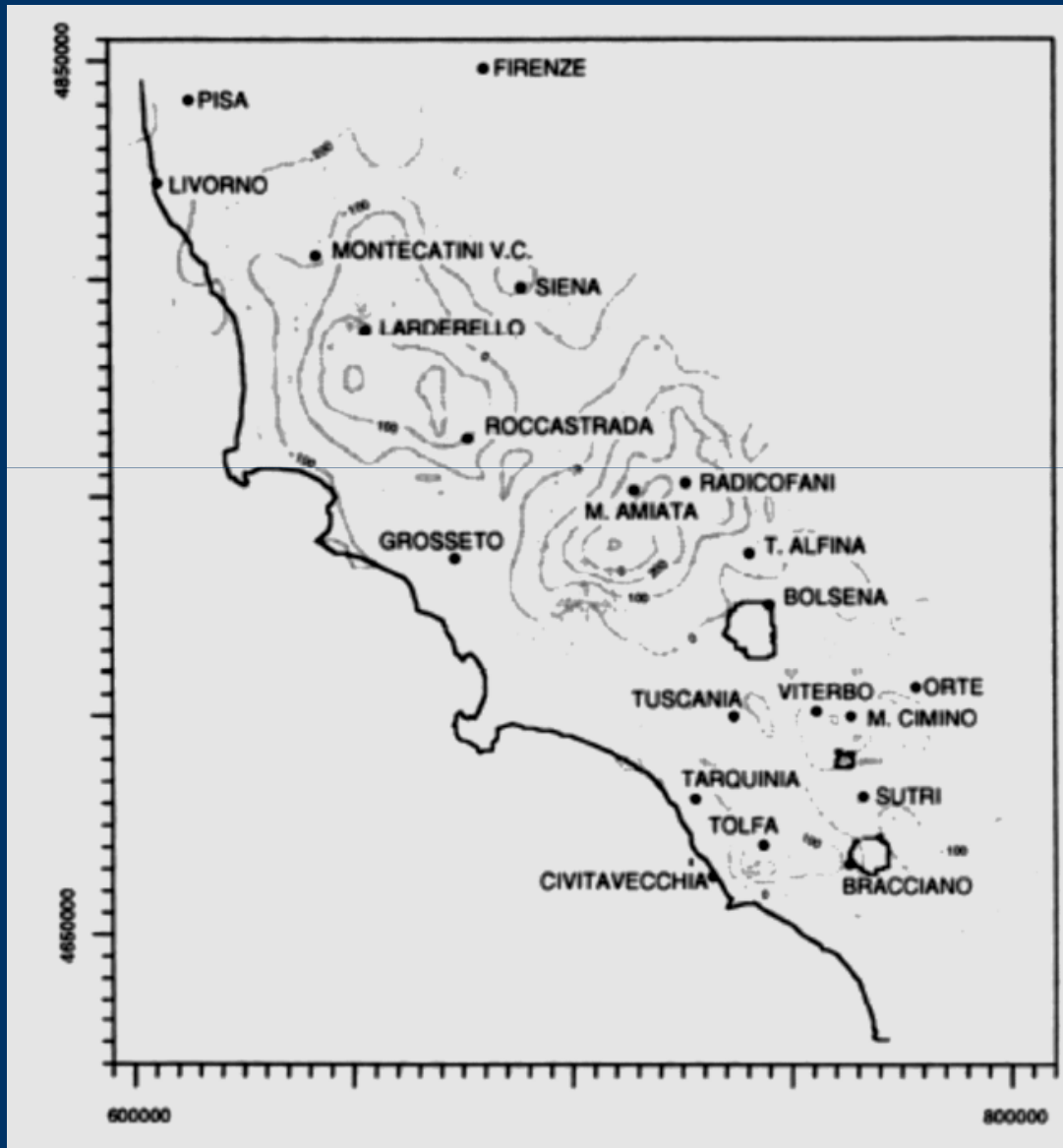
Magmatismo recente  
generato dalla fusione  
parziale della crosta  
continentale riflette  
una forte anomalia  
termica.

# Larderello

Intrusioni granitiche trovate in pozzi profondi  
Doppio serbatoio geotermico: a) superficiale in carbonati b) profondo in rocce metamorfiche fratturate



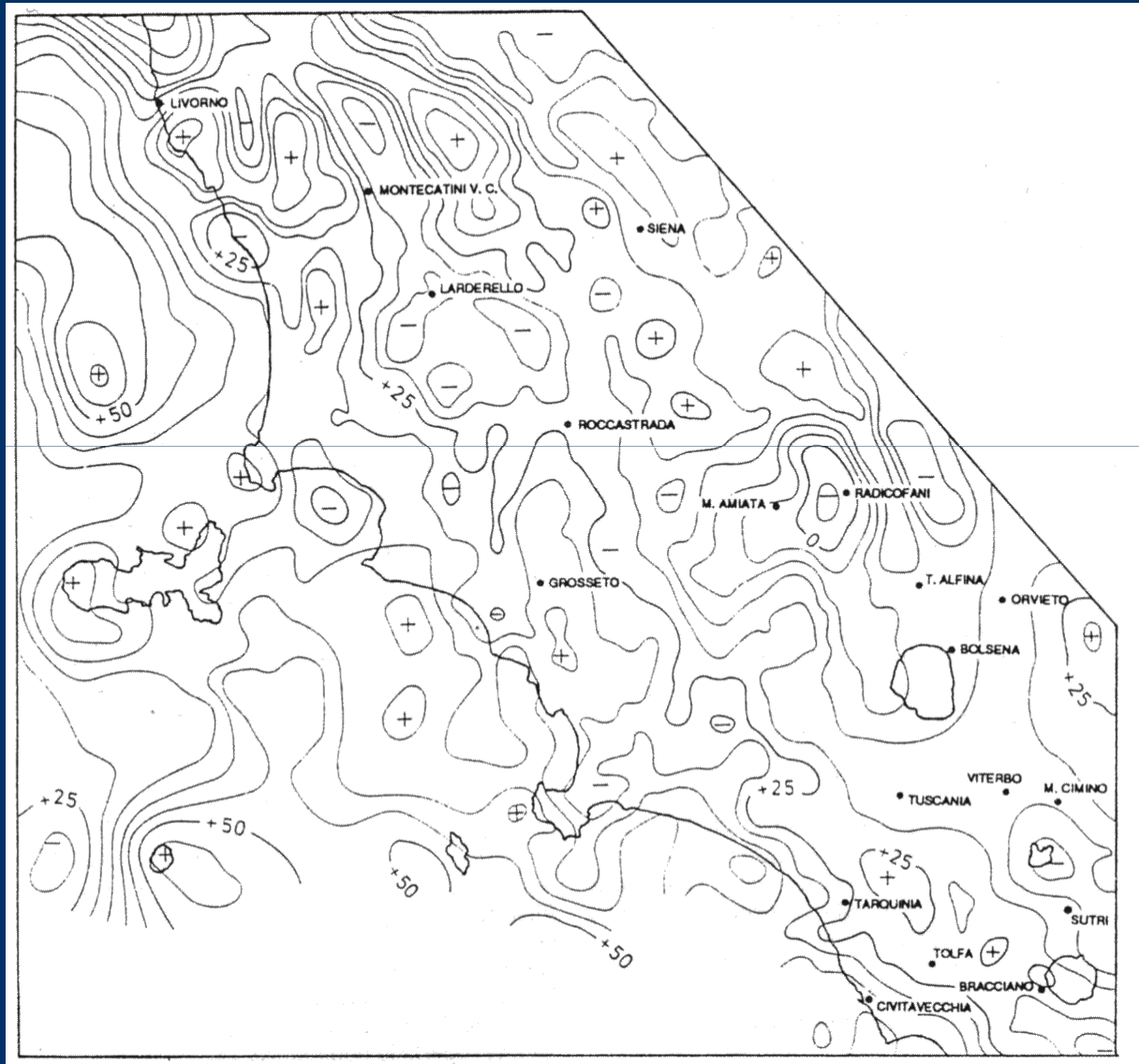
# Evidenze di sorgente di calore in aree non vulcaniche (es. Larderello)



Presenza di intrusione magmatica recente suggerita da sollevamento centralizzato sedimenti Pliocenici

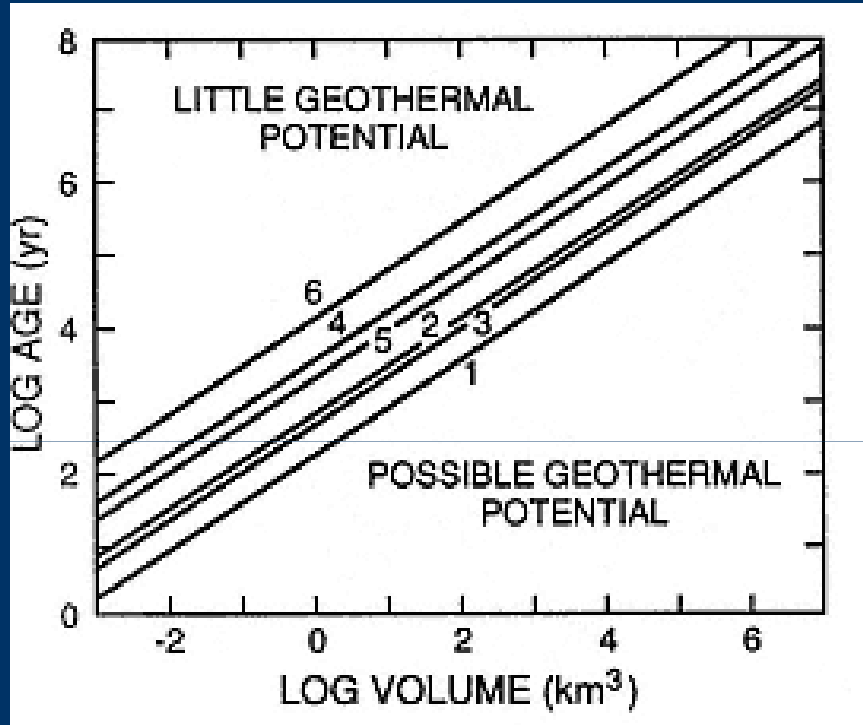
Stesso fenomeno si osserva nell'area del M. Amiata dove però il magma ha prodotto attività vulcanica (0.2-0.3 Ma)

# Evidenze di sorgente di calore in aree non vulcaniche (es. Larderello)



Presenza di corpi intrusivi poco densi nel sottosuolo di Larderello e M. Amiata rivelata da anomalie gravimetriche negative di forma circolare

# Evidenze di anomalie termiche in aree vulcaniche (primo approccio qualitativo=riconoscimento)



Età e volume dei prodotti evoluti (rioliti, riodaciti, trachiti, fonoliti)

Questi prodotti sono differenziati di magmi basici in serbatoi superficiali (camere magmatiche)

Il volume dei prodotti evoluti corrisponde a un volume 80-90% più grande di magma basico non eruttato

Le zone vulcaniche di interesse geotermico hanno di regola grossi volumi di prodotti evoluti di età recente (grossa camera magmatica)

Vulcanismo basico anche recente riflette risalita rapida del magma e non produce necessariamente anomalie termiche nella crosta superiore

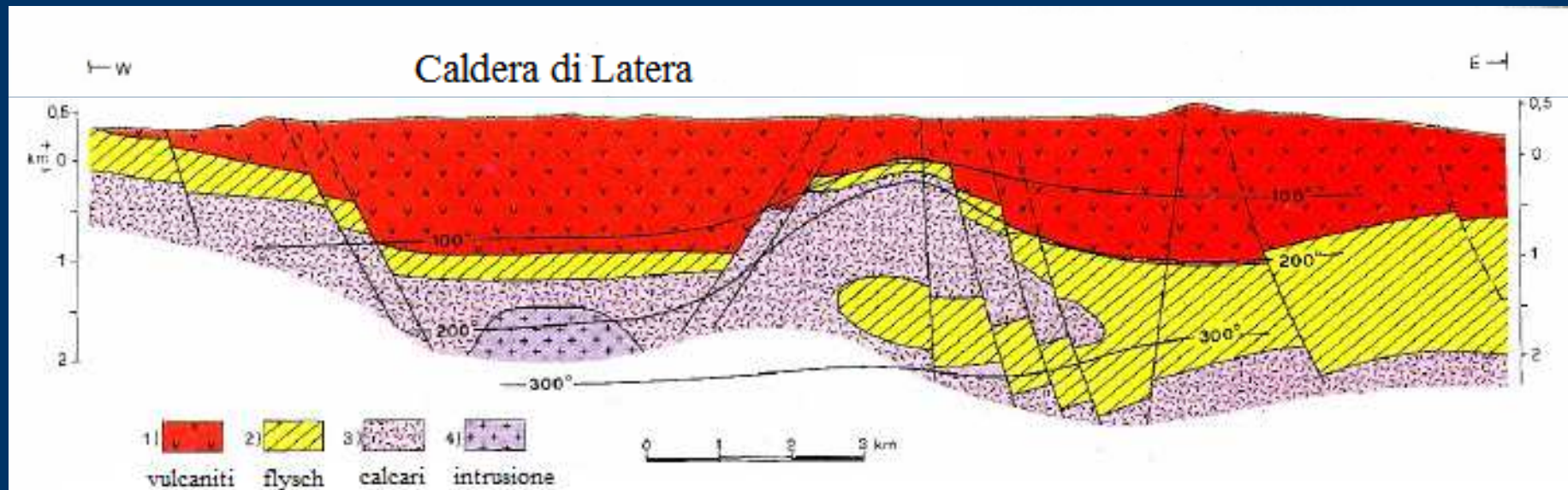
## Stima termica di due vulcani attivi italiani

Camera magmatica	Vesuvio	Campi Flegrei
Volume (km <sup>3</sup> )	2	300
Prof. tetto (km)	2	4-5
Età messa in posto (anni)	17.000	35.000
T. iniziale (°C)	1200	1200
Stima	Sorgente troppo piccola per produrre anomalia termica di interesse	Sorgente molto grande. Una T. di 900°C può persistere nella camera. Alto interesse geotermico
Risultati di pozzi	55°C a 2000 m	350-420°C a 2000-300 0 m

# Caldere recenti: siti privilegiati per la geotermia

Collasso calderico indica la presenza di camera magmatica a piccola profondità (parzialmente svuotata da eruzione) = sorgente calore

In caldere recenti persiste l'anomalia termica



# Stima quantitativa della sorgente di calore (camera magmatica in aree vulcaniche)

## Parametri da conoscere

- Volume: vol. minimo può essere stimato dal volume dei prodotti evoluti (o del collasso calderico) noto il grado di frazionamento  $F$  che si può stimare con metodi geochimici (concentrazione elementi residuali)

$$C_R = C_{Ri} * F^{-1}$$

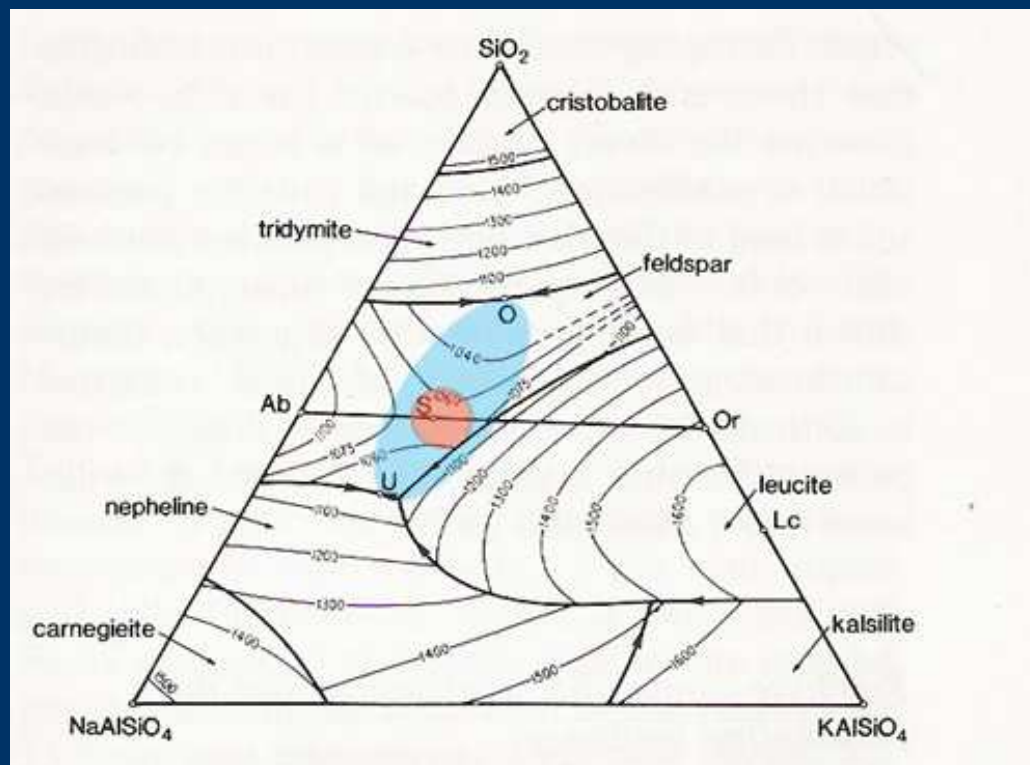
- Età: da metodi radiometrici
- Temperatura: da termometria ottica e/o dagli equilibri solido-liquido (es. sistema petrogenetico residuale)
- Profondità: dalla stima della  $pH_2O$  (es. sistema petrogenetico residuale), è il parametro più difficile da stimare

# Sistema petrogenetico residuale

La posizione nel diagramma del vetro residuale di prodotti evoluti coesistente con:

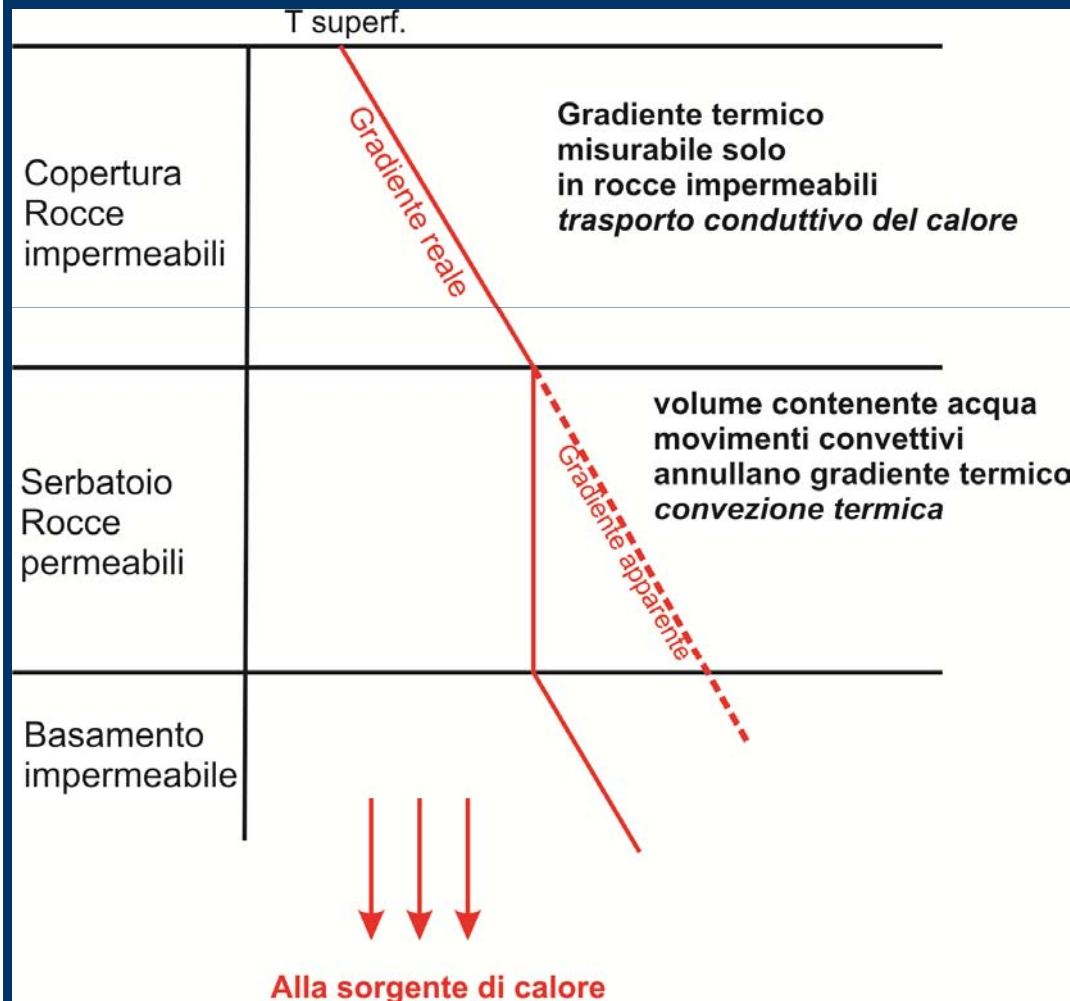
- cristalli di quarzo e feldspato alcalino (rioliti)
- cristalli di leucite e feldspato alcalino (fonoliti)
- cristalli di nefelina e feldspato alcalino (fonoliti)

permette di stimare T e  $p_{H_2O}$  di cristallizzazione (condizioni fisiche della camera magmatica).



# Stima quantitativa della sorgente di calore (camera magmatica in aree vulcaniche)

Noti profondità, volume e  $T$  della sorgente,  $T$  superficiale, stimati gradiente pre-intrusione, conducibilità e diffusività termica delle rocce, si può elaborare un modello termico conduttivo

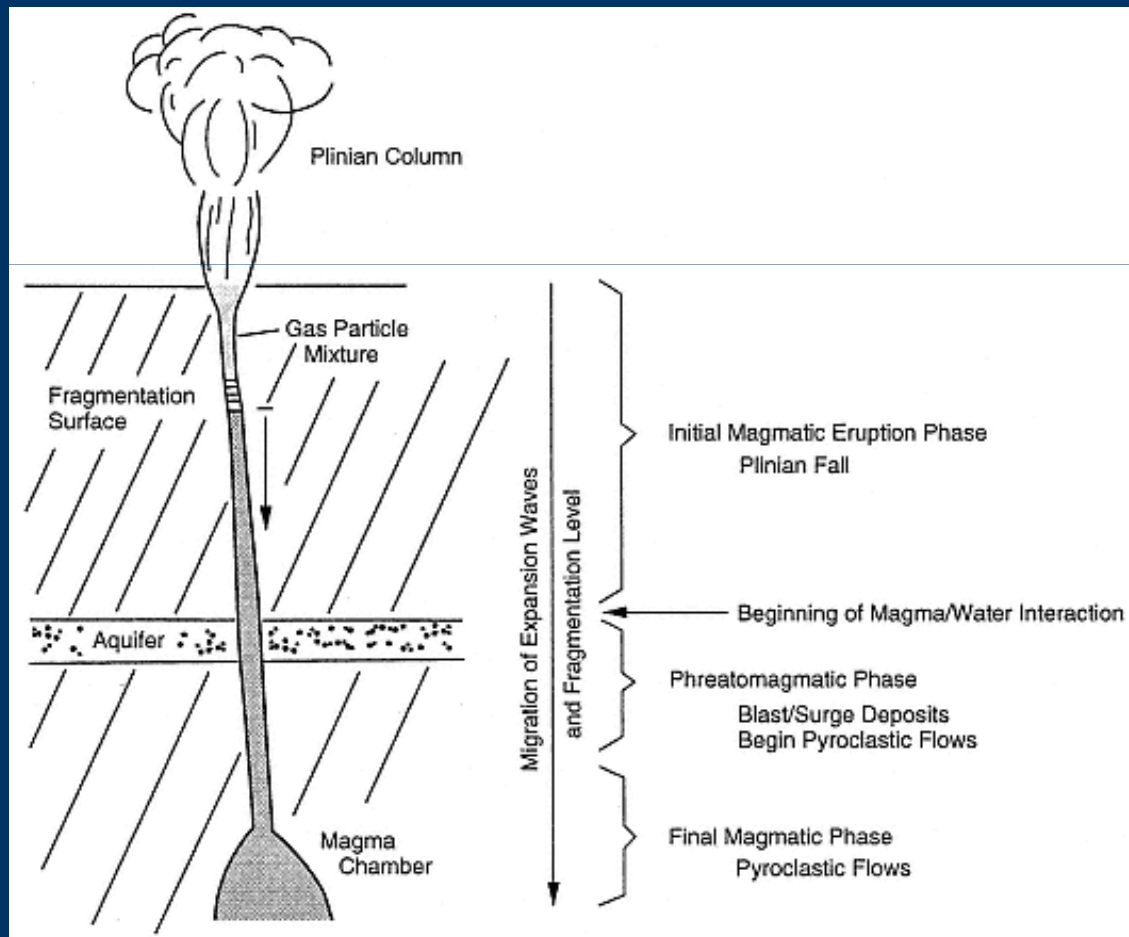


Se si conosce spessore e profondità dei livelli permeabili si può elaborare un modello conduttivo-convettivo

N.B. le misure di  $T$  nei pozzetti di gradiente geotermico devono essere fatte in rocce impermeabili e il gradiente può essere estrapolato solo fino all'estensione della copertura

## Informazioni geotermiche da depositi freato-magmatici

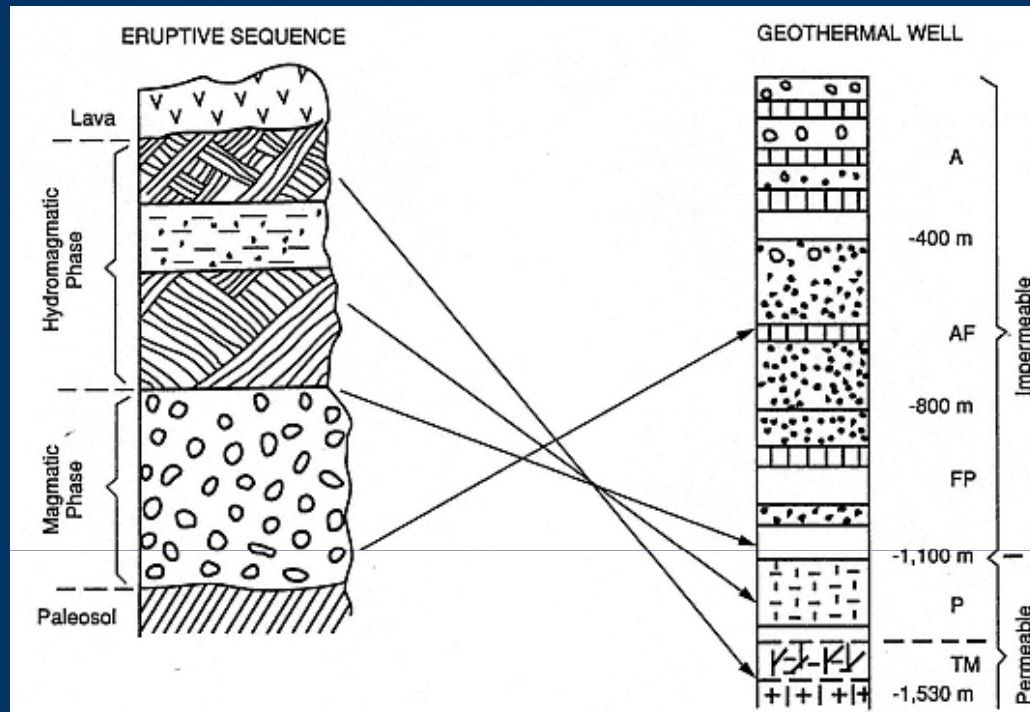
Se un magma primariamente frammentato viene a contatto con un acquifero sotterraneo, la vaporizzazione produce una forte ulteriore frammentazione del magma. La nube eruttiva produce depositi di surge che contengono litici (xenoliti) delle rocce dell'acquifero



Il riconoscimento di depositi freato-magmatici indica la presenza di un acquifero profondo

Lo studio dei loro xenoliti consente di accertare se l'acquifero ha interesse geotermico

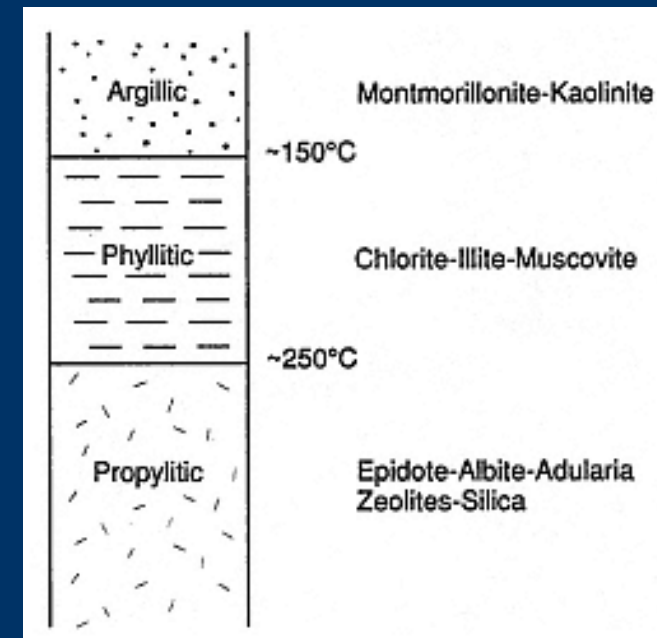
# Informazioni geotermiche da depositi freato-magmatici



Sequenza eruttiva e provenienza degli xenoliti (dalla stratigrafia di un pozzo geotermico) a Nysiros (Grecia)

## Zoneografia dei minerali idrotermali

Le paragenesi idrotermali indicano la T del sistema e le condizioni di self-sealing (zone argillitica e fillitica) o di potenziale permeabilità nel serbatoio (zona propilitica)

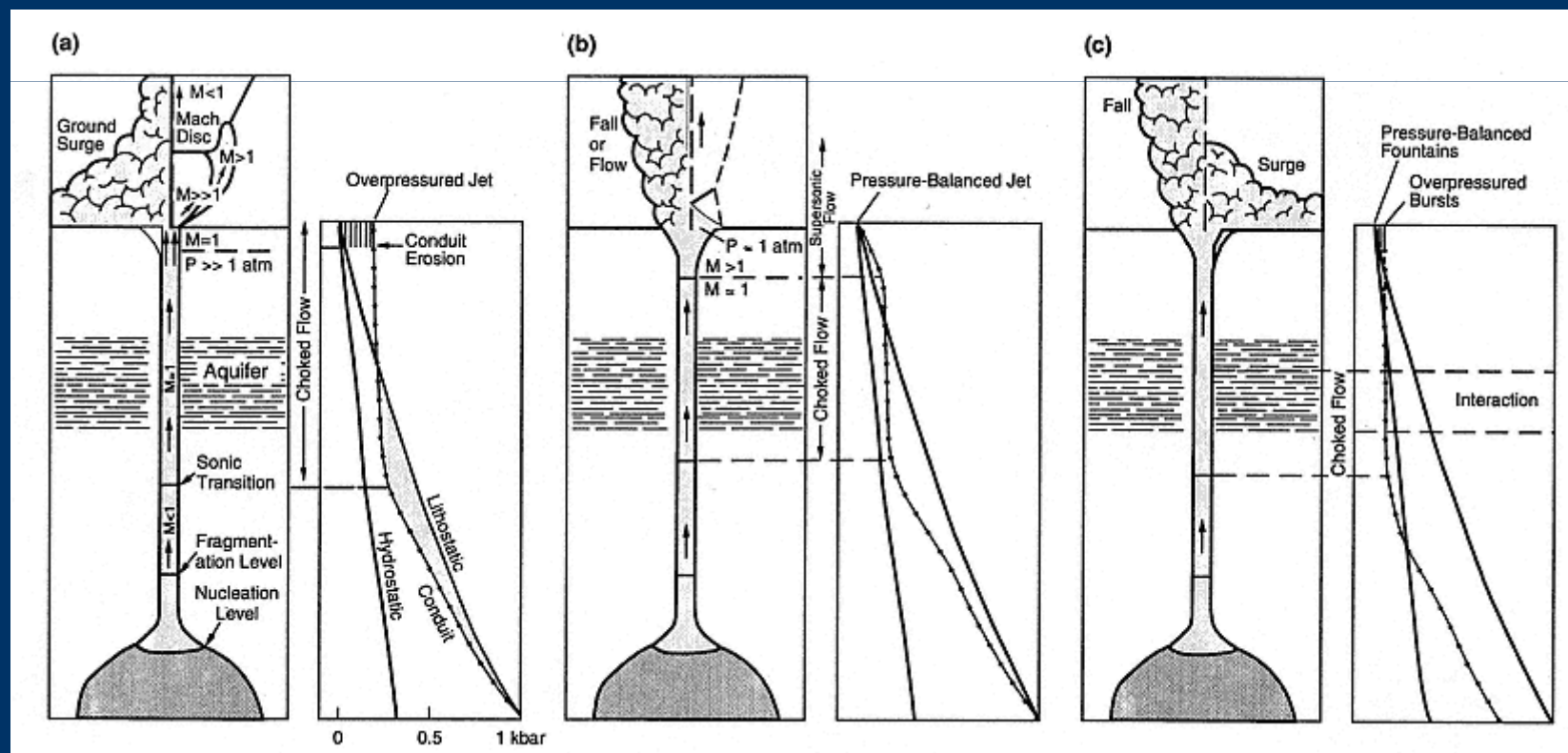


# Informazioni geotermiche da depositi freato-magmatici

Eruzioni freato-magmatiche: interazione esplosiva magma-acqua avviene quando la pressione dei gas  $<$  pressione idrostatica dell'acquifero

Questo si verifica di regola nelle fasi finali di un'eruzione esplosiva e i depositi freato-magmatici spesso chiudono l'eruzione

Informazioni significative solo per magmi con alta P-gas o se xenoliti non hanno alterazione idrotermale (acquifero freddo)

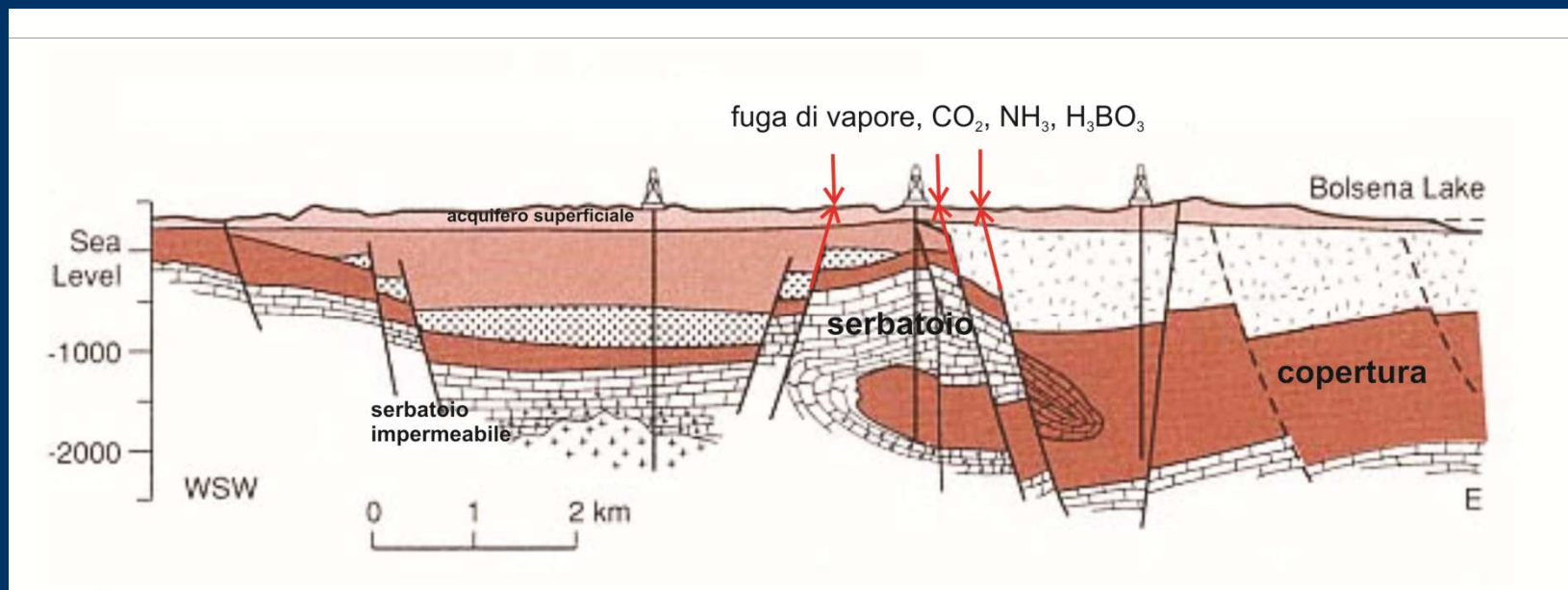


## Esplorazione geochimica: anomalie di fuga di vapore

Dal serbatoio geotermico di alta entalpia sfuggono alla superficie lungo faglie vapore e sostanze volatili che hanno affinità con la fase vapore ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_3\text{BO}_3$ )

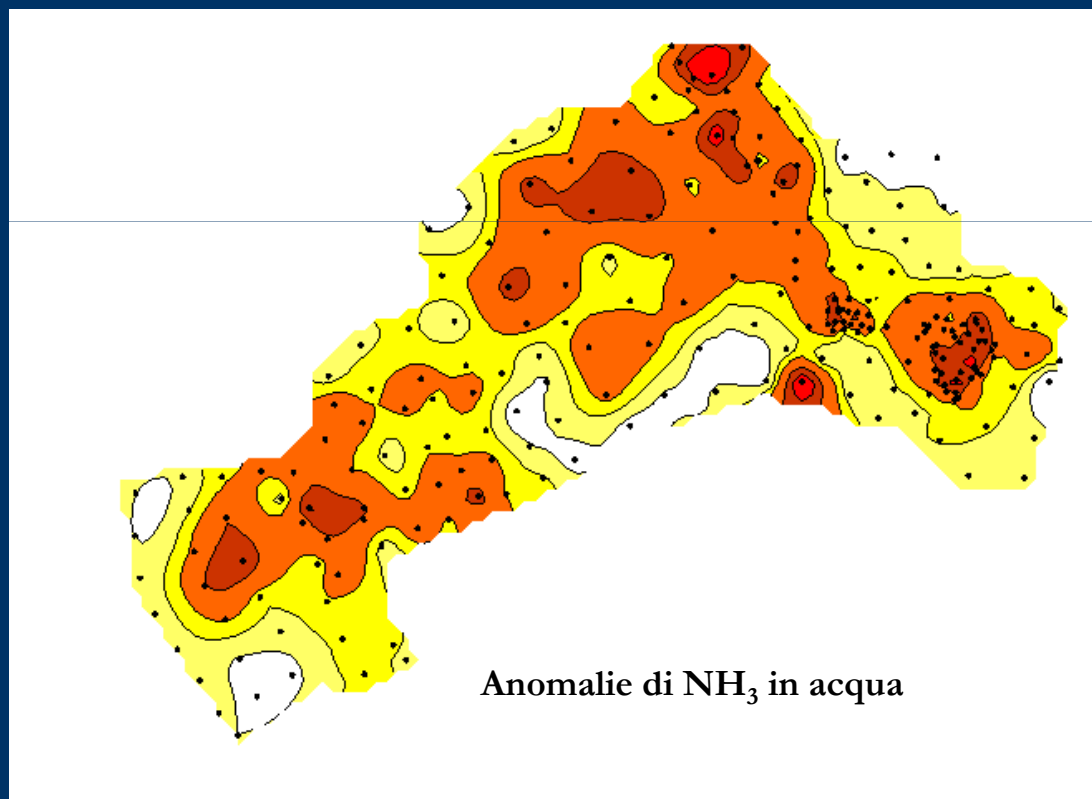
Incontrando acquiferi superficiali freddi, il vapore condensa ma nell'acqua si generano anomalie di concentrazione delle sostanze volatili ( $\text{NH}_3$  e  $\text{H}_3\text{BO}_3$ ).

Analizzando le acque superficiali si ottengono mappe delle anomalie di fuga



## Esplorazione geochimica: anomalie di fuga di vapore

Le anomalie identificano la presenza di un serbatoio di alta entalpia (perché produce vapore) e le fratture da cui i fluidi sfuggono alla superficie



L'applicabilità dipende dal numero di punti campionabili cioè dalla presenza di un acquifero superficiale accessibile

# Il flusso di CO<sub>2</sub> dal suolo come indicatore di permeabilità profonda

Spesso i pozzi profondi di esplorazione geotermica risultano sterili perché non trovano una permeabilità adeguata e non possono essere usati come produttori o reiniettori, con una forte perdita economica

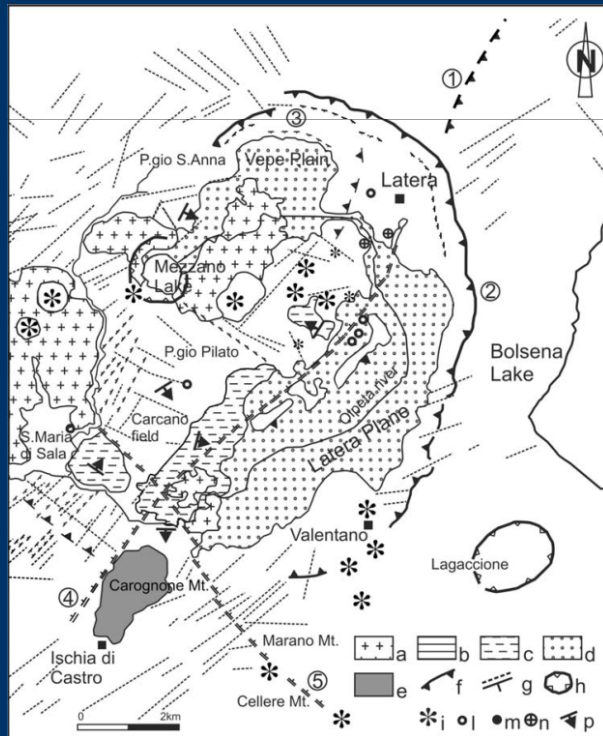
CO<sub>2</sub> è dopo il vapore, il volatile principale dei serbatoi geotermici dai quali sfugge alla superficie attraverso faglie e fratture

La prospezione del degassamento diffuso di CO<sub>2</sub> dal suolo permette l'identificazione di serbatoi geotermici profondi degassanti e quindi permeabili



# La caldera di Latera

- Vulcano Quaternario alcali-potassico
- Serbatoio geotermico in carbonati Mesozoici (alto strutturale NE)
- Tetto a 500-2000 m profondità
- $T = 200-300\text{ }^{\circ}\text{C}$
- $P_{\text{CO}_2} = 100-200\text{ bars}$



Dieci pozzi profondi perforati nella caldera:

- 5 produttivi
- 5 non produttivi (no permeabilità)

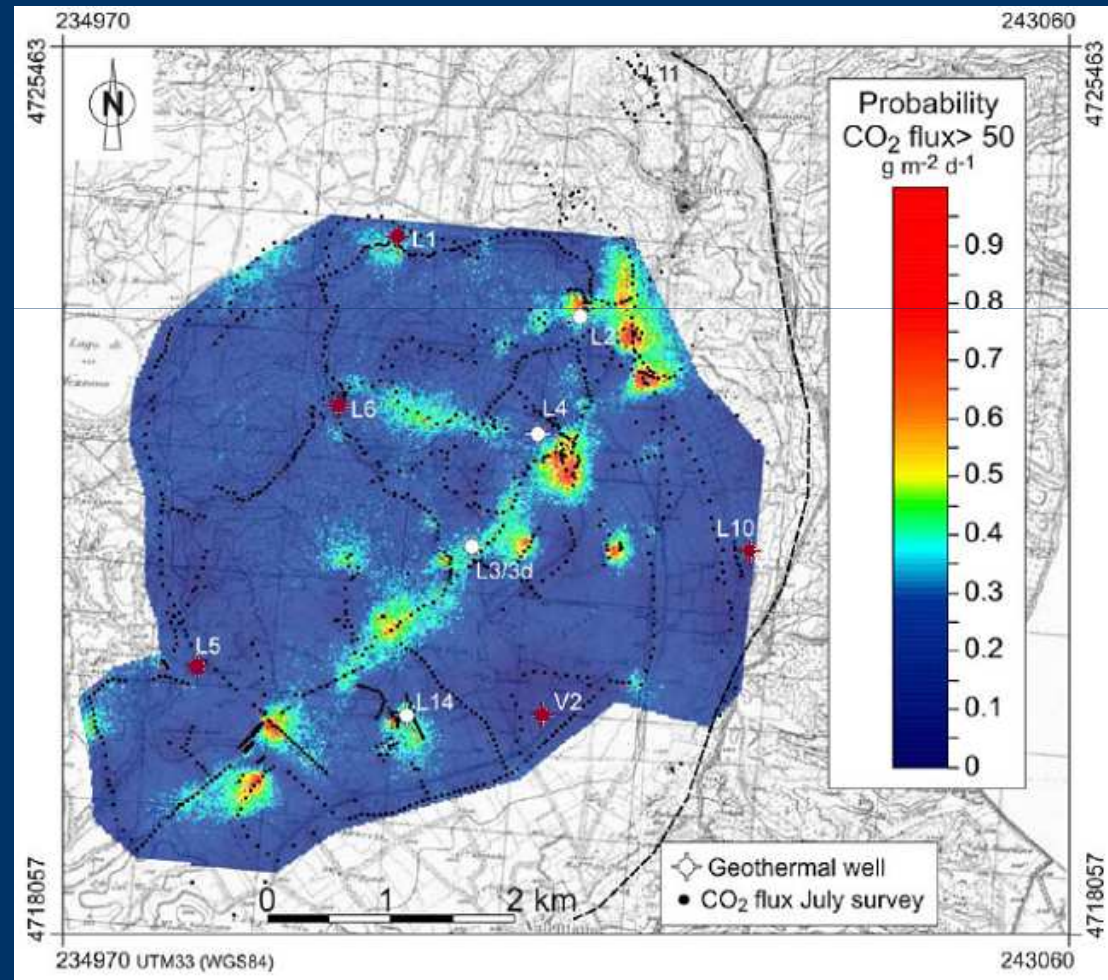
Piccolo impianto elettrico (26 MW) in funzione fino a pochi anni fa

# Mappa del flusso di CO<sub>2</sub> dal suolo della caldera di Latera

2471 misure di flusso con camera di accumulo su 10.8 km<sup>2</sup>

Flusso totale di CO<sub>2</sub> endogena  
= 350 tons/day

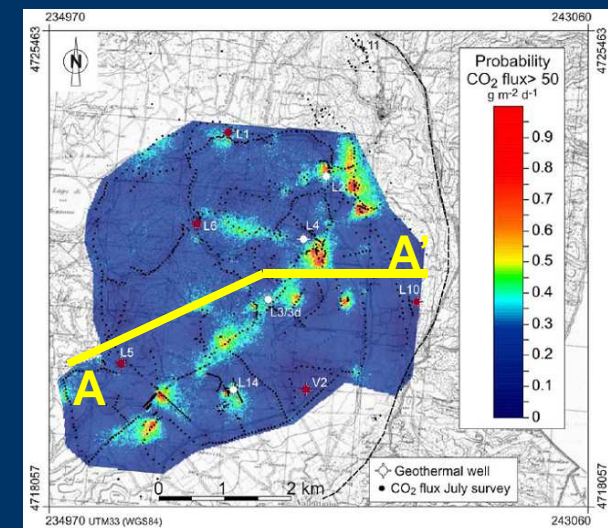
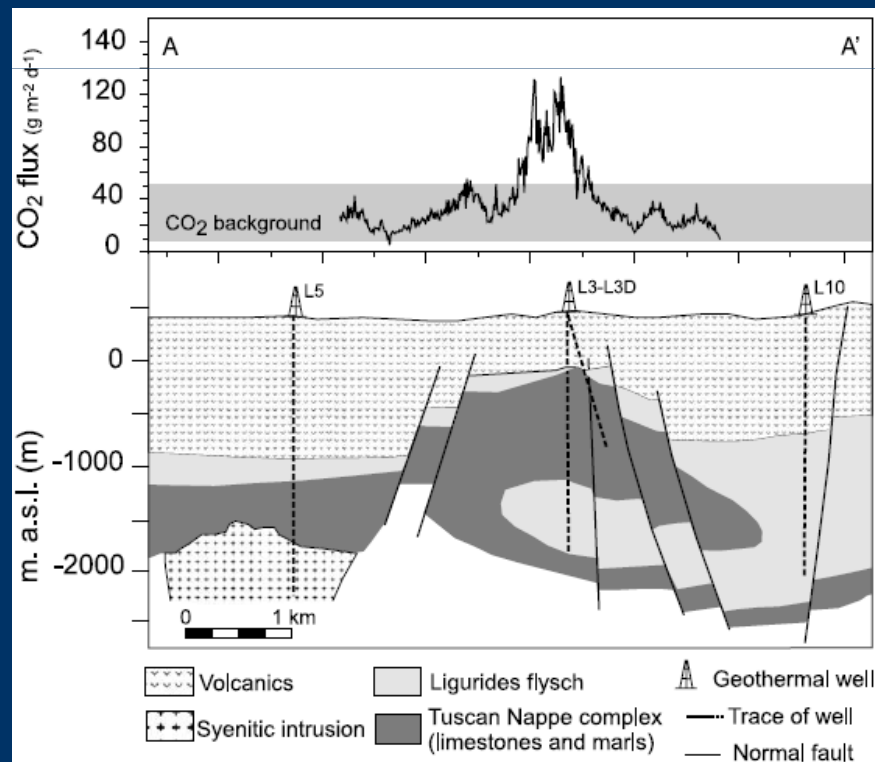
Pozzi non produttivi  
(punti rossi):  
L1, L5, L6, V2, L10  
localizzati tutti in zone  
di basso flusso



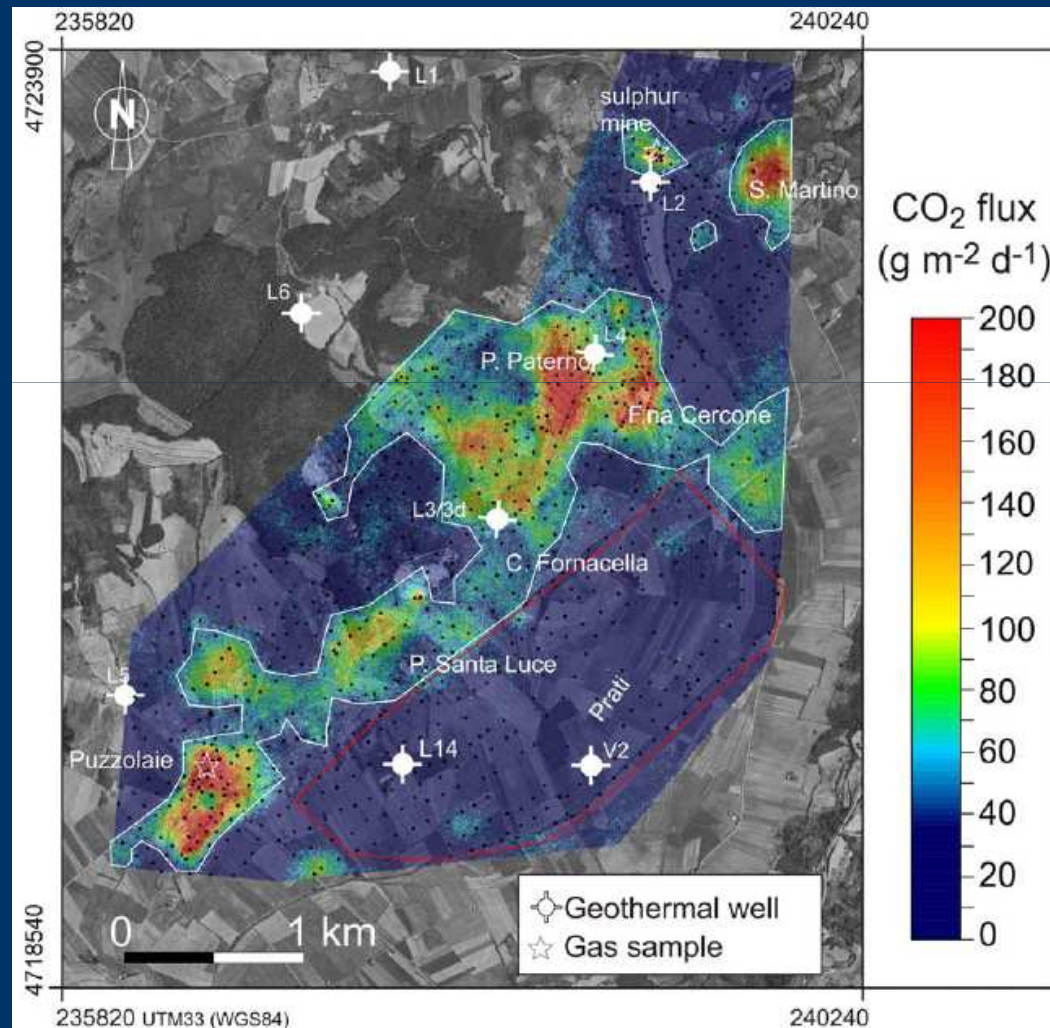
I flussi anomali di CO<sub>2</sub> corrispondono all'alto strutturale del serbatoio geotermico dove tutti i pozzi sono produttivi. Qui la permeabilità è mantenuta dalla sismicità superficiale

Nella parte occidentale, dominano processi di self-sealing per precipitazione di calcite e anidrite e i pozzi risultano sterili.

La zona non permeabile è ideale per progetti EGS (T= 343 °C a 2775 m prof. in rocce intrusive)



Una mappa dettagliata del flusso di CO<sub>2</sub> dal suolo è preziosa per ubicare nuovi pozzi di esplorazione



# Geotermometria geochemica: acque

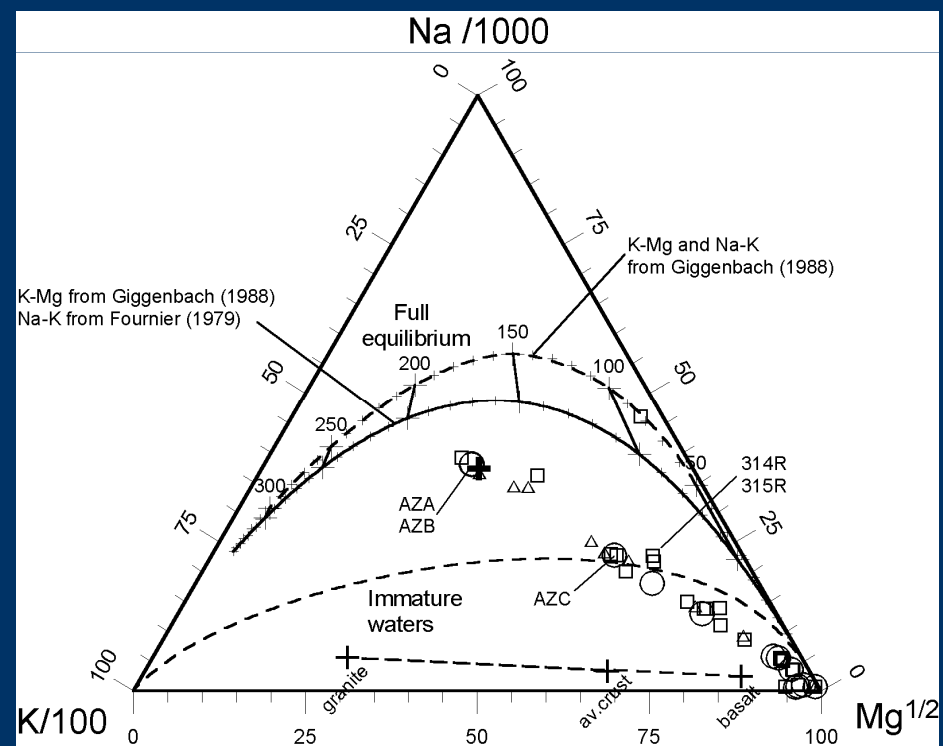
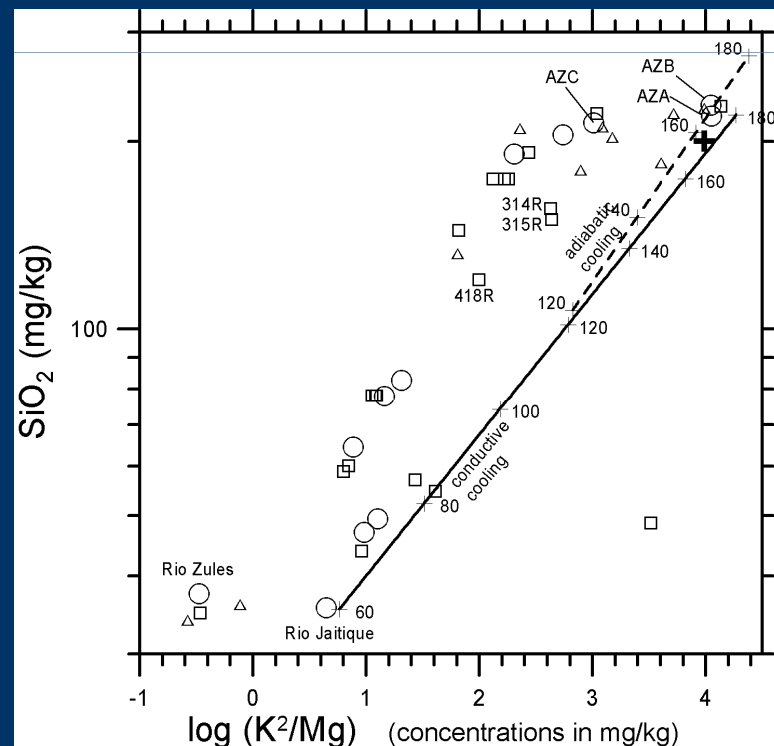
La solubilità in acqua di alcune sostanze dipende dalla T

Se l'equilibrio chimico profondo si è mantenuto nella risalita (rapporti di concentrazione costanti o stimabili) dalla composizione chimica si può stimare la T profonda

Indicatori di T: rapporto Na-K, contenuto in  $\text{SO}_2$ ; si deve considerare il contenuto in Mg che si impoverisce nell'interazione acqua-roccia

Risultato influenzabile da: ebollizione profonda, precipitazione solidi

Risultato accettabile quando tutti i geotermometri indicano la stessa T



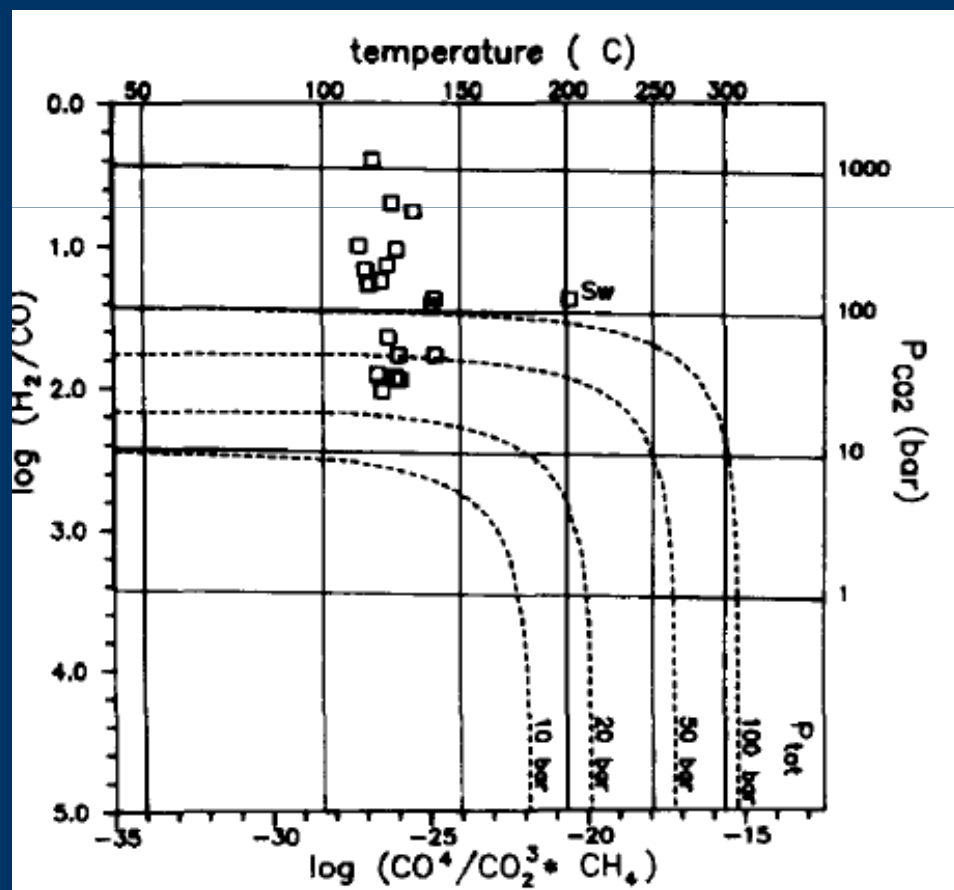
## Geotermometria e geobarometria geochimica: gas

Stima T e  $p\text{CO}_2$  da equilibri nel sistema  $\text{CO}_2\text{-CH}_4\text{-CO-H}_2\text{-H}_2\text{O}$



$$K_{\text{eq.}}(T) = \frac{\text{CH}_4 \cdot \text{H}_2\text{O}^2}{\text{CO}_2 \cdot \text{H}_2^4}$$

Assunzione: le proporzioni dei componenti sono rappresentative delle condizioni di equilibrio profonde



È necessaria una stima precisa del rapporto gas-acqua

Occorre stabilire le condizioni redox

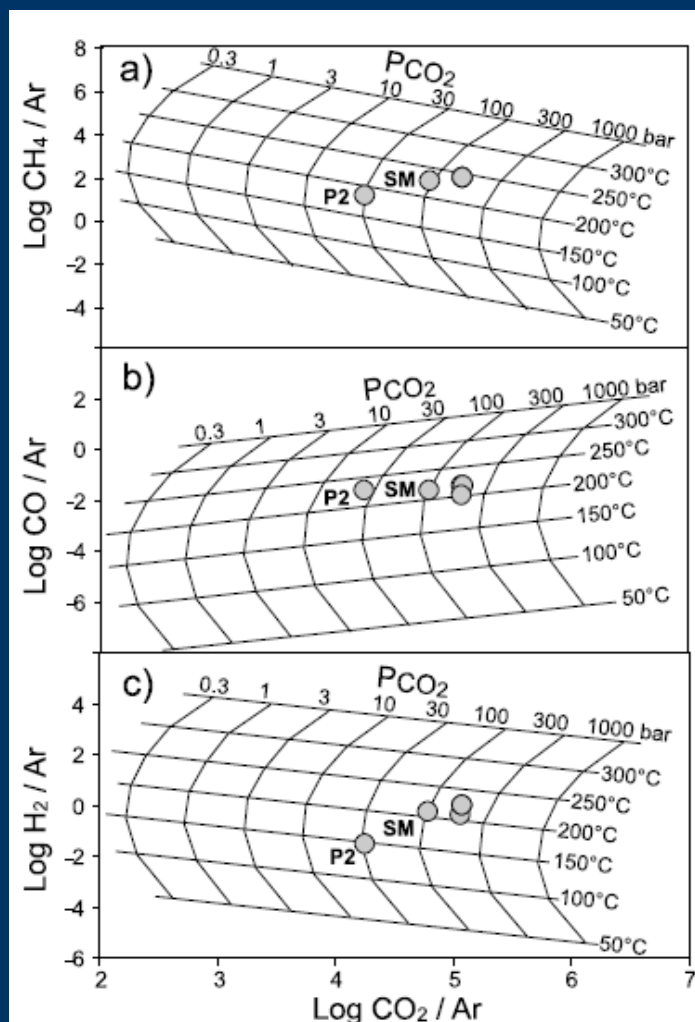
Esempio manifestazioni del Lazio

# Geotermometria e geobarometria geochimica: gas

Sistemi secchi:  $\text{CO}_2\text{-Ar-H}_2\text{-CO-CH}_4$

Esempio: manifestazioni fredde di LATERA

Occorre stabilire le condizioni redox

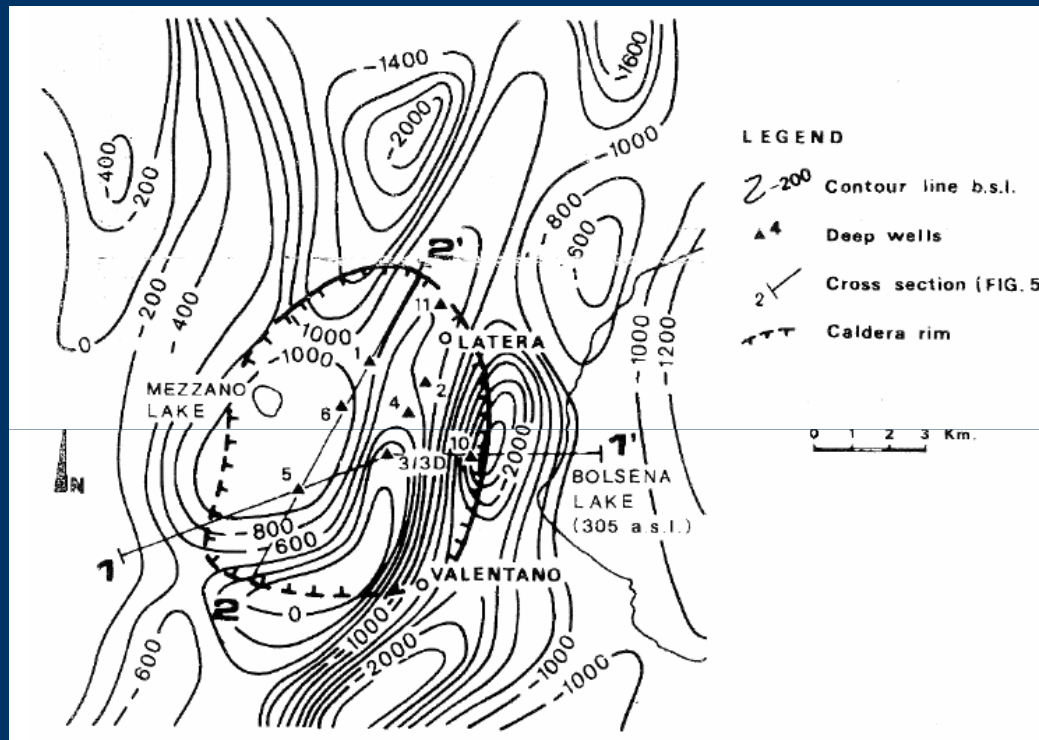


I campioni formano in tutti i diagrammi un cluster a valori di T di 200-230° C e di  $p\text{CO}_2$  di 100-200 bar.

Le stime sono in accordo con le condizioni reali del serbatoio geotermico, dove è stata misurata una T di 200-230° C ed è stata stimata una  $p\text{CO}_2$  di circa 100 bar

# Prospezioni geofisiche nell'esplorazione geotermica

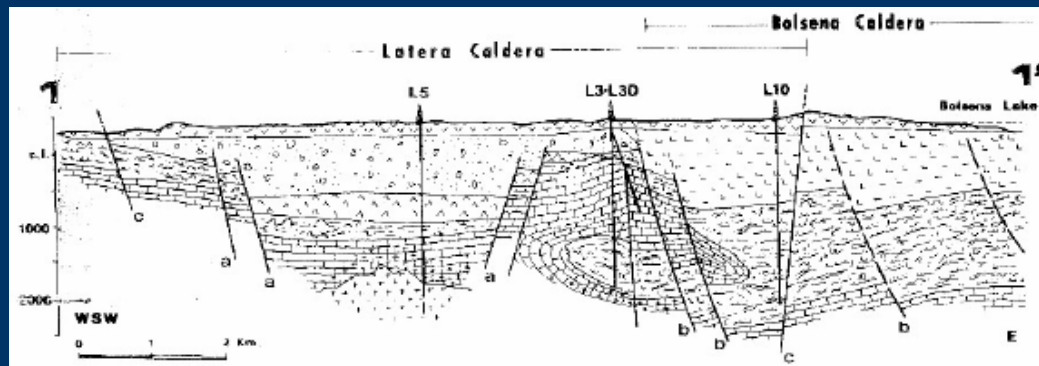
- Gravimetria: utile se c'è contrasto di densità fra le rocce del serbatoio e quelle della copertura



Esempio: caldera di Latera

Ricostruzione da dati gravimetrici della profondità del tetto del serbatoio geotermico carbonatico.

L'alto strutturale corrisponde ad anomalia gravimetrica positiva



# Prospezioni geofisiche nell'esplorazione geotermica

- Geomagnetismo: anomalie prodotte da corpi magnetici

Lunghezza d'onda dell'anomalia dipende da dimensioni e profondità della sorgente magnetica

- Magnetismo di rocce e minerali si annulla per  $T > T_{Curie}$ , alterazione idrotermale dei minerali ferromagnetici riduce intensità c.m.t.

- Prospezione magnetica utile per interpretare anomalie gravimetriche

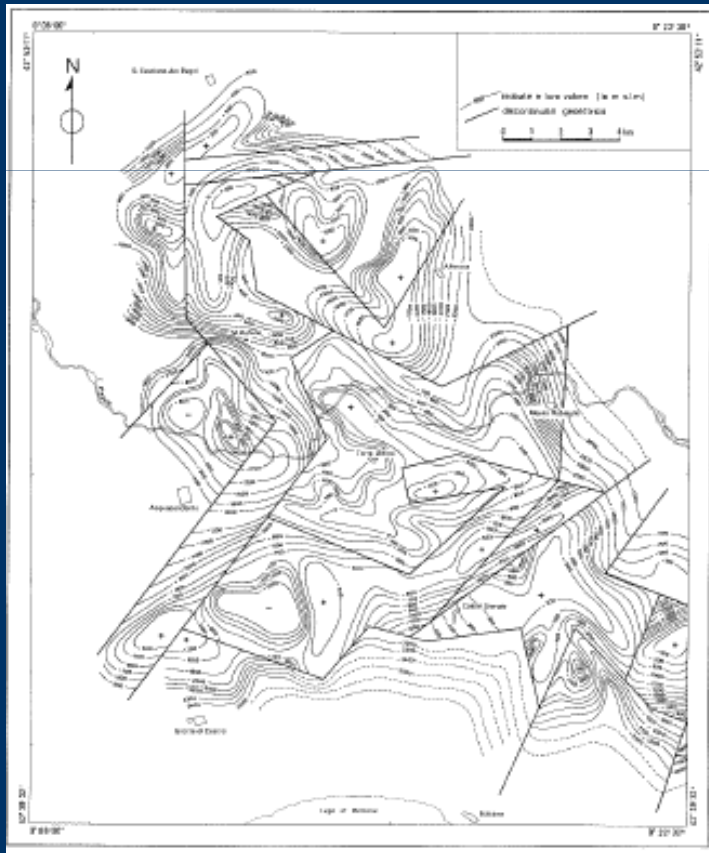
Esempio:

alto strutturale in calcari: an. gravim. positiva senza an. magnetica

alto strutturale in lave: an. gravim. positiva con an. magnetica

# Prospezioni geofisiche nell'esplorazione geotermica

- **Geoelettrica:** misure di resistività elettrica (r.e.)  
r.e. diminuisce all'aumentare di permeabilità, temperatura, salinità  
**Problema:** r.e. diminuisce anche in presenza di minerali argillosi  
quindi terreni argillosi di copertura possono essere confusi con serbatoi geotermici di alta T e convezione, entrambi con bassa resist.



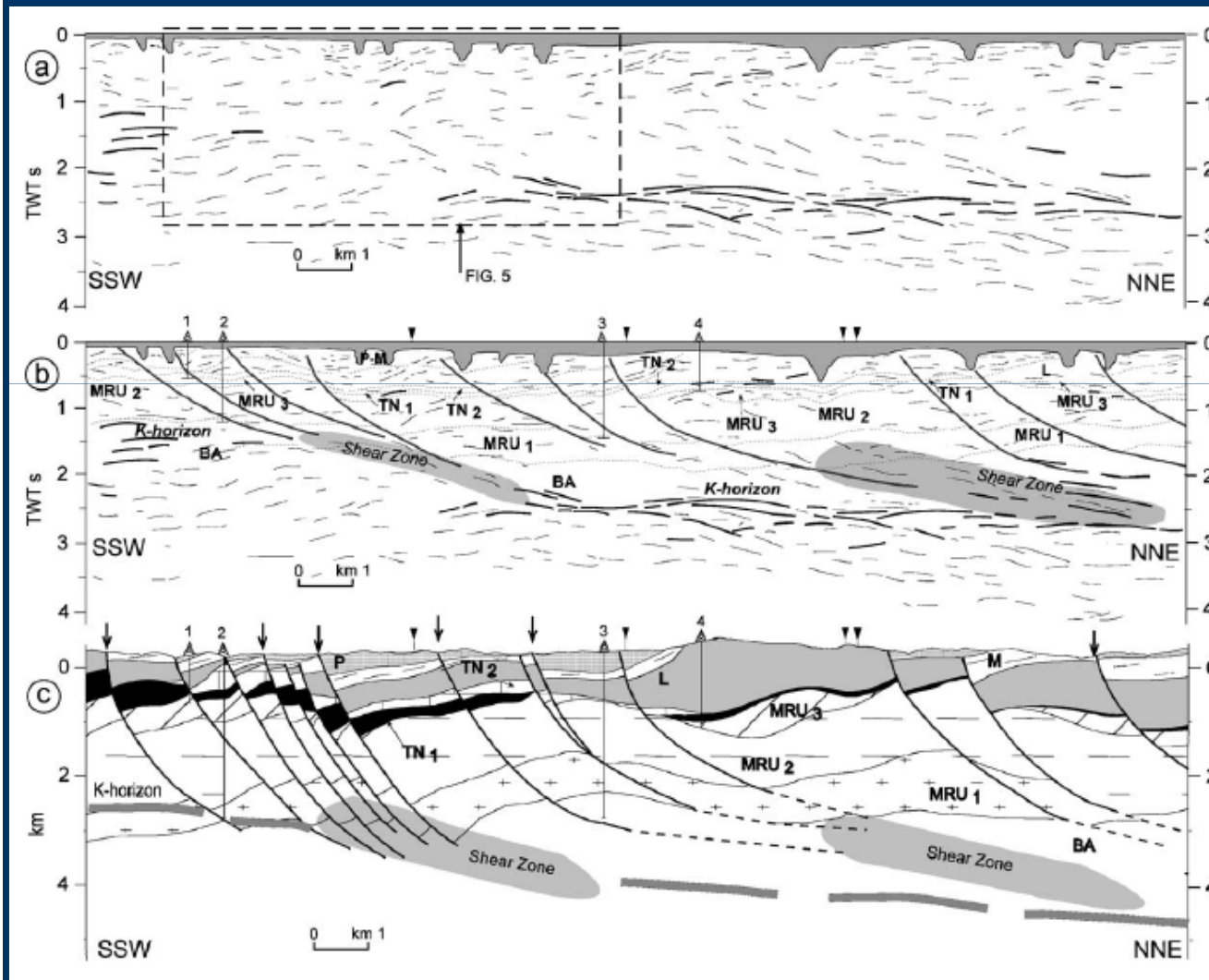
**Esempio:**

carta del tetto del substrato resistivo di Torre Alfina ottenuta con profili Schlumberger di 6 km di lunghezza

Magnetotellurica tecnica sostitutiva dei profili geoelettrici quando non sono possibili lunghi estendimenti

# Prospezioni sismiche nell'esplorazione geotermica

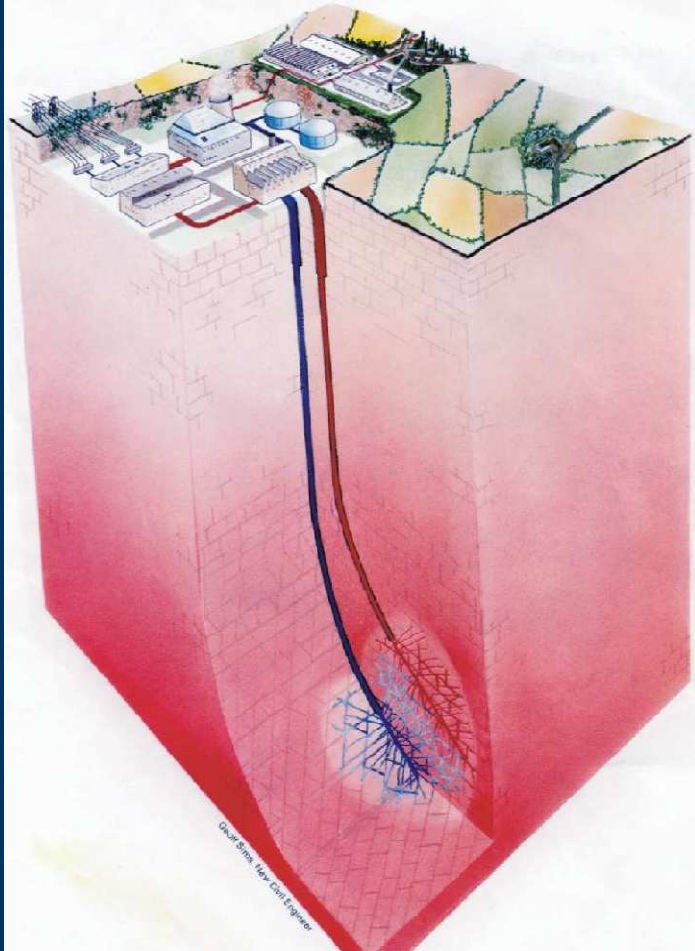
Utili nell'esplorazione profonda, ma molto costose



Esempio:  
Prospezione  
sismica del  
serbatoio profondo  
di Larderello

# Enhanced Geothermal Systems (EGS)

Sistemi tradizionali utilizzano rocce calde contenenti acqua e/o vapore



Come utilizzare il calore delle rocce calde ma secche, che si incontrano frequentemente in profondità?

Fratturazione artificiale delle rocce calde

Iniezione di acqua fredda dalla superficie

Estrazione di un fluido ad alta T riscaldato da circolazione nelle rocce calde fratturate

**Questo è il concetto da cui nascono i progetti “EGS”**

**Nuova idea importante: utilizzare CO<sub>2</sub> invece che acqua come fluido di servizio**

# Il progetto EGS di Soultz-sous Forêts

In Europa il progetto EGS più avanzato è quello di Soultz-sous Forêts in Francia (impianto di 1,5 MWe). Limite principale è la bassa anomalia geotermica del sito, tanto che occorre scendere a profondità di 5000m per trovare una T di soli 200°C. Ne consegue un rendimento entalpico modesto del fluido estratto e costi elevatissimi delle perforazioni.



Impianto di Soultz-sous Forêts Francia

**In Italia vi sono zone molto più interessanti, come:**

- **Isola di Vulcano (Sicilia)**

Temperatura di 200°C a 1360 m e di 400°C a 2000 m di profondità.

- **Caldera di Latera (Lazio)**

Temperatura di 200°C a 2000 m e di 300°C a 2500 m di profondità.

- **Molte zone del Lazio settentrionale e della Toscana.**

# Conclusioni

La direttiva 2009/28/CE, cosiddetta 20-20-20 stabilisce che ogni Paese membro deve, entro il 2020:

1. Ridurre le emissioni di gas serra di almeno il 20% rispetto al livello del 1990;
2. Innalzare l'uso delle energie rinnovabili al 20% del consumo totale di energia (per l'Italia questo obiettivo è già stato ridotto al 17%);
3. Ridurre del 20% i consumi energetici migliorando l'efficienza energetica.

**Il 2020 è molto vicino e senza un immediato e forte impulso alla utilizzazione delle risorse geotermiche (una delle poche risorse naturali di cui l'Italia è ricca) appare molto difficile che il nostro Paese possa centrare questi obiettivi.**