

# Exploración geotérmica mediante métodos geofísicos



**Presentador**

Diego Badilla Elizondo

# Resumen

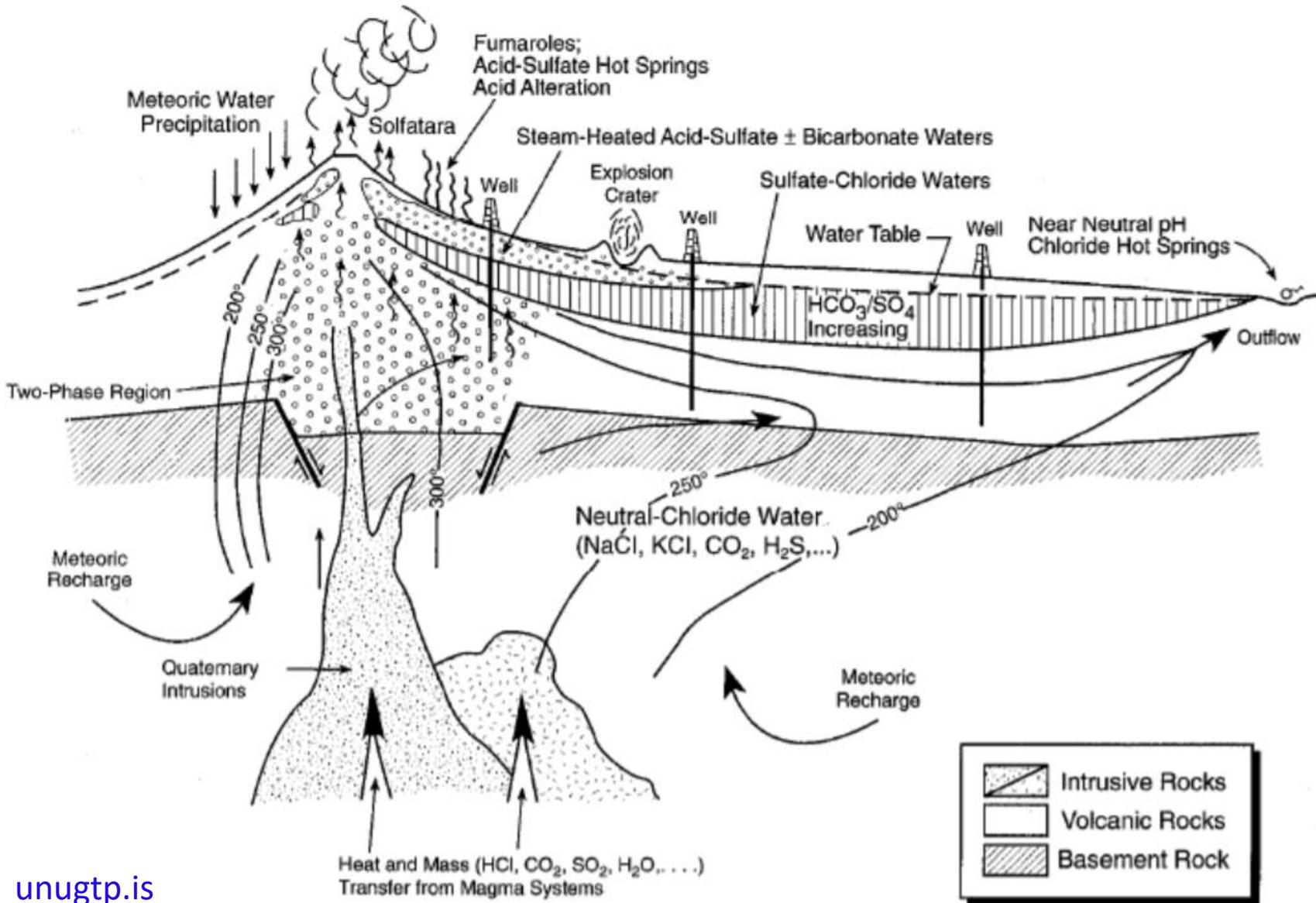
- Exploración geotérmica y sistemas geotérmicos
- Resistividad eléctrica
- Métodos geofísicos aplicados en geotermia
- Electromagnética (TDEM, AMT/MT, CSAMT)
- IP y tomografía eléctrica
- Gravimetría y magnetometría
- Monitoreo remoto.

# Exploración geotérmica

- ¿Qué es lo que estamos buscando?
- ¿Cuáles variables geocientíficas nos interesan?
- Temperatura, presión, permeabilidad.
- Composición química de los fluidos.
- Estratigrafía, tectónica.
- Delimitación del recurso
- Identificación de la fuente de calor.



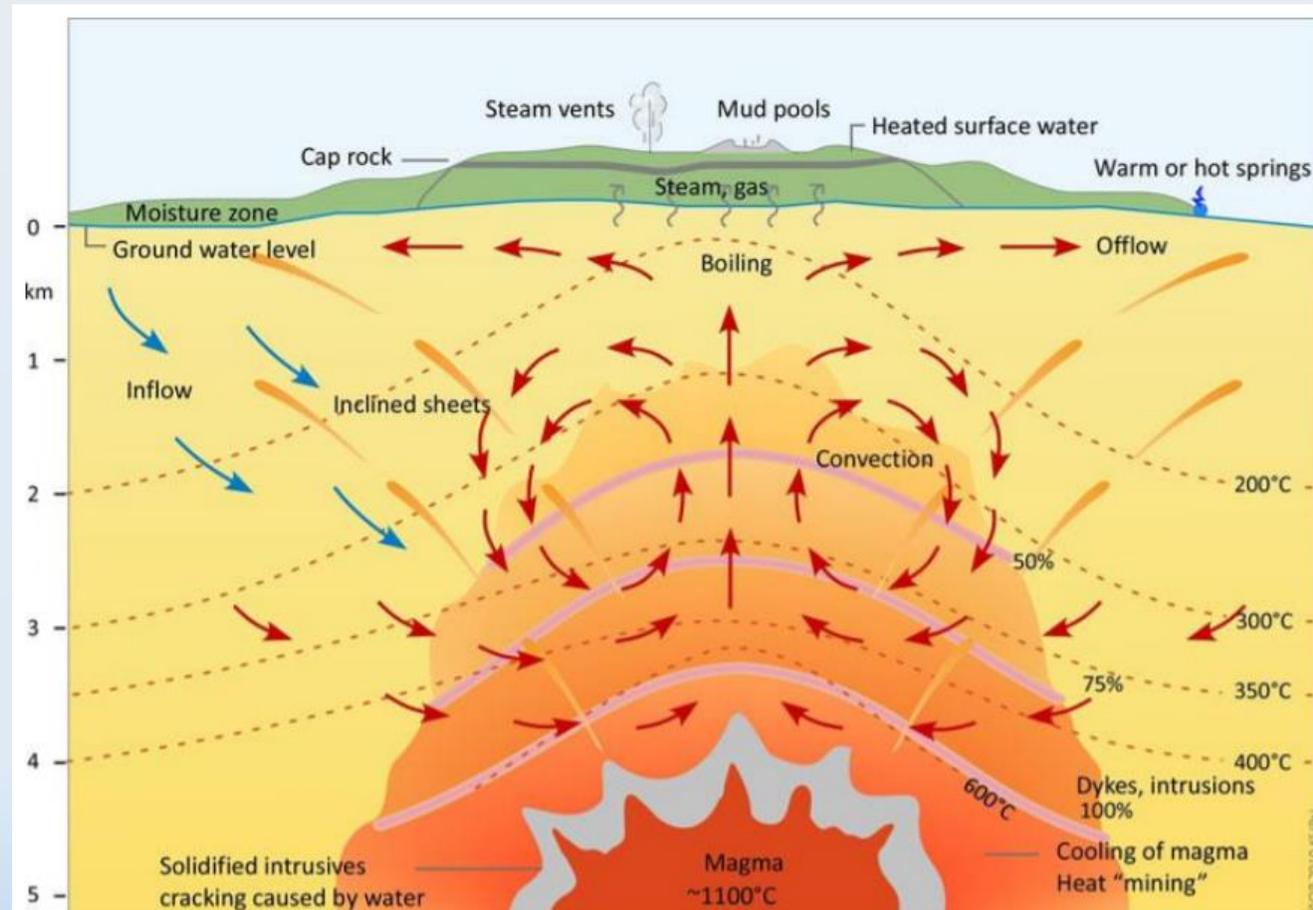
# Modelo conceptual



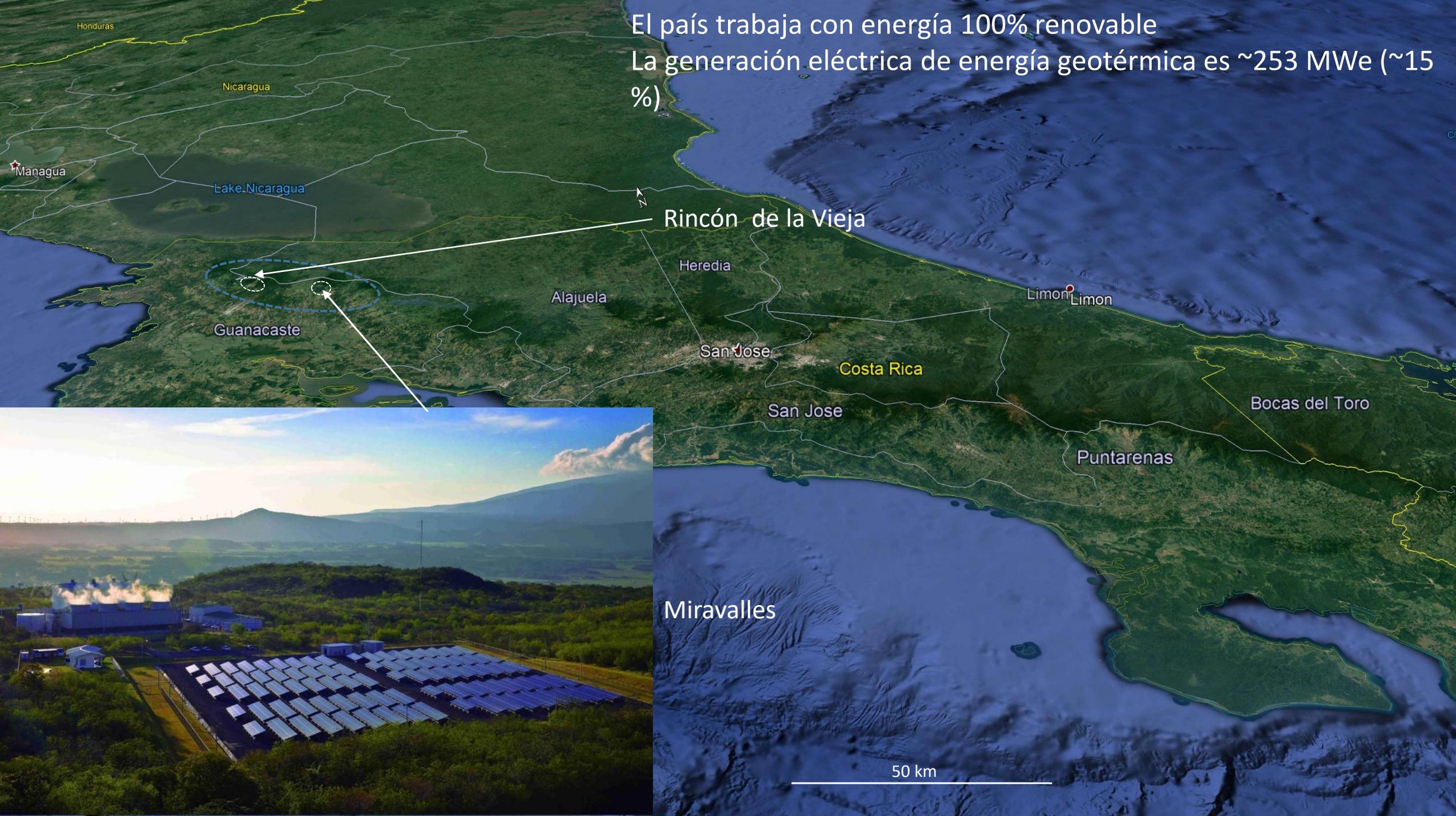
- Combinación de diferentes ciencias:
  - ✓ Geología
  - ✓ Geoquímica
  - ✓ Geofísica

# Clasificación de los sistemas geotérmicos

Sistemas ígneos recientes asociados a redes fracturadas formadas sobre magma intruido en la corteza superficial.



El país trabaja con energía 100% renovable  
La generación eléctrica de energía geotérmica es ~253 MWe (~15 %)



Lake Nicaragua

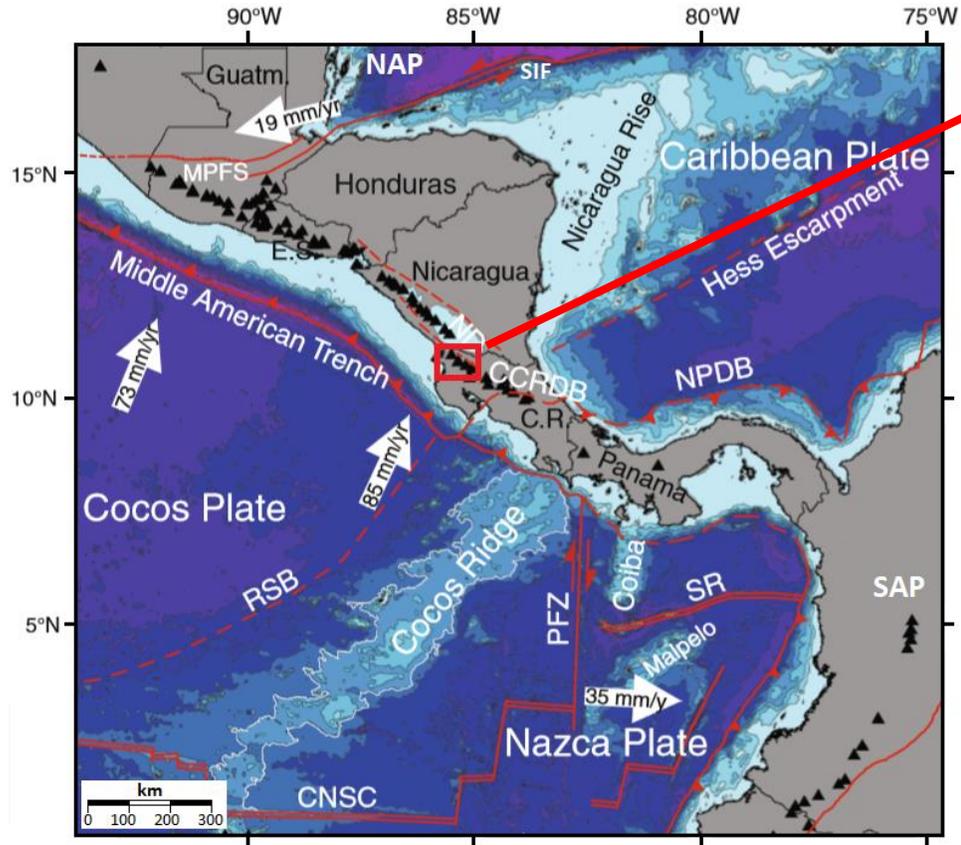
Rincón de la Vieja

Costa Rica

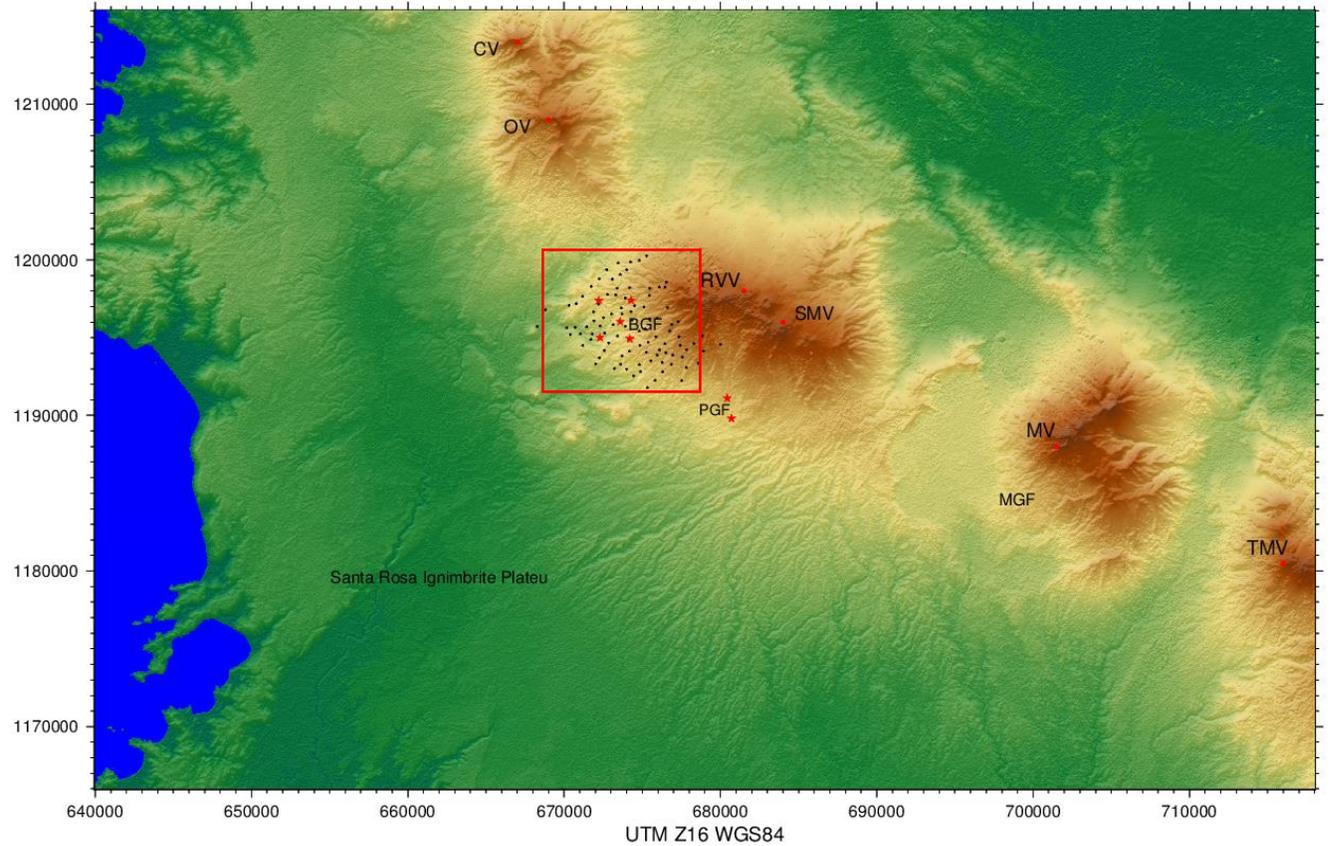
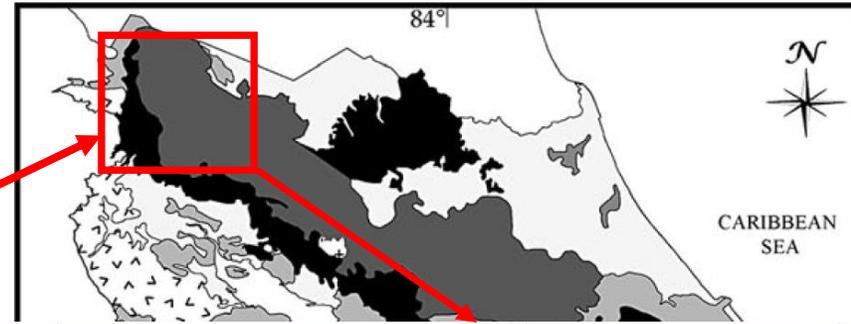
Miravalles

50 km

# Tectónica CR

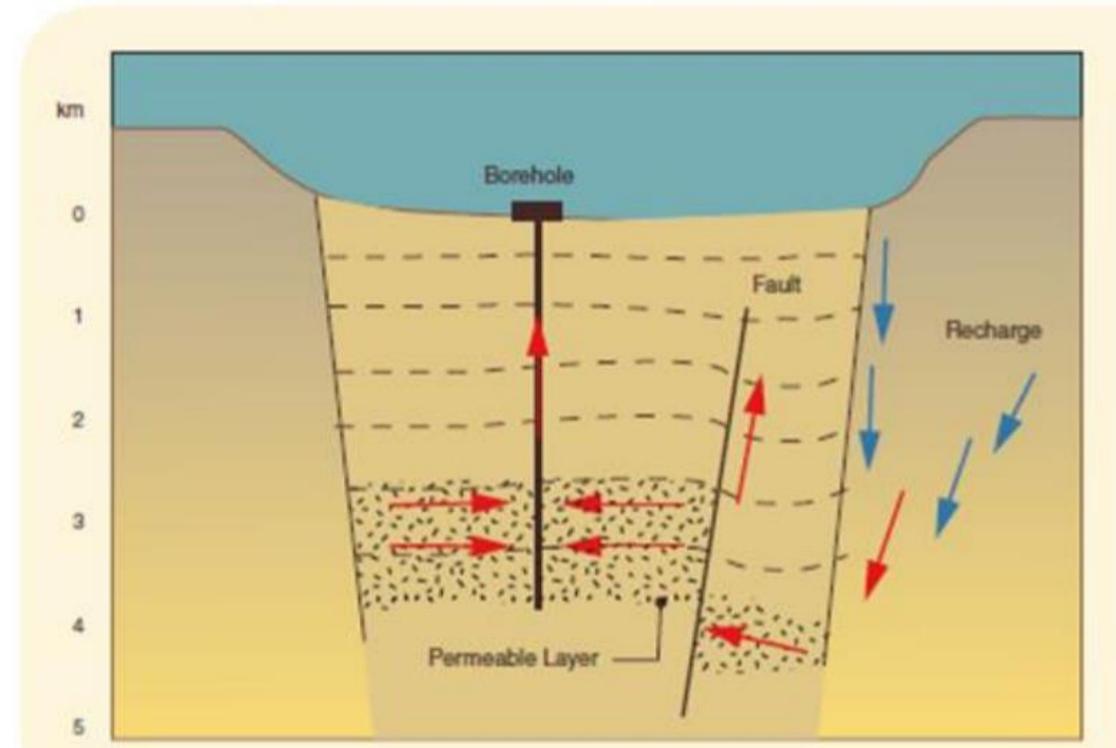


Modified from Lücke (2012)



# Clasificación de los sistemas geotérmicos

- Sistemas tectónicos asociados a circulación de fluido a lo largo de los Sistemas de falla y fractura.
- Sistemas de acuíferos sedimentarios profundos y geo-presurizados

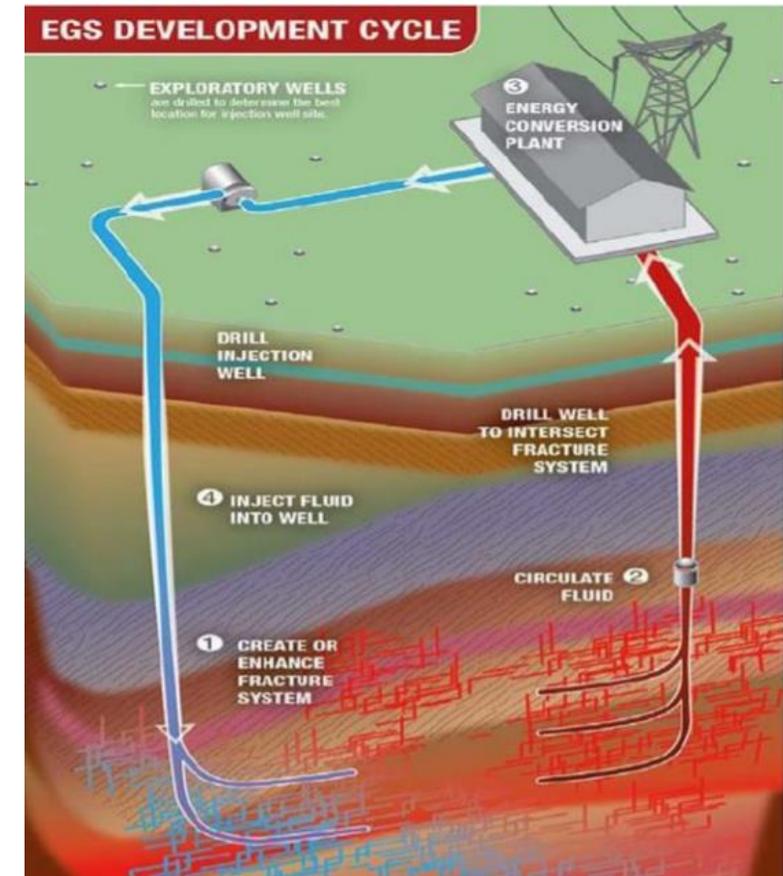


# Clasificación de los sistemas geotérmicos

- Sistemas de roca caliente o EGS (Enhanced geothermal systems)
- Sistemas súper críticos

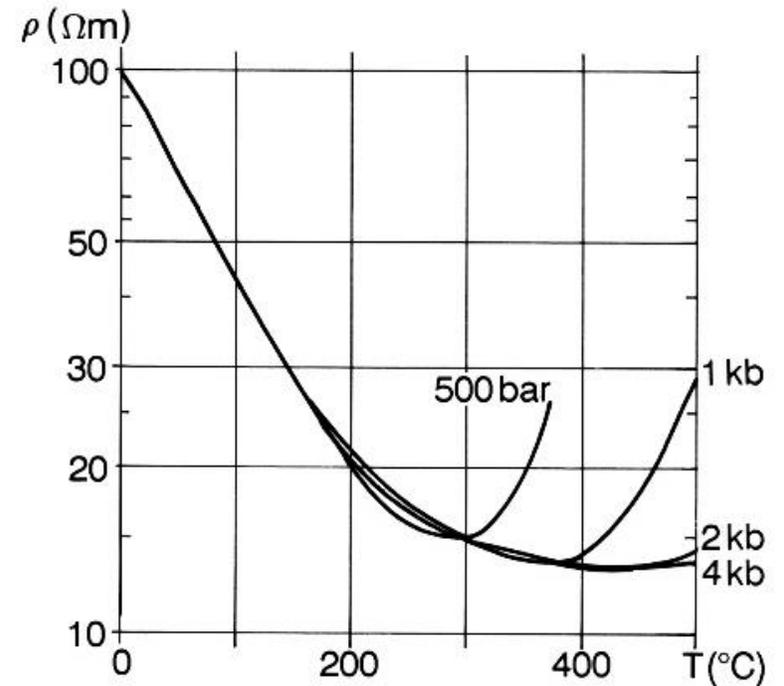
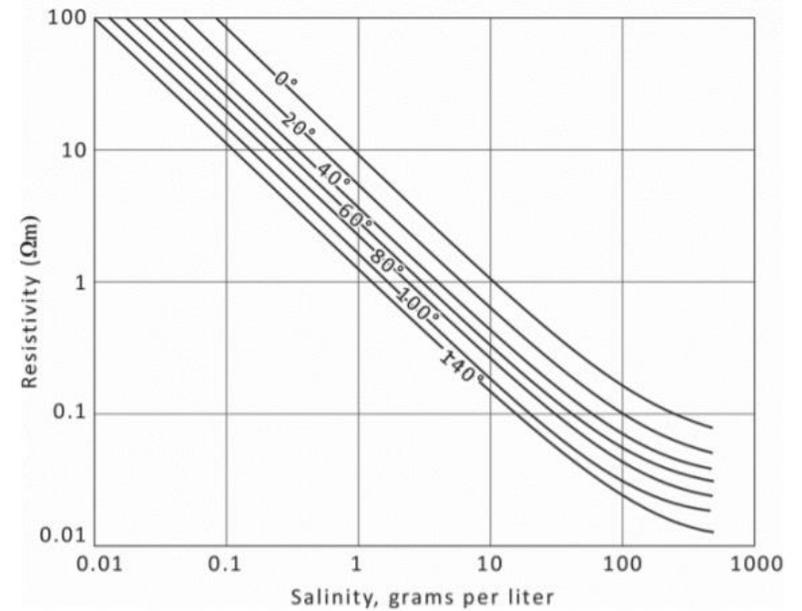


Iceland, IDDP2



# Resistividad eléctrica

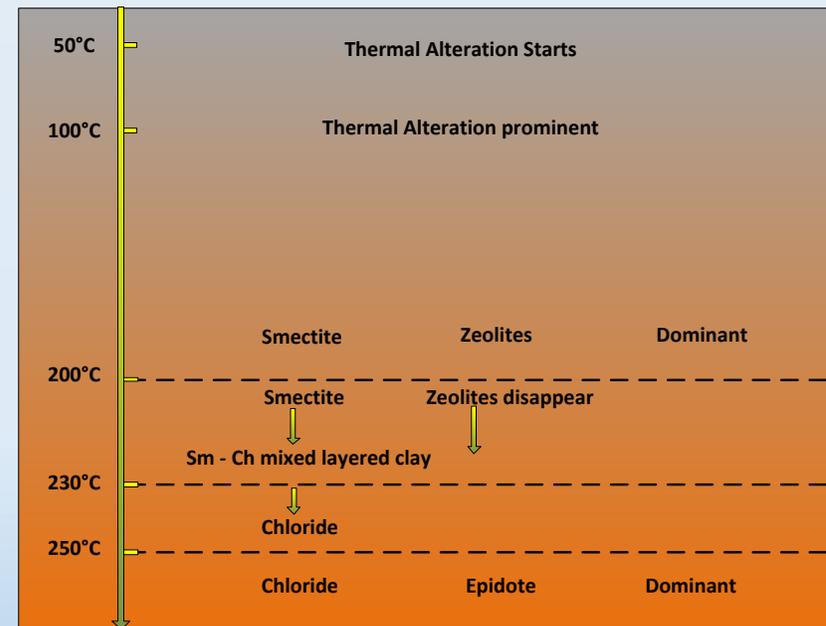
- Principalmente afectada por:
  - Salinidad
  - Grado de saturación
  - Porosidad / permeabilidad
  - Temperatura
  - Grado de alteración de la roca.



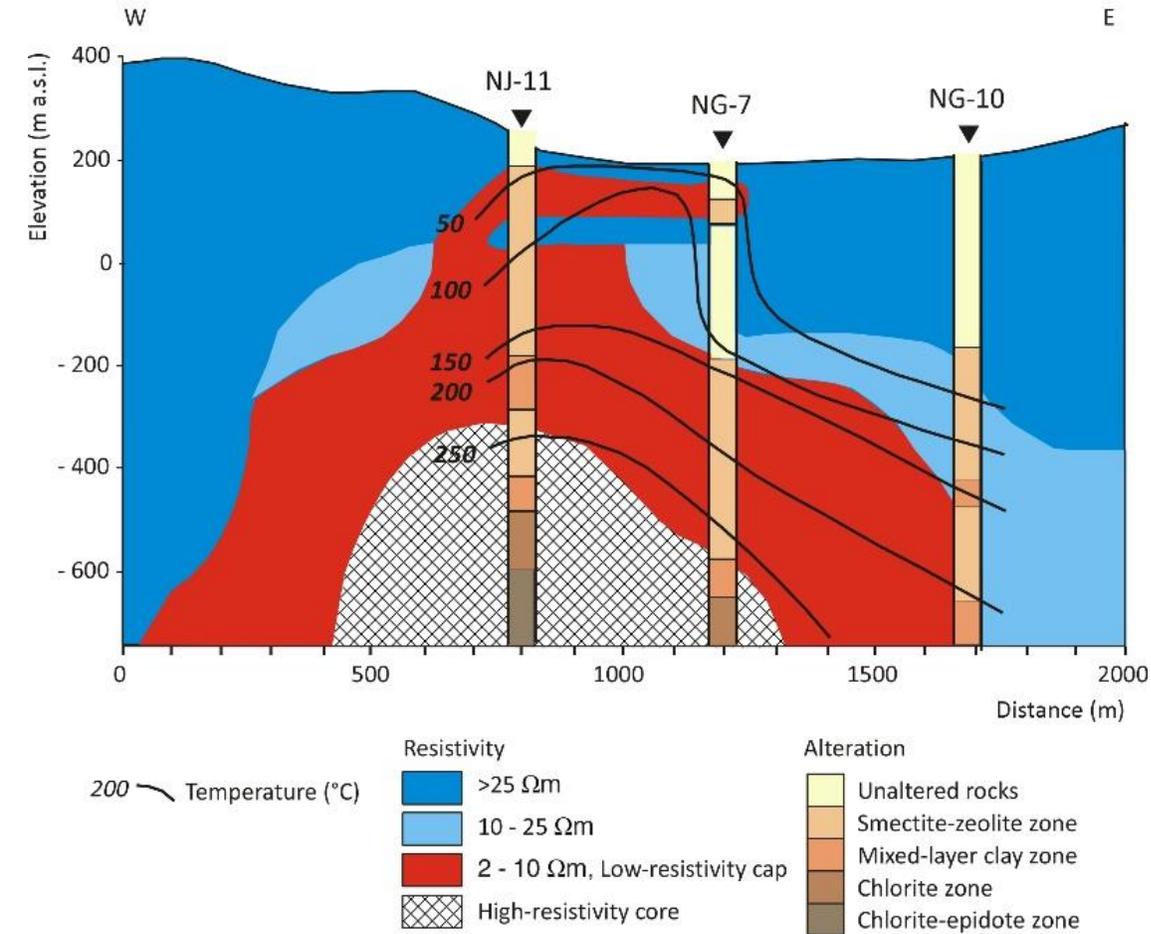
(Hersir & Árnason, 2009)

# Resistividad eléctrica

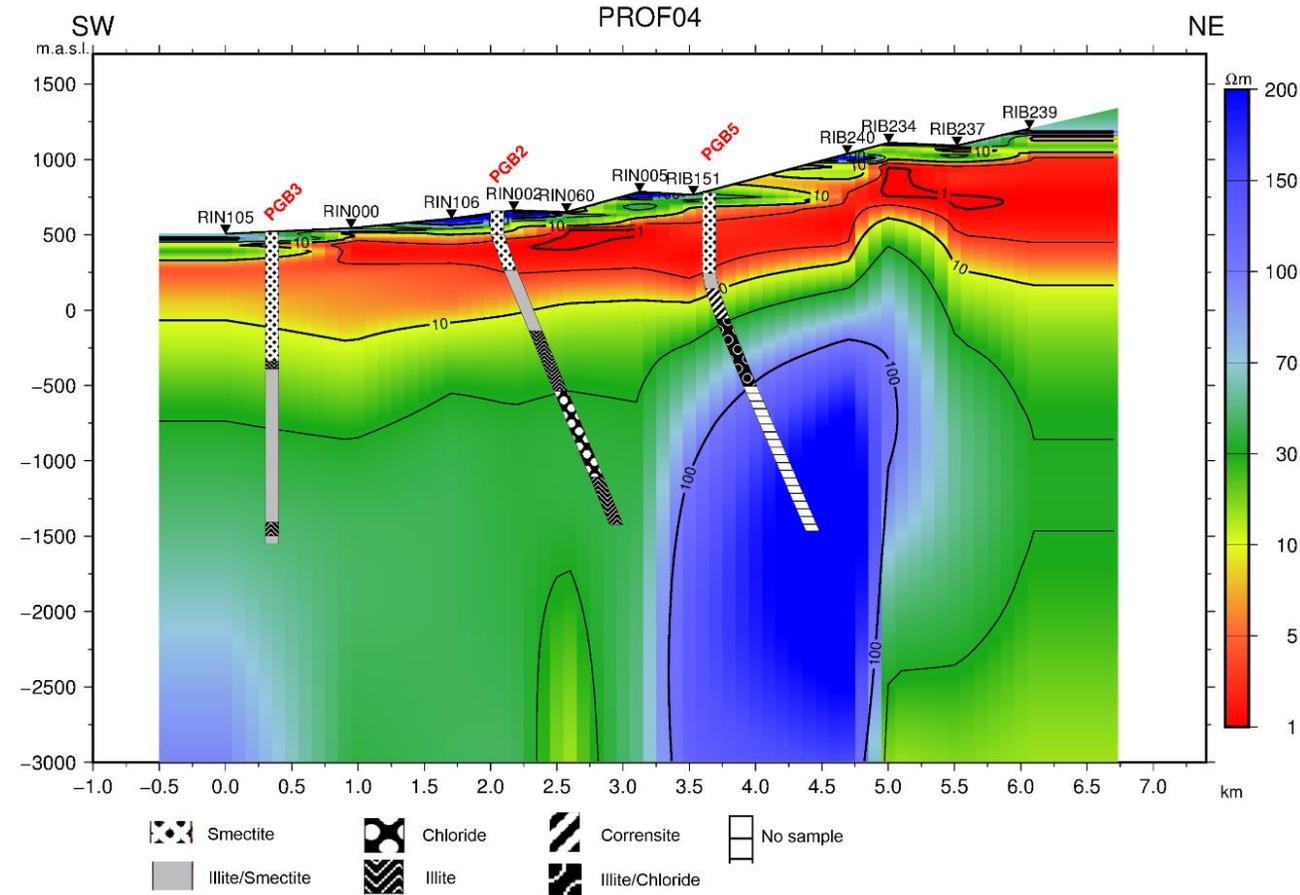
- En campos geotérmicos de alta temperatura, la modelación de la resistividad eléctrica es clave. Se expresa en  $\Omega\text{m}$ .
- Es controlada por la mineralogía de alteración.
- Si el sistema está en equilibrio, la resistividad está directamente asociada con la temperatura.



# Correlación resistividad vrs mineralogía

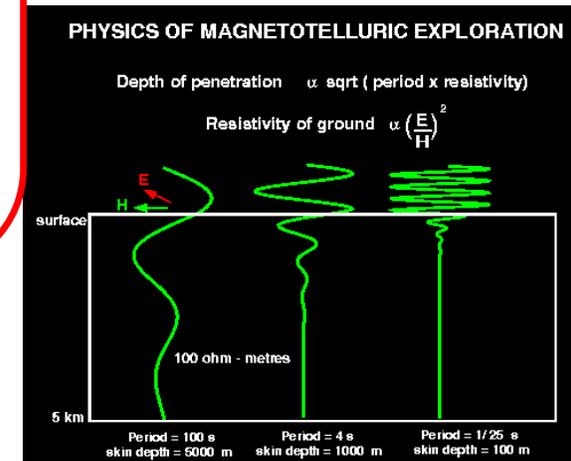
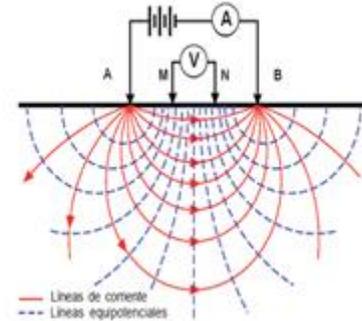
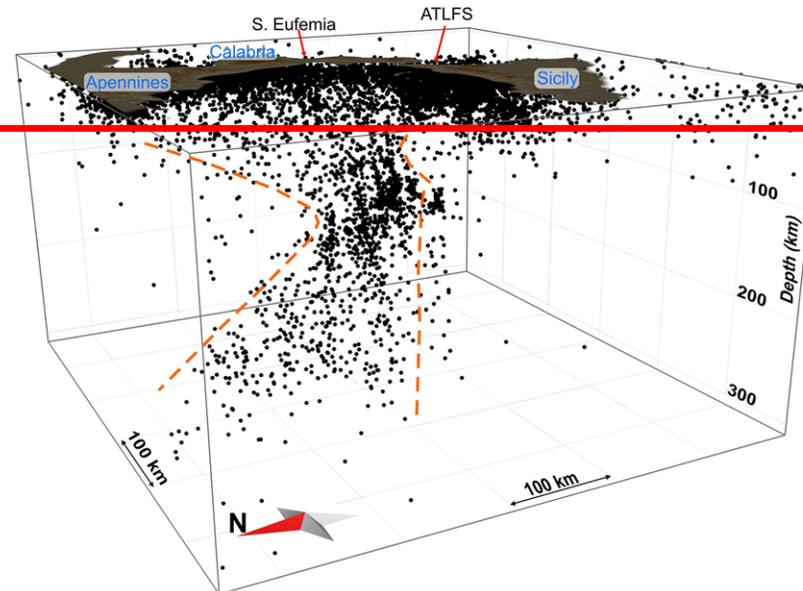


Typical resistivity structure of a high-temperature geothermal reservoir  
(from Árnason et al., 1986)



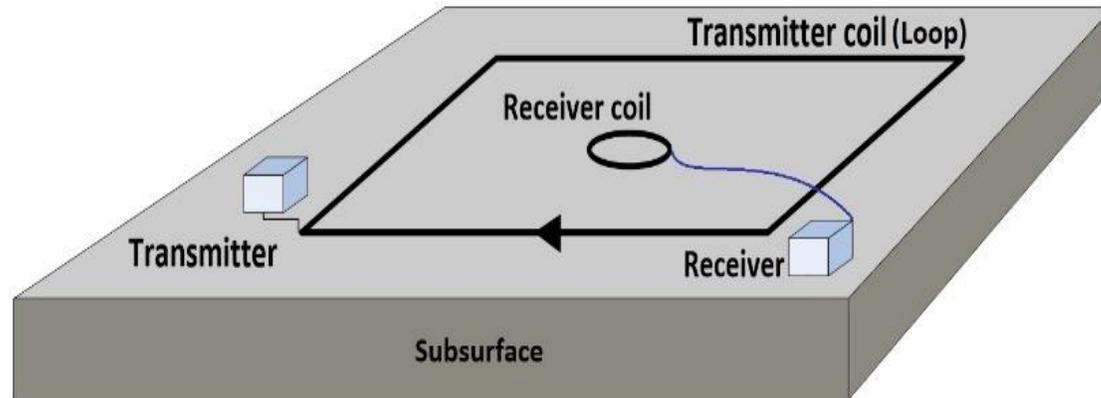
# Métodos geofísicos aplicados en geotermia

- Métodos eléctricos: DC (Schlumberger) y tomografía eléctrica
- Métodos electromagnéticos
  - Pasivos (fuente natural): AMT, MT -> BMT
  - Activos (fuente controlada): TDEM, CSAMT, IP (SIP, TDIP)
- Métodos potenciales
  - Gravimetría
  - Magnetometría
- Sismicidad
- Monitoreo remoto:
  - Drones
  - Imágenes satelitales.
- Temperatura del suelo



# Sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo (TDEM)

- Es un método de fuente artificial.
- Se genera un campo electromagnético.

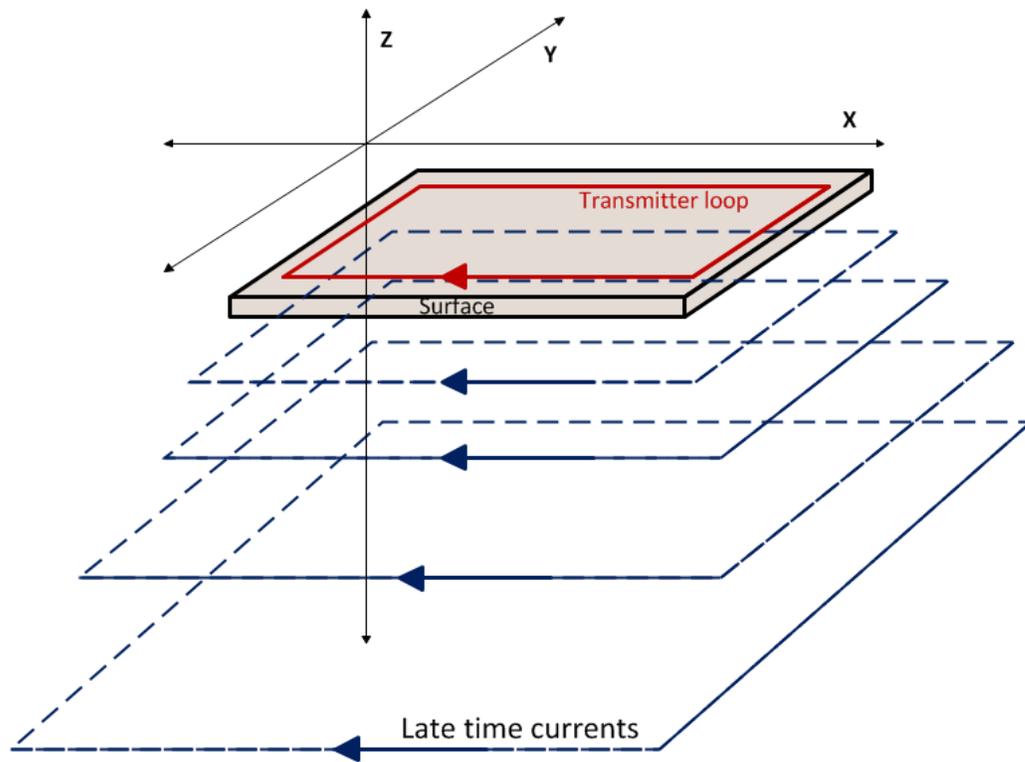


Configuración típica de TDEM (Phoenix Geophysics, 2015). Lazo del transmisor de 100 m x 100 m.



# Time Domain Electromagnetics (TDEM)

- Se miden señales inducidas.

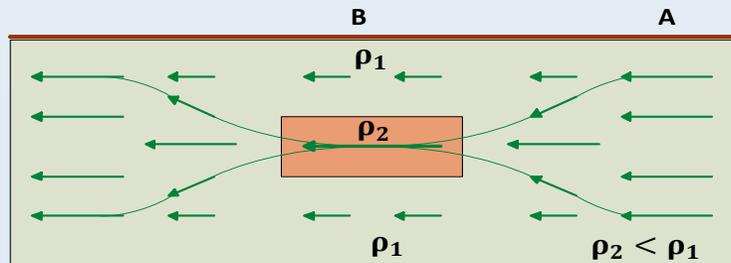


Propagación de la corriente en el subsuelo  
(Rowland, 2002)

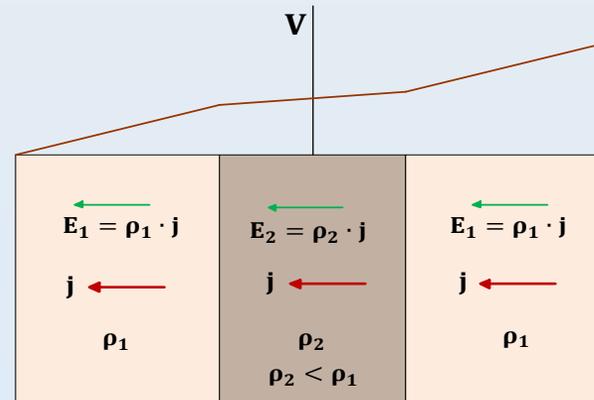


# Desplazamiento estático

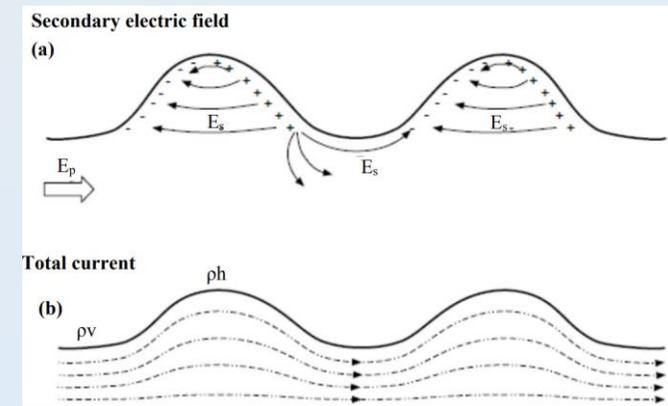
- In-homogeneidades en la resistividad eléctrica muy superficial.
- Topografía.



Current channelling caused by localised conductive anomaly

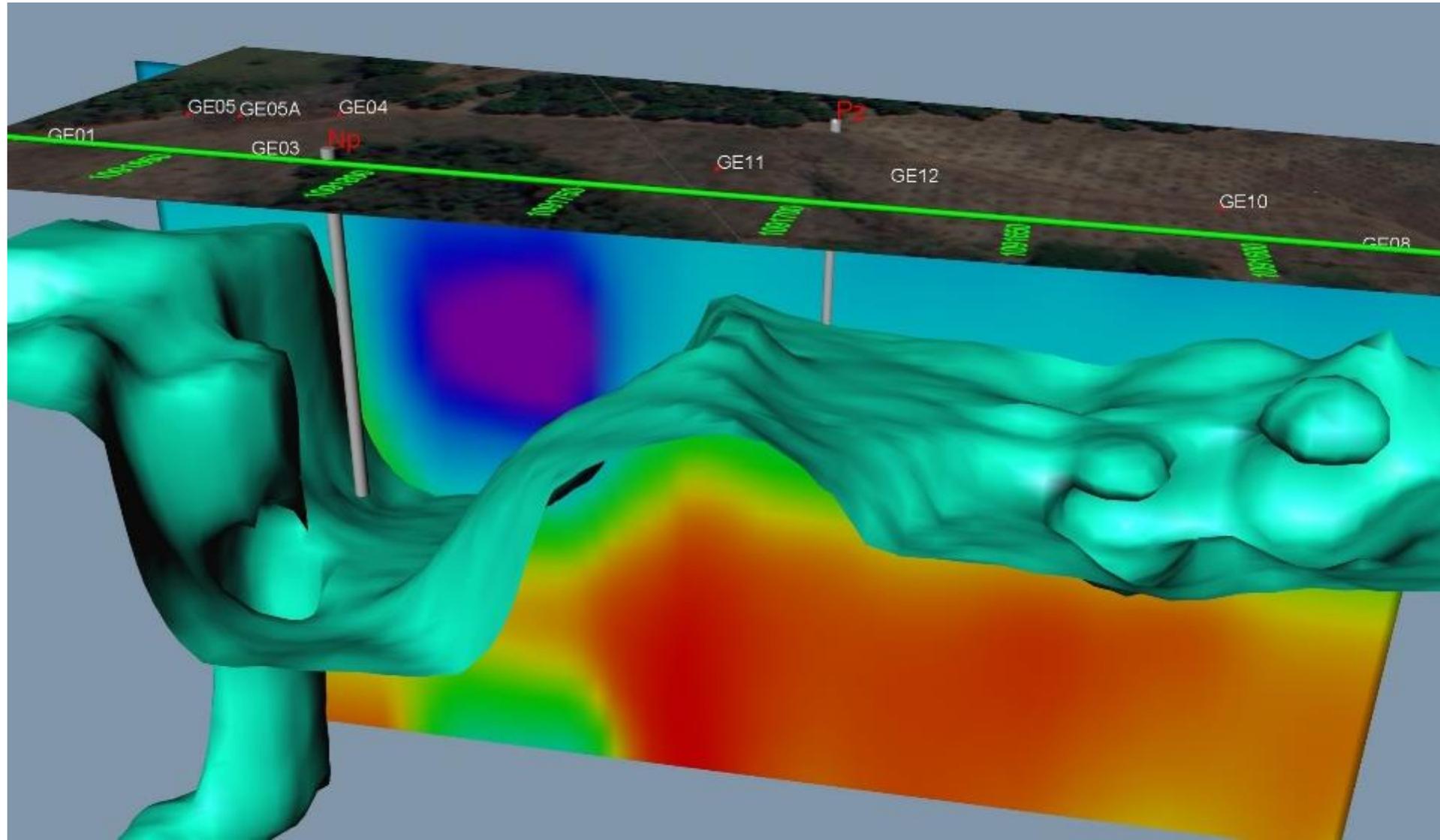


Electric field distortion  
(Árnason, 2015)



Topographic distortion

# Resultados TDEM



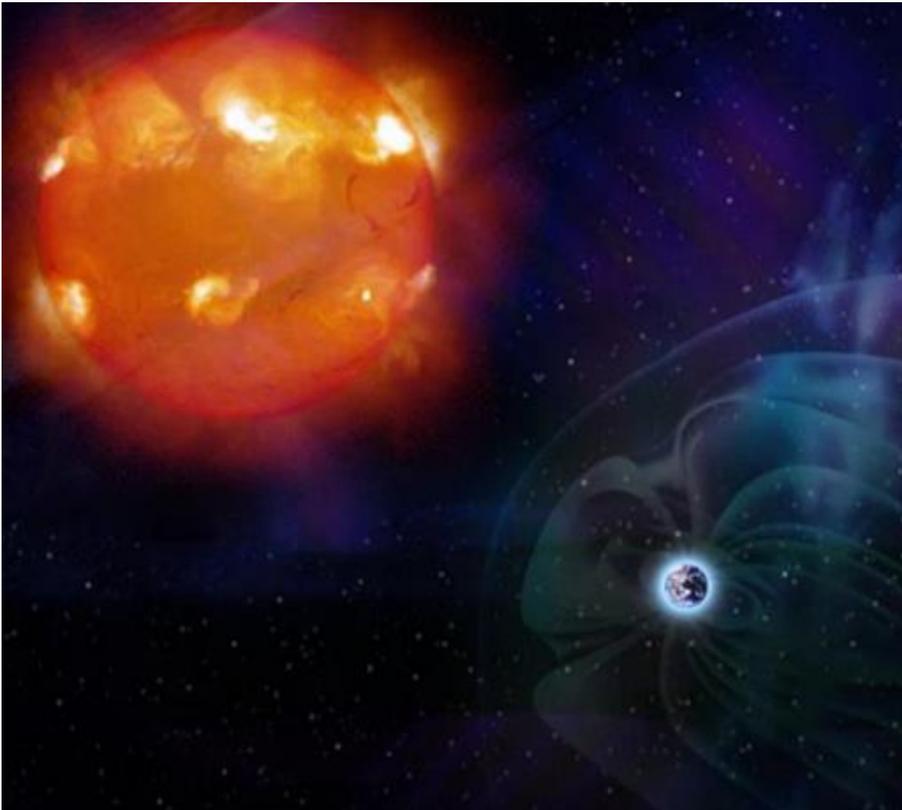
# El método audio-magnetotelúrico (AMT) / magnetotelúrico (MT)

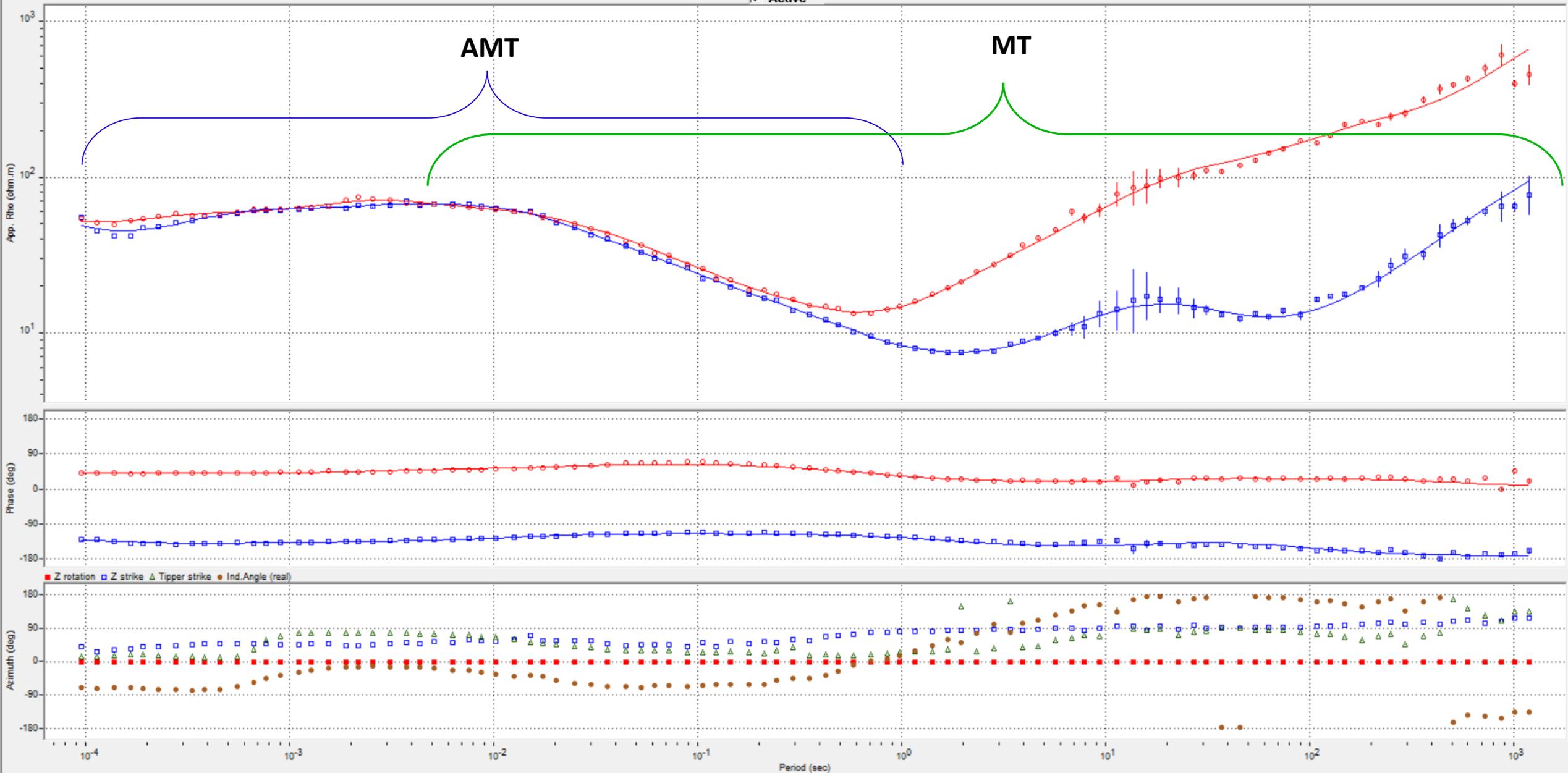
- Basados en Fuente natural. Dos rangos de frecuencias.
- Para altas frecuencias ( $>1$  Hz): la fuente son tormentas eléctricas



# El método audio-magnetotelúrico (AMT) / magnetotelúrico (MT)

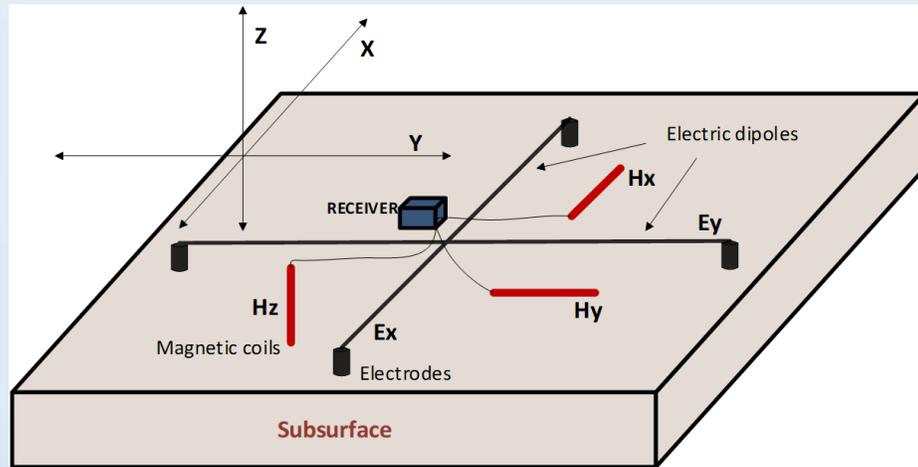
- Para bajas frecuencias ( $< 1\text{Hz}$ ): la fuente es la distorsión de la magnetosfera



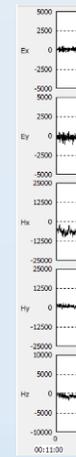


# Método MT/AMT

- En el método magnetoteléurico se miden el campo magnético natural de la tierra en dirección horizontal y vertical en la superficie.
- Se registran series de tiempo de las señales.



Configuración típica para MT (Phoenix Geophysics, 2015).



Señales

# Método MT/AMT

- Se requiere de nivel y brújula, así como multímetro, para verificar los parámetros y ajustar cuidadosamente los sensores.
- Se necesita ortogonalidad y ajuste fino.

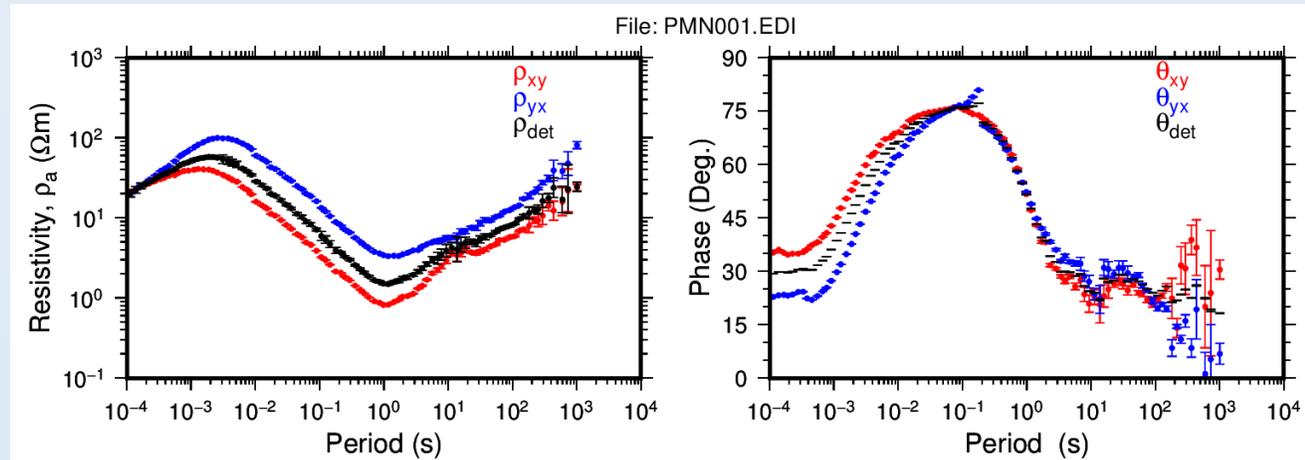


# El tensor de impedancias

- Se utilizan las ecuaciones de Maxwell para desarrollar las relaciones.
- La relación entre el campo eléctrico y magnético del subsuelo es una medida característica de las propiedades electromagnéticas del medio, conocida como impedancia  $\mathbf{Z}$ .

$$\mathbf{E} = \mathbf{Z}\mathbf{H}$$

$$\begin{bmatrix} E_x \\ E_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \end{bmatrix}$$



$$\rho_{xy} = \frac{1}{\omega\mu} |Z_{xy}|^2 = \frac{1}{\omega\mu} \left| \frac{E_x}{H_y} \right|^2 \quad \rho_{yx} = \frac{1}{\omega\mu} |Z_{yx}|^2 = \frac{1}{\omega\mu} \left| \frac{E_y}{H_x} \right|^2 \quad \theta_{xy} = \arg(Z_{xy})$$

$$\theta_{yx} = \arg(Z_{yx})$$

# Riesgos en el campo

- La instrumentación puede sufrir daños adversos por condiciones que no se pueden controlar.
- Las personas también.



Ay guevonazo!!!



????

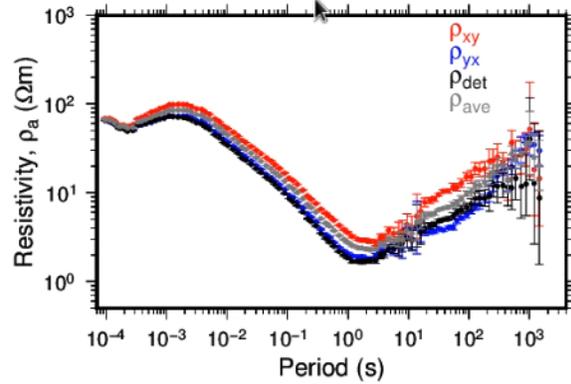




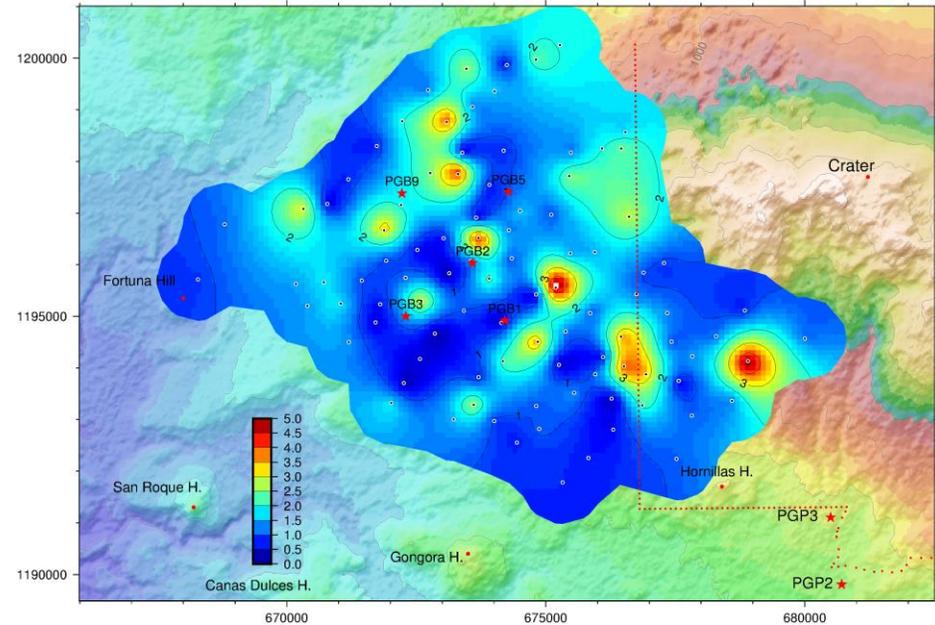
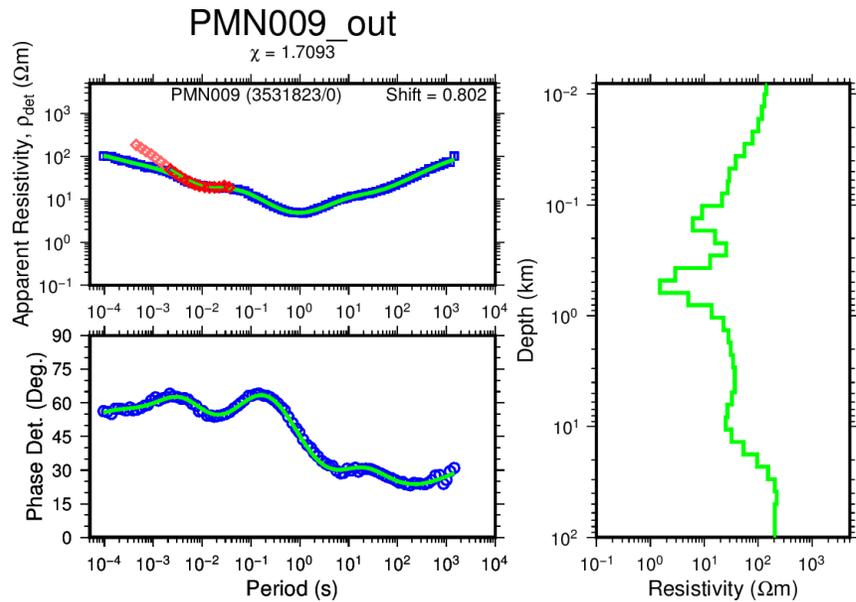
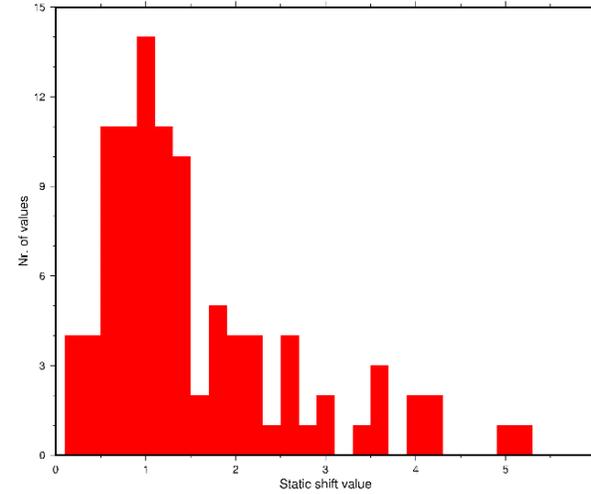
# Diferentes formas de modelar la resistividad

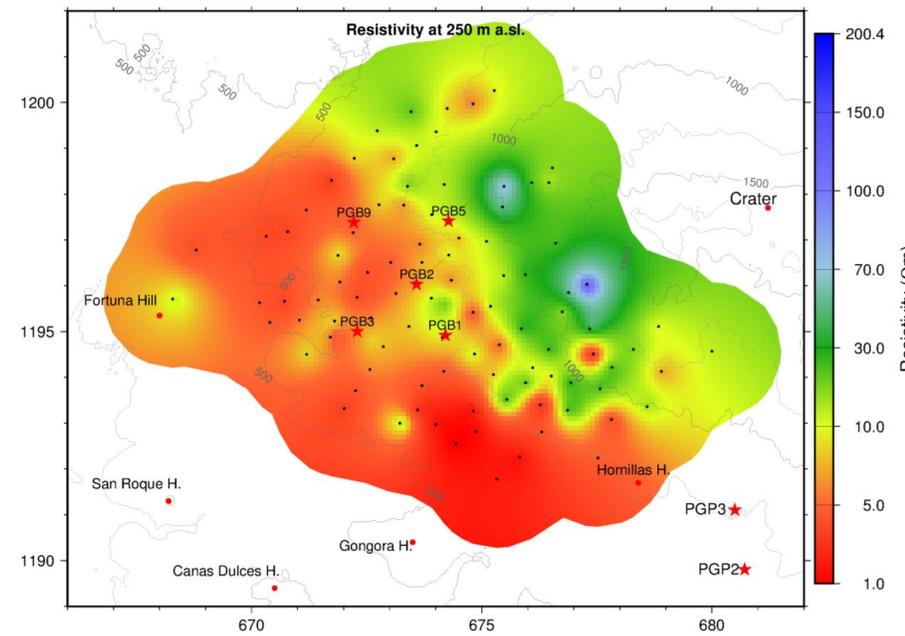
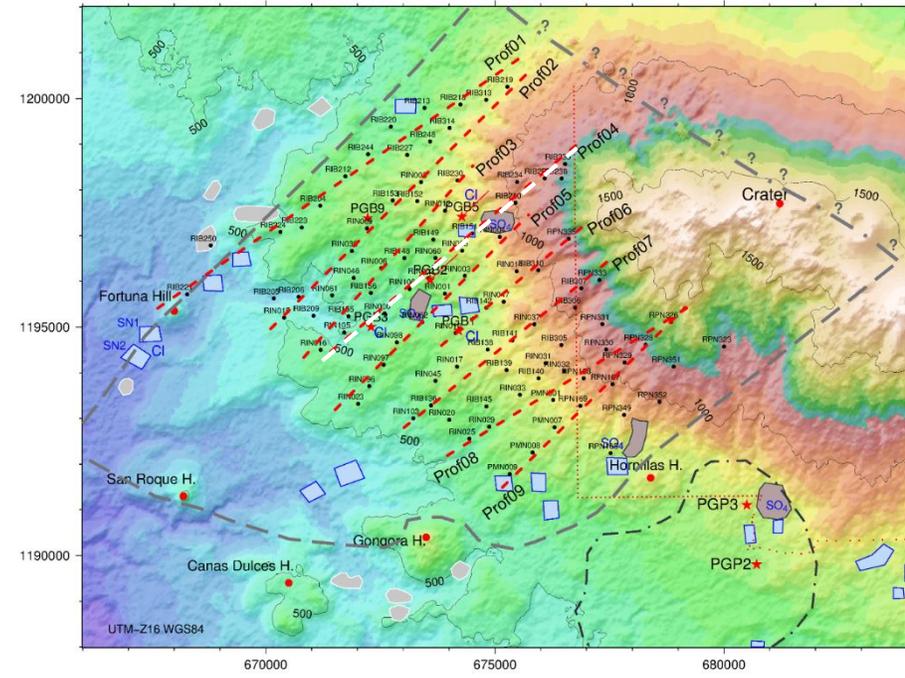
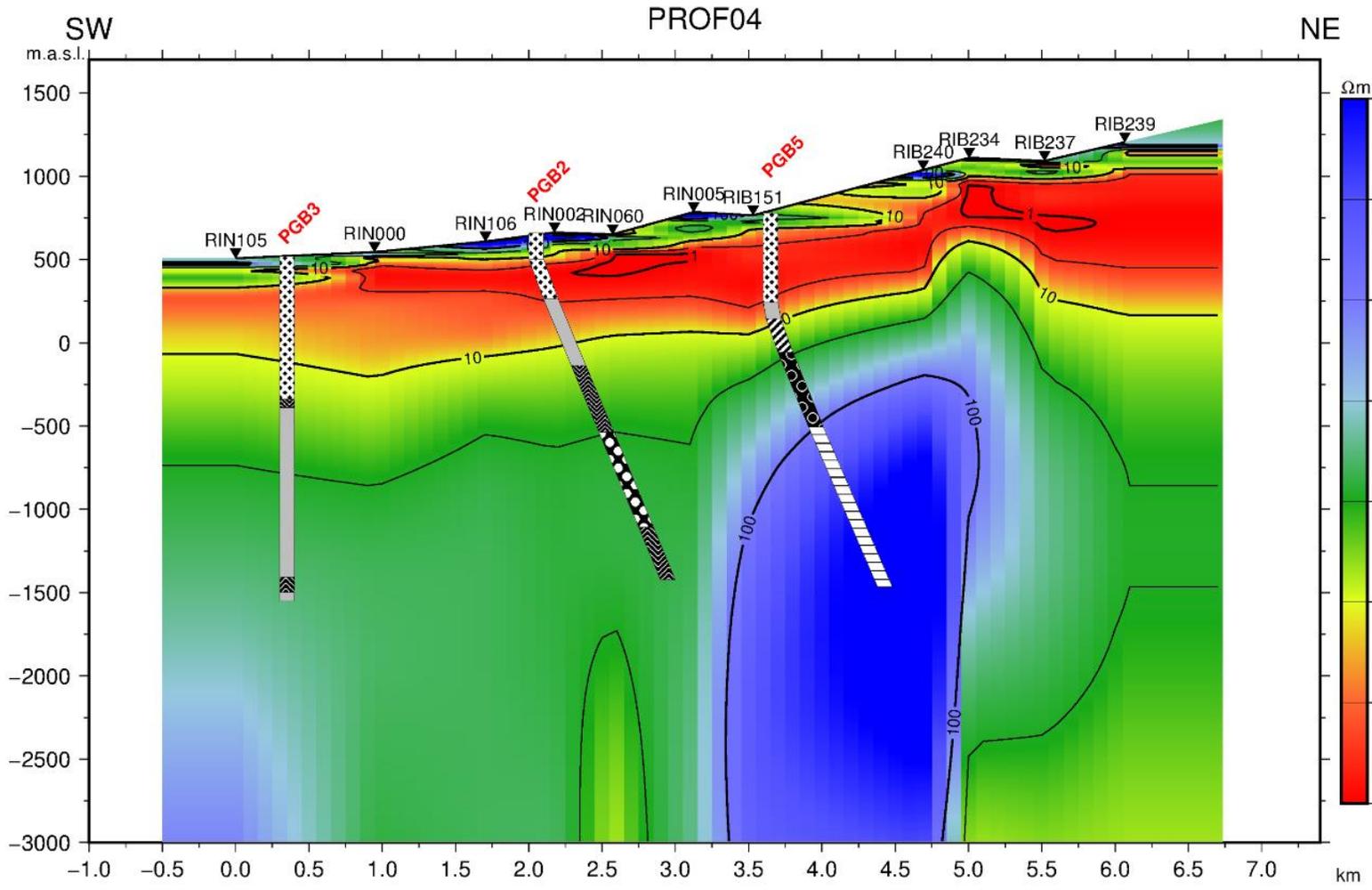
- Modelos unidimensionales:
  - La resistividad unicamente varía en una dirección.
  - Rápidos de generar
  - Dan una buena visión de la geoeléctrica de la zona.
- Modelos 2D
  - La resistividad es constante en una dirección, y varía en dos de ellas.
  - Funcionales para determinación de discontinuidades
  - Muy dependientes del strike geológico
- Modelos 3D
  - Variación de la resistividad en  $x$ ,  $y$ ,  $z$ .
  - Más apegados a la realidad
  - Delimitan más detalladamente la capa sello y el reservorio.

# Inversión conjunta 1D de MT y TDEM



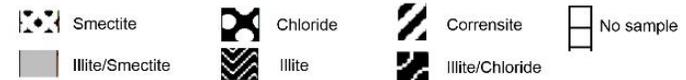
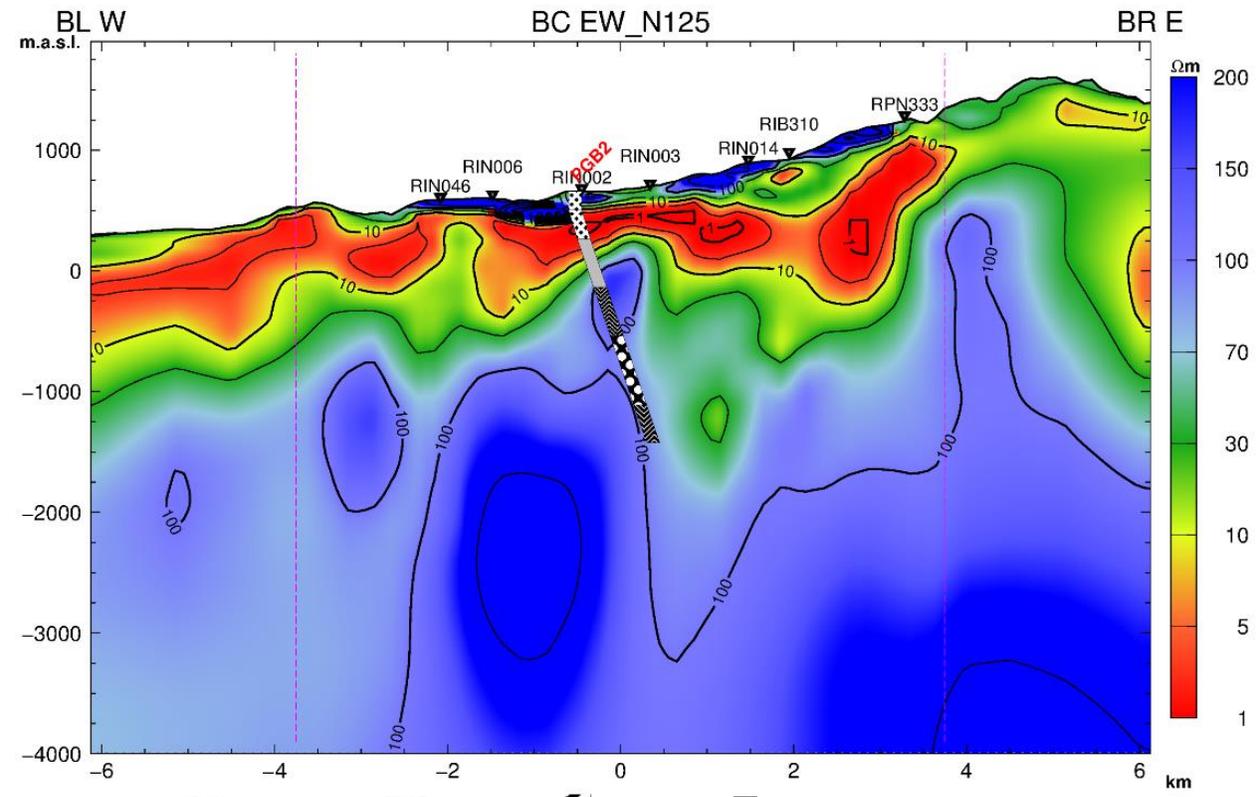
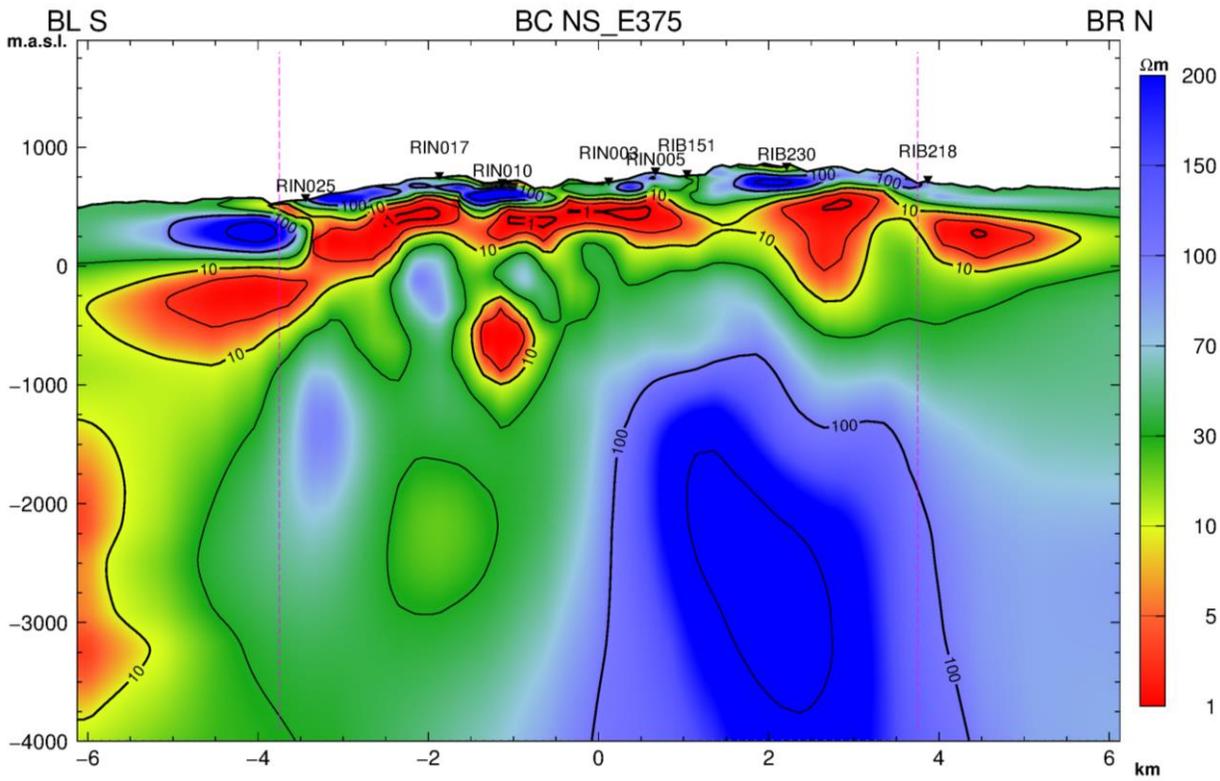
$$Z_{det} = \sqrt{Z_{xx}Z_{yy} - Z_{xy}Z_{yx}}$$



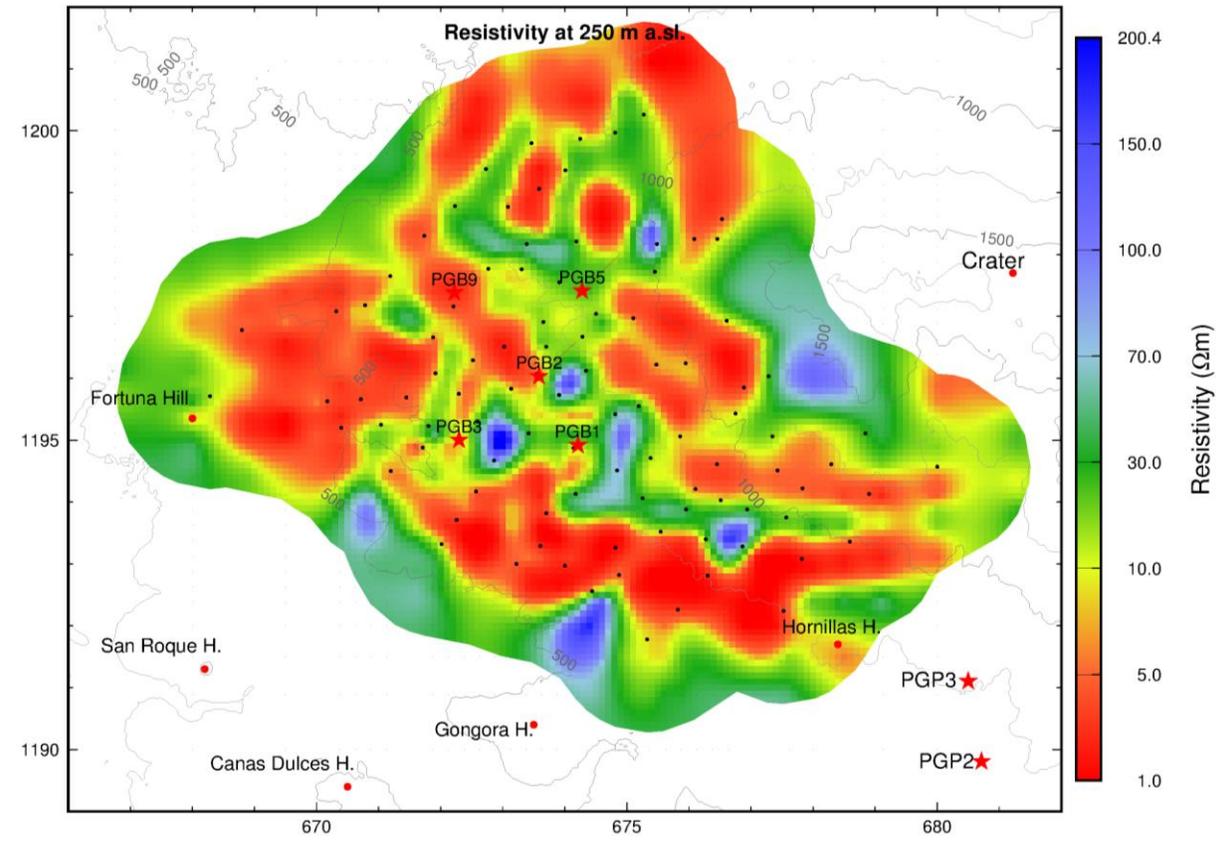
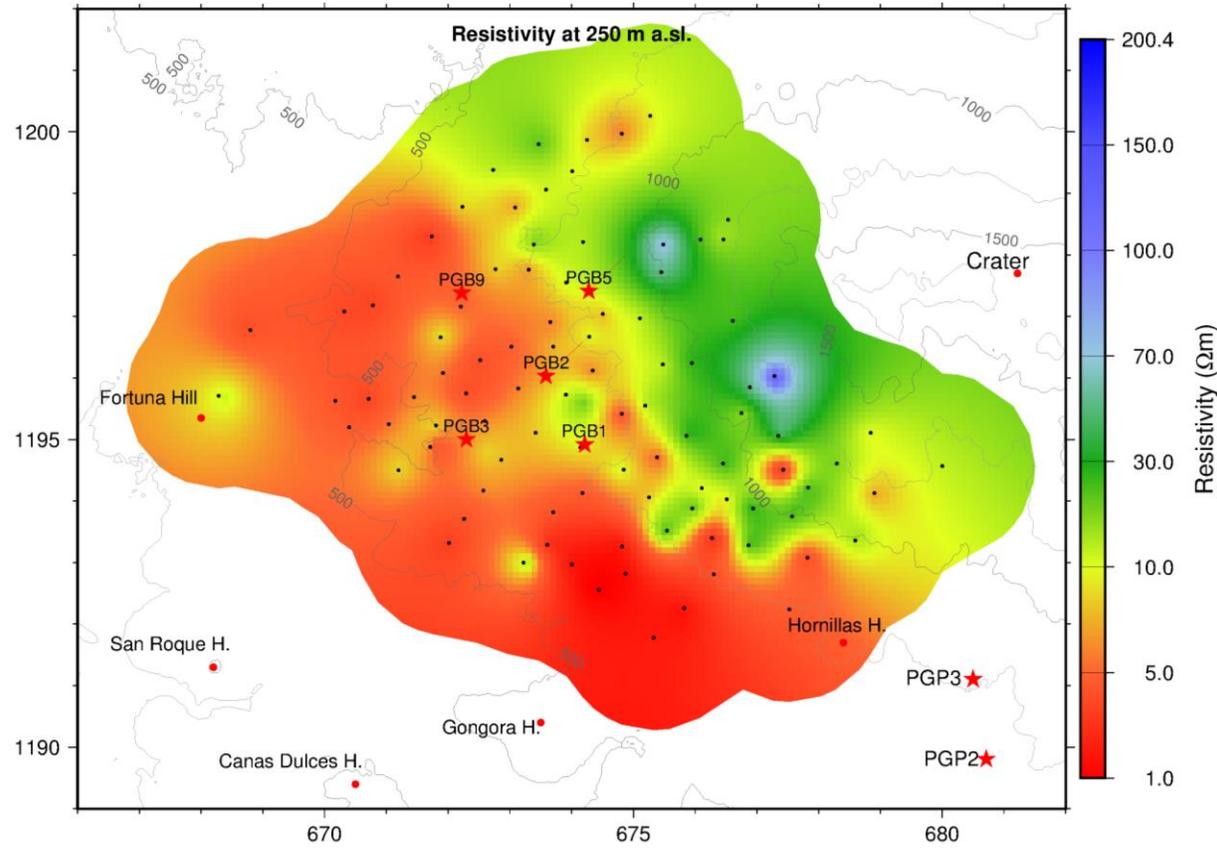


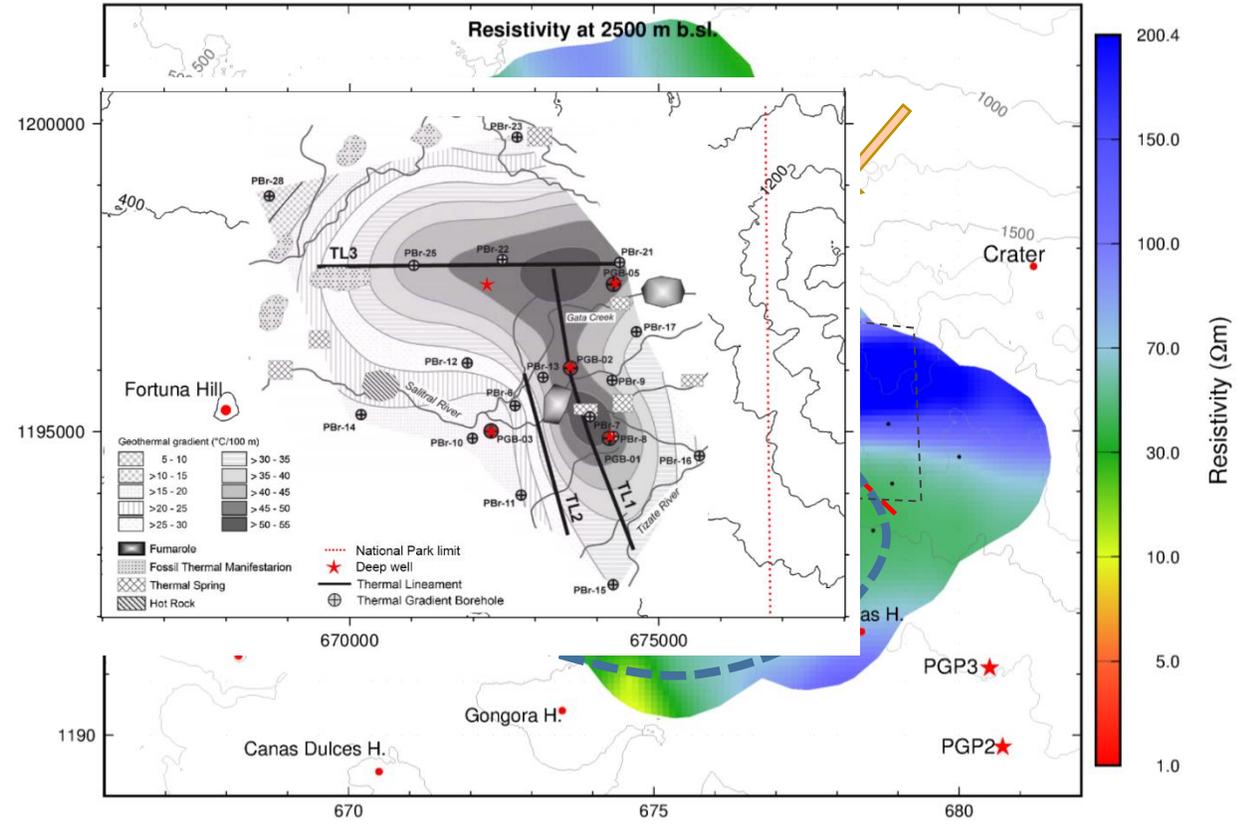
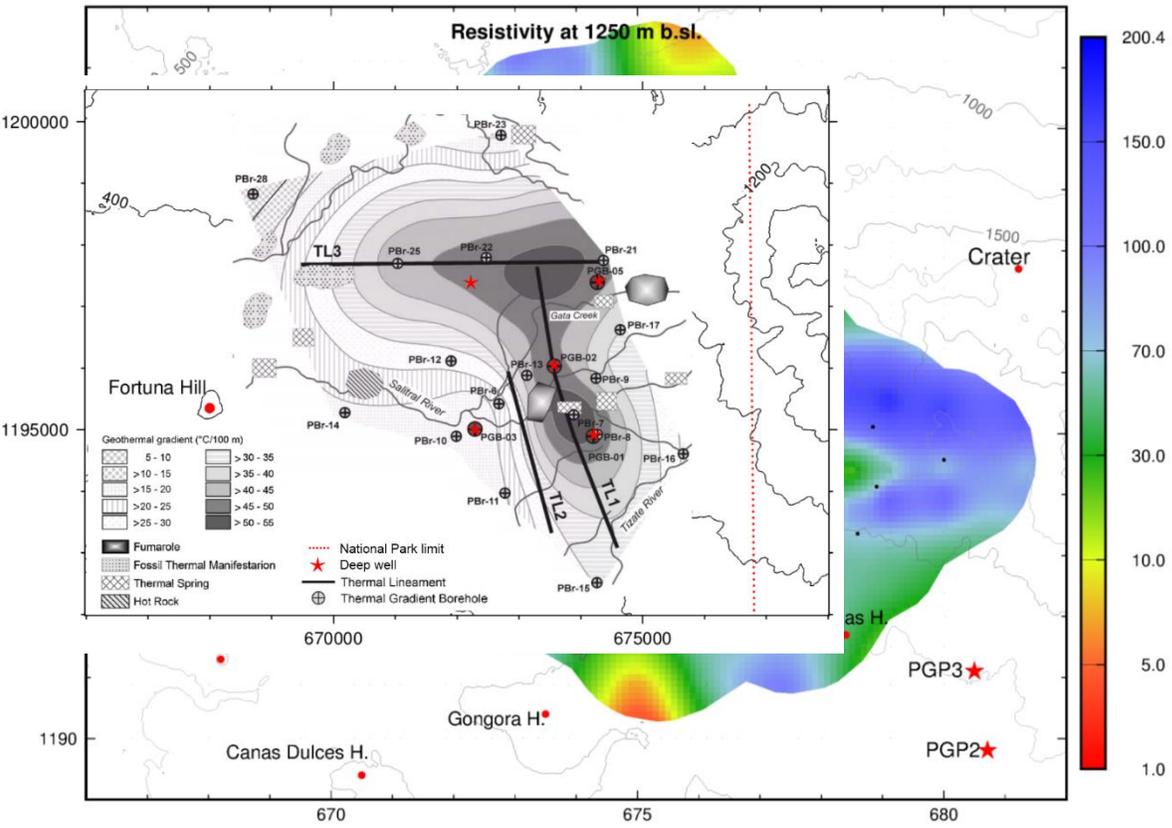
- |                 |          |                 |           |
|-----------------|----------|-----------------|-----------|
| Smectite        | Chloride | Corrensite      | No sample |
| Illite/Smectite | Illite   | Illite/Chloride |           |

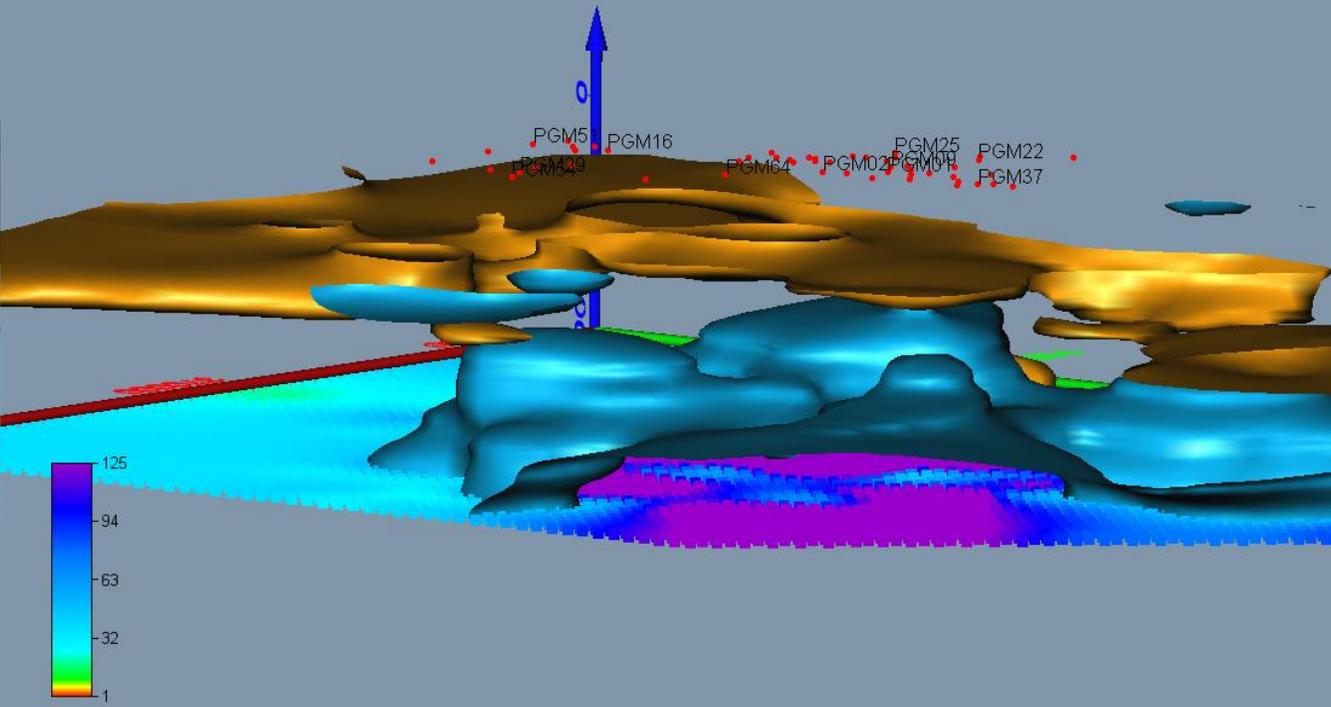
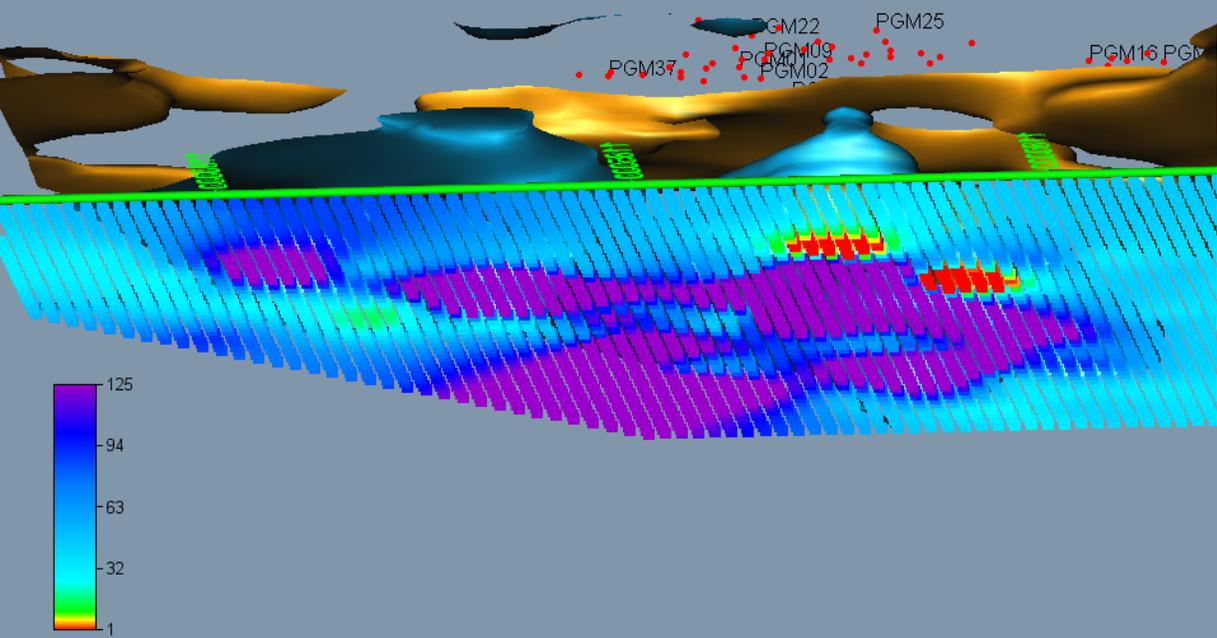
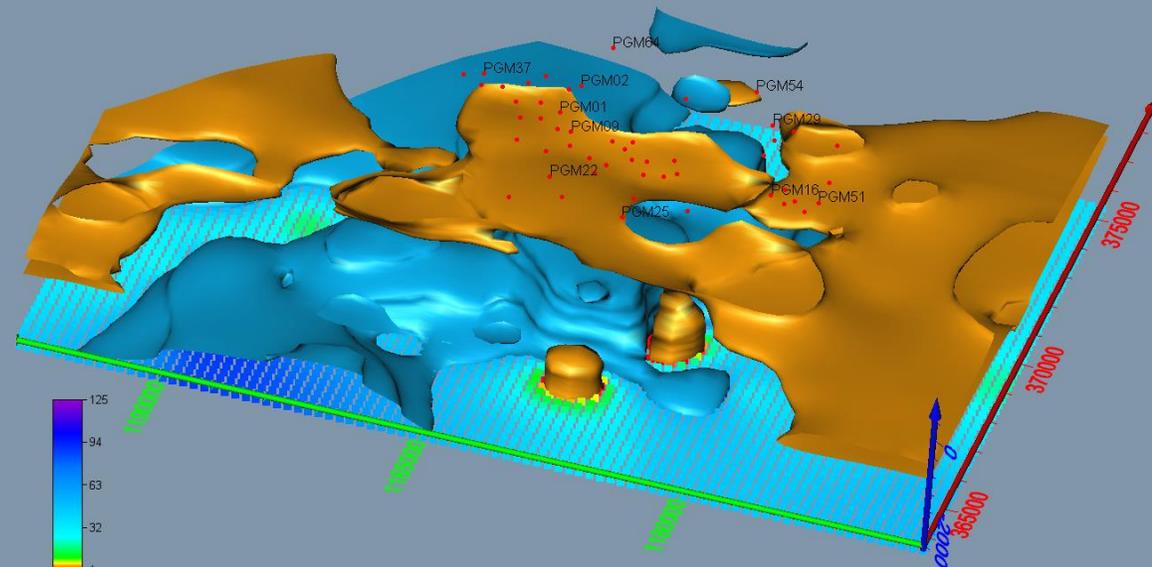
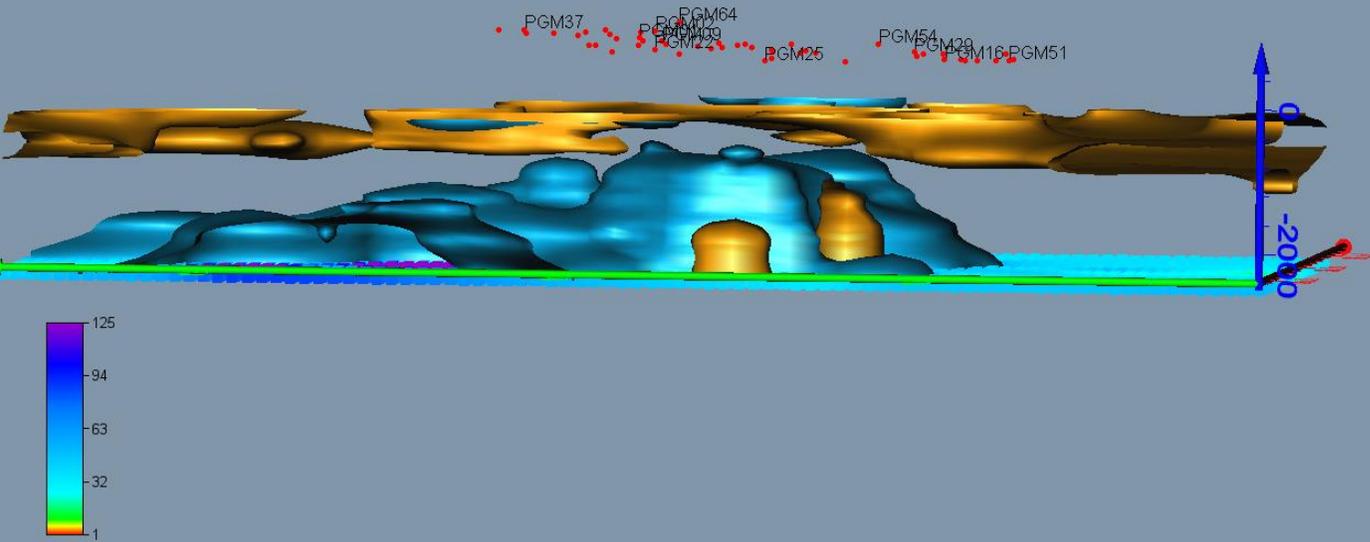
# Perfiles de resistividad a partir de la inversión 3D

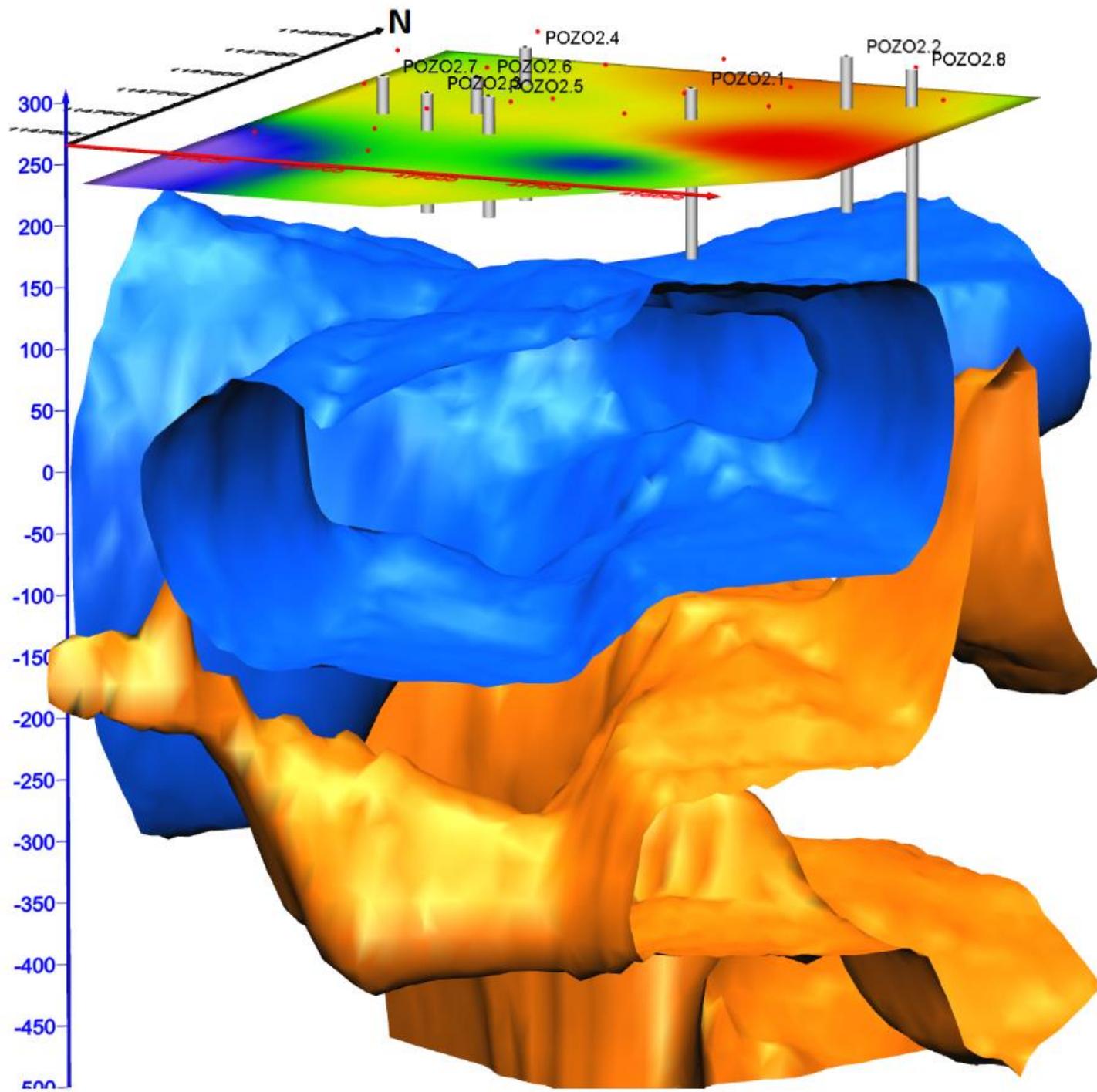


# Mapas de resistividad a partir de la inversión 3D

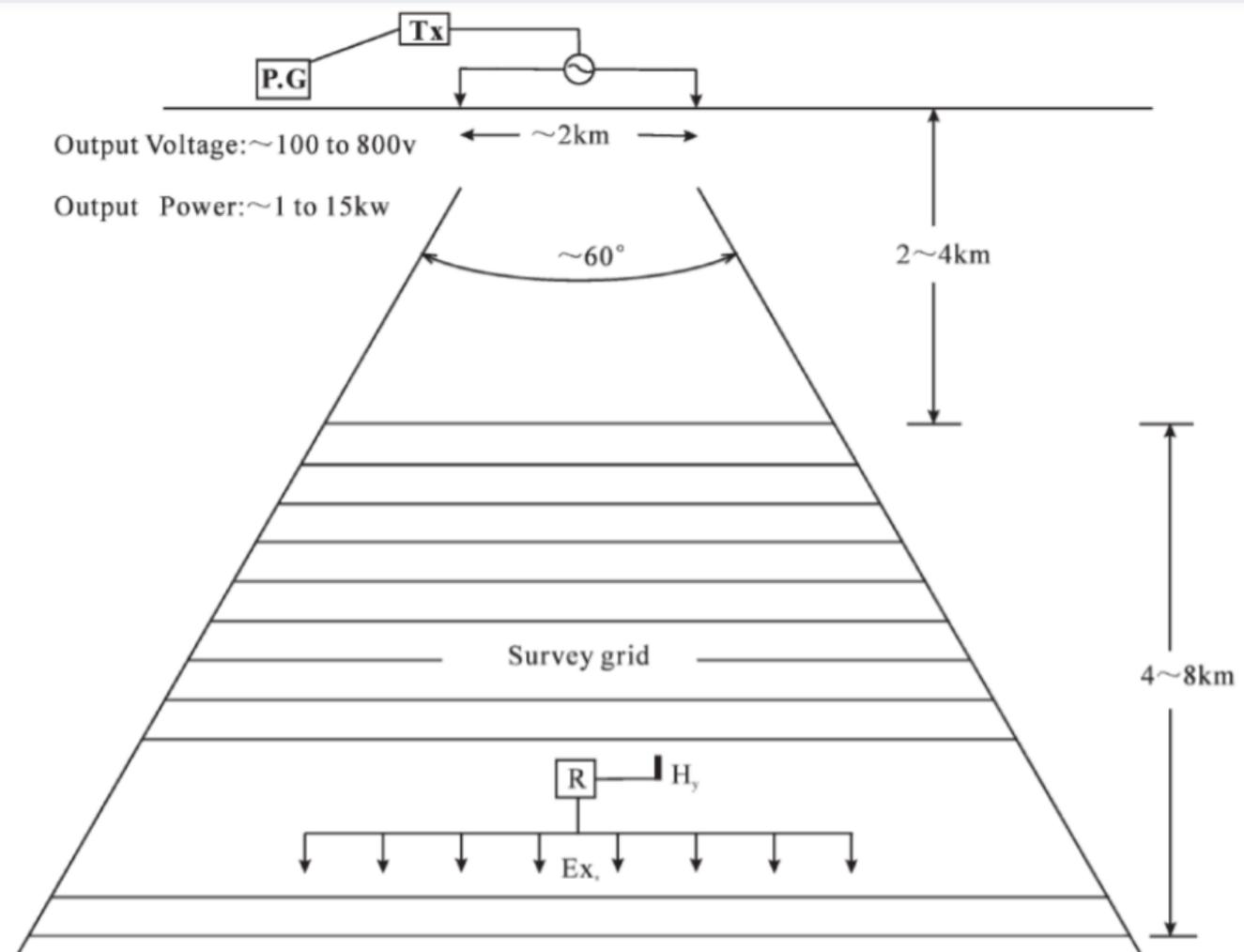






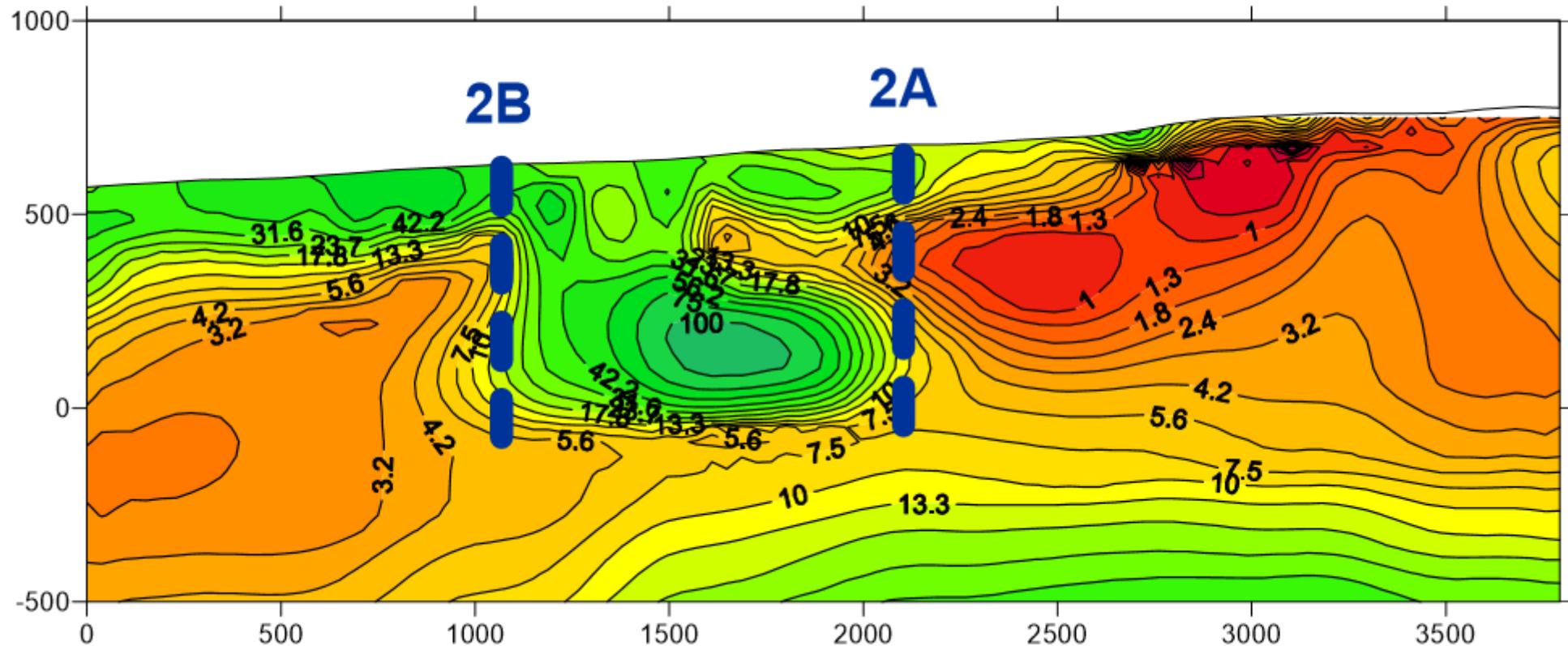


# Audio-magnetotelúrico de fuente controlada (Controlled source audiomagnetotellurics, CSAMT)



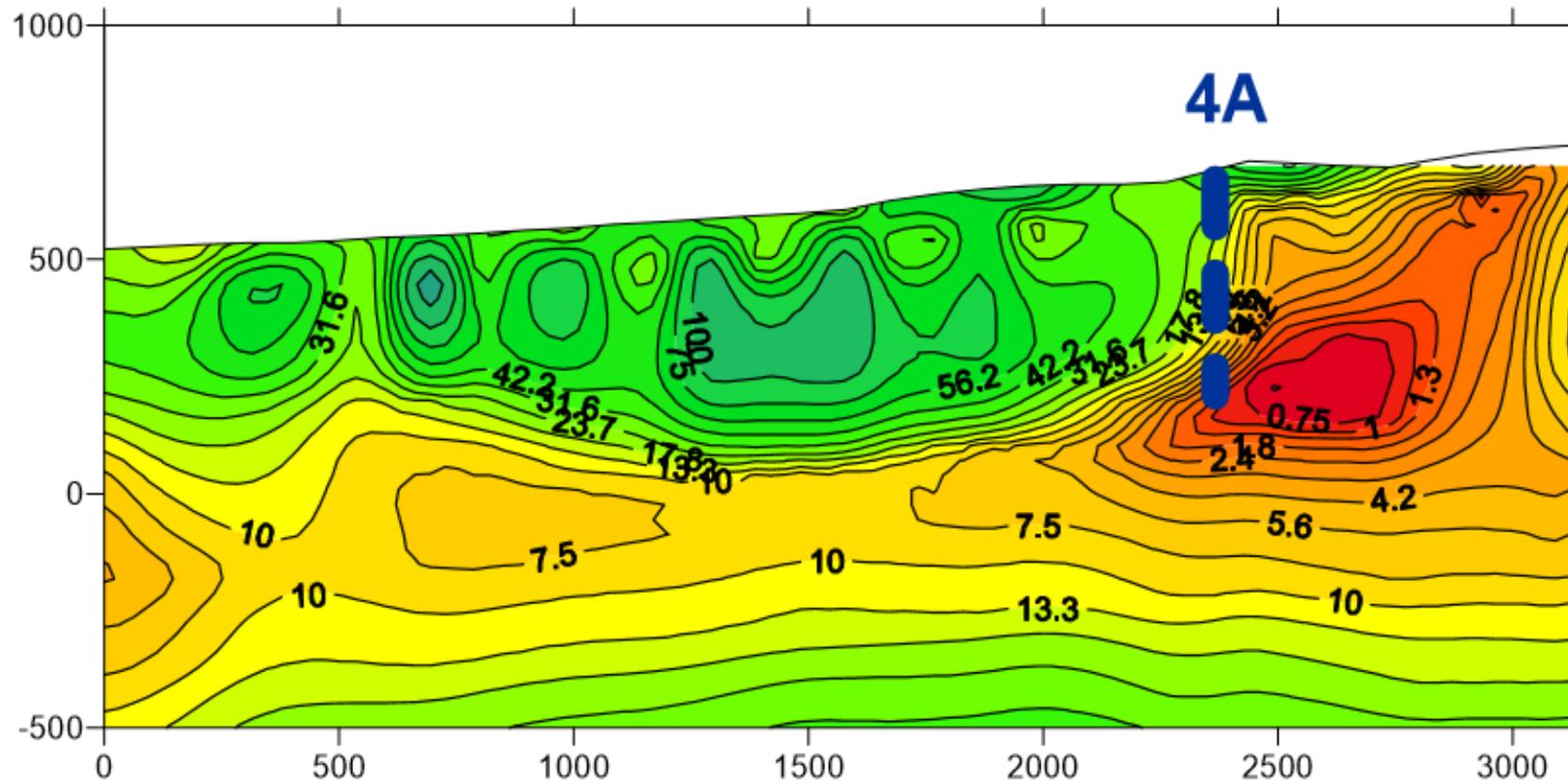
# Audio-magnetotelúrico de fuente controlada

- Rango de frecuencias de 1 Hz – 10 kHz



# Método CSAMT

- Corresponde a perfiles para tratar de identificar discontinuidades y espesor de la capa sello.

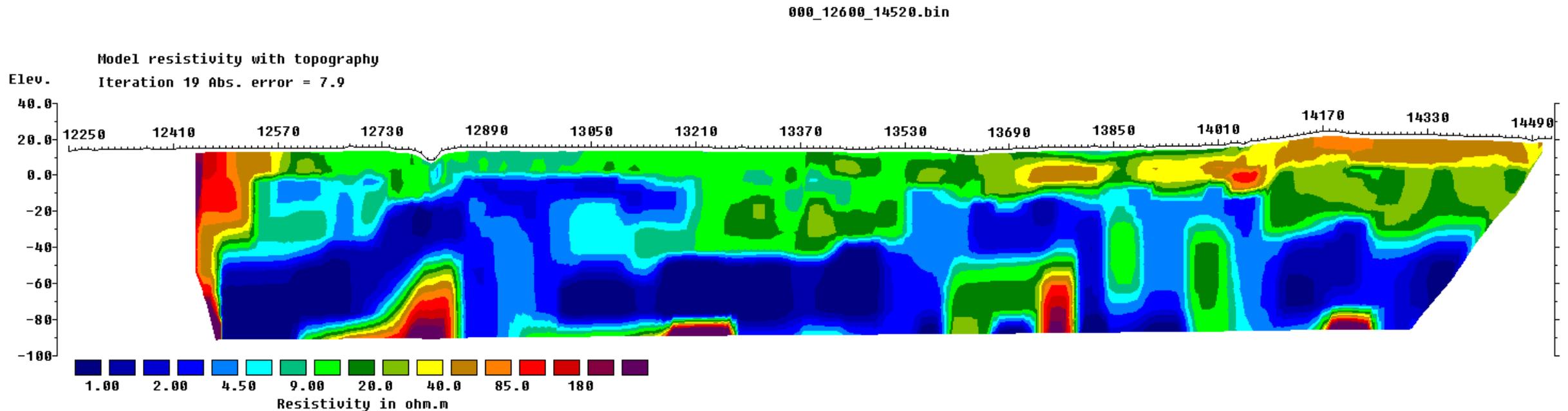


# Método polarización inducida (IP) y tomografía eléctrica



# Método polarización inducida (IP) y tomografía eléctrica

- Métodos superficiales, 100 m de profundidad.

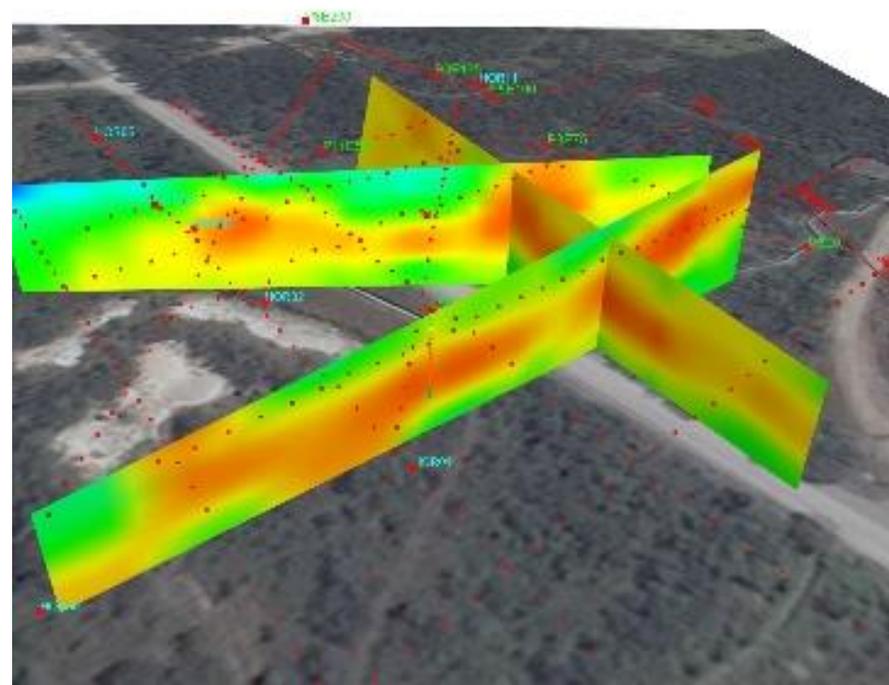
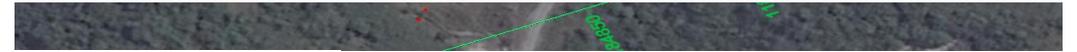
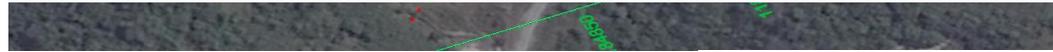
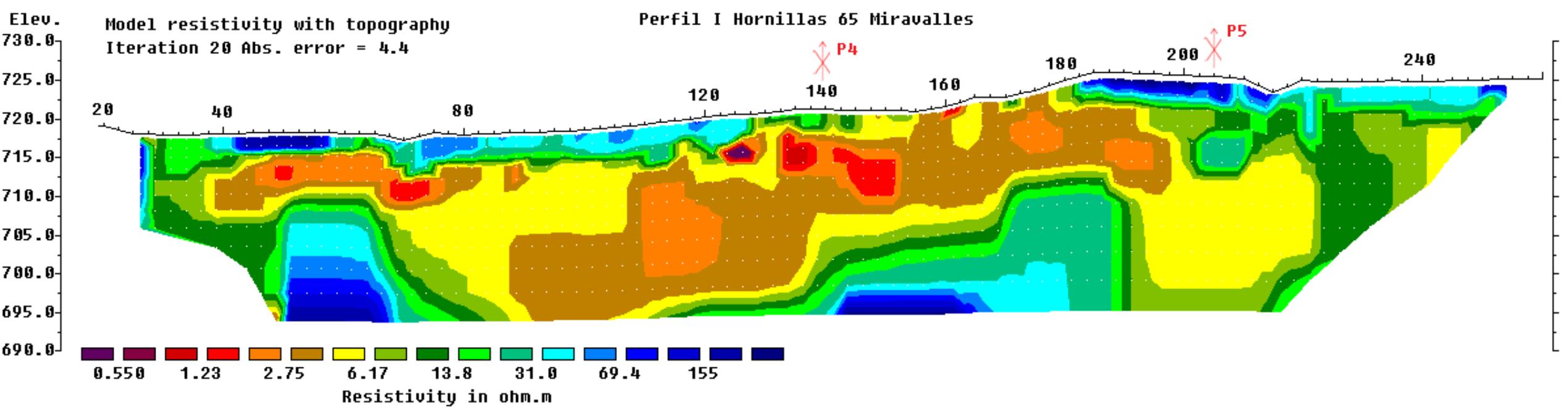


Horizontal scale is 6.11 pixels per unit spacing

Vertical exaggeration in model section display = 2.77

First electrode is located at 12250.0 m.

Last electrode is located at 14520.0 m. Unit Electrode Spacing = 10.0 m.



# Gravimetría

- Consiste en la medición de las pequeñas variaciones en el campo de gravedad terrestre

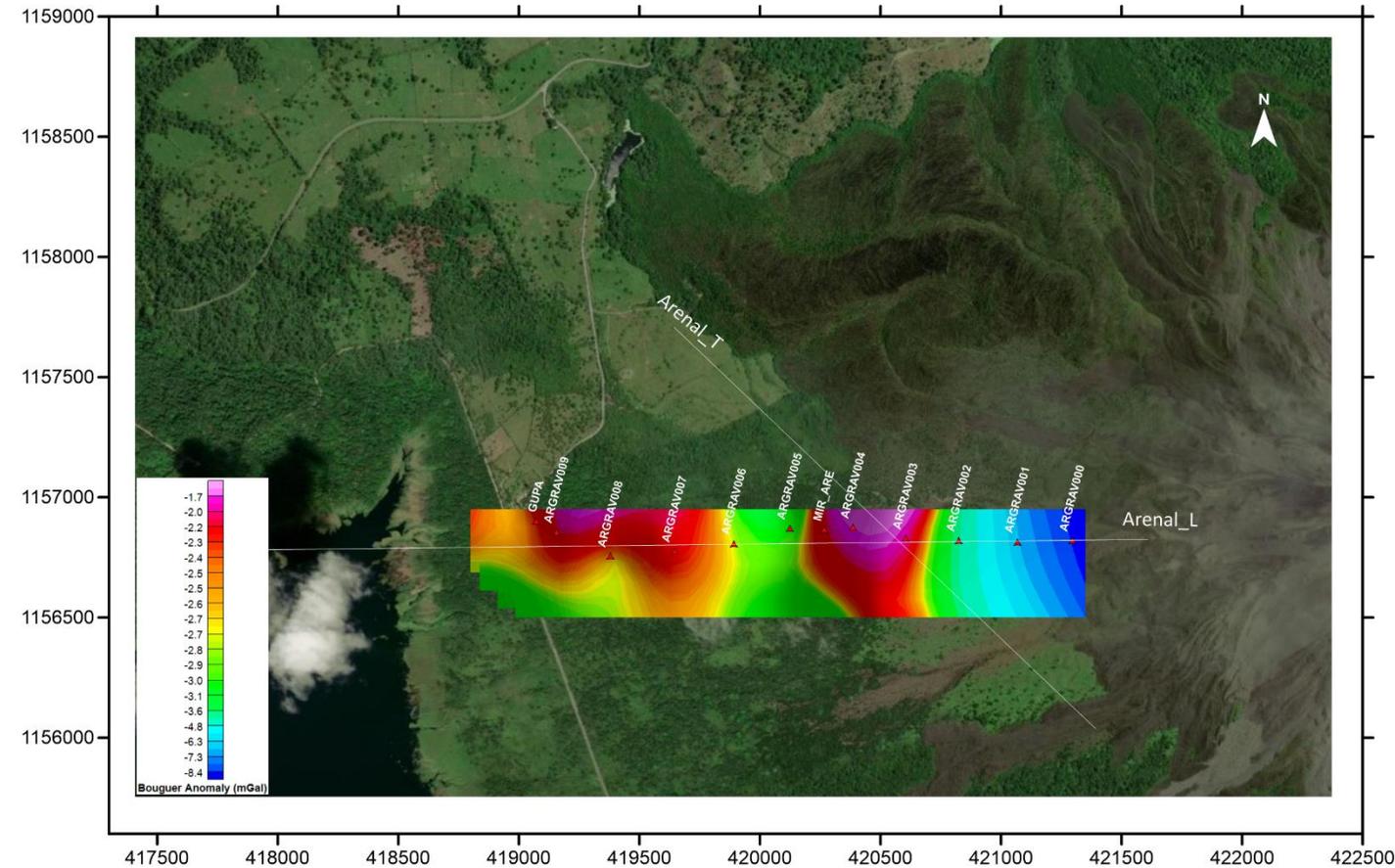
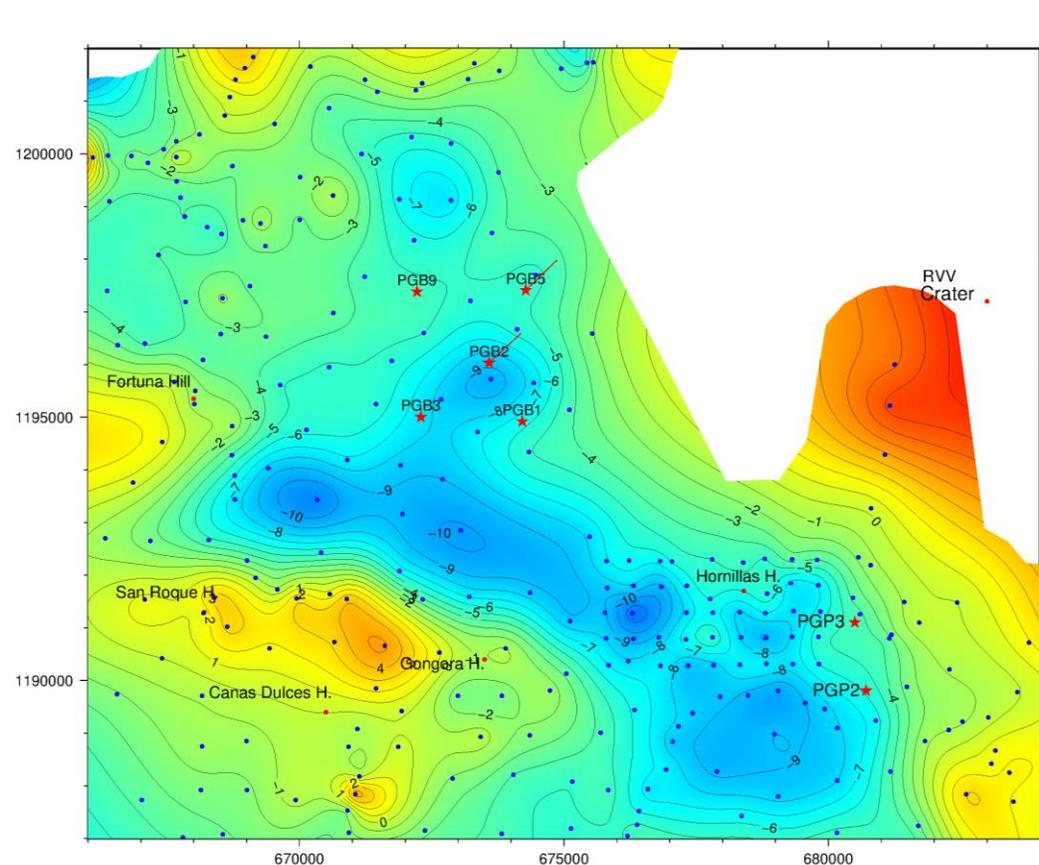


# Mediciones de gravedad

- Es una técnica extremadamente sensible.
- Siempre deben confirmarse las medidas, mediante la creación de lazos de medición.



# Resultados gravimetría: anomalía de Bouguer



# Magnetometría

- Se mide la intensidad de campo magnético (nT)

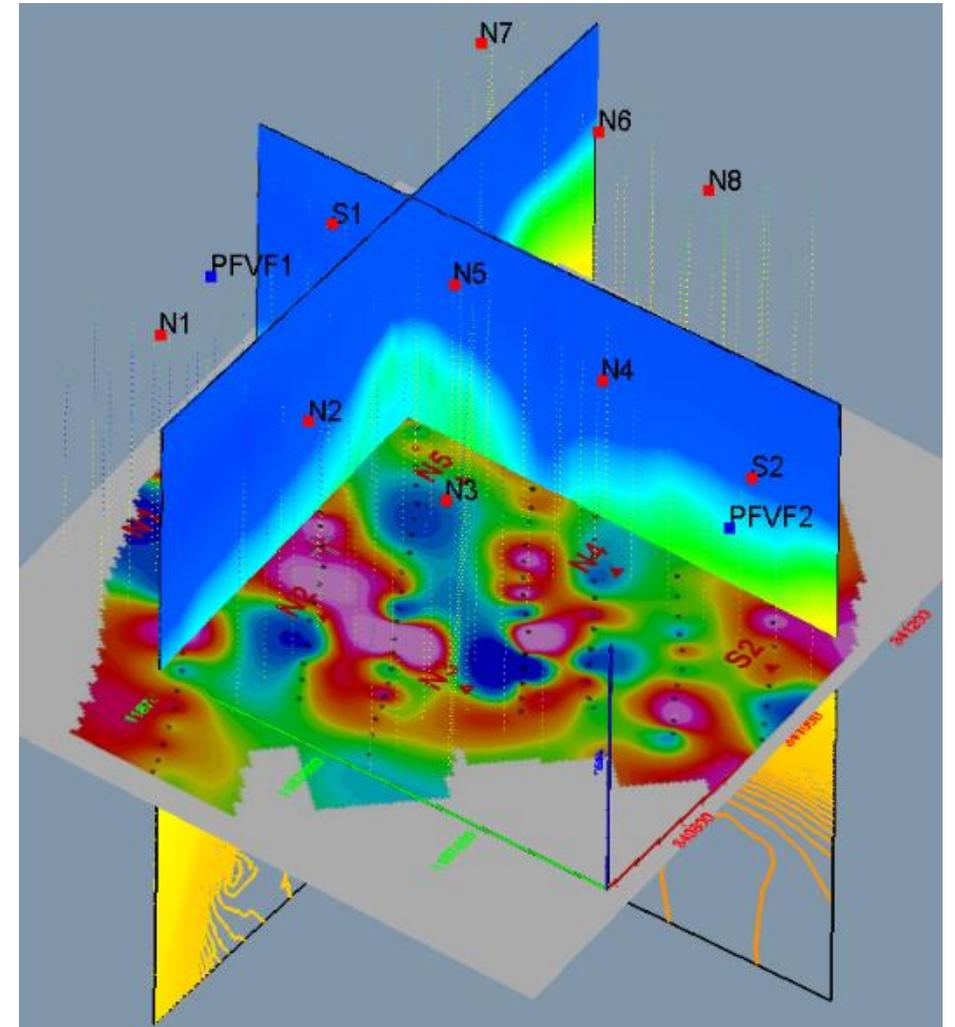
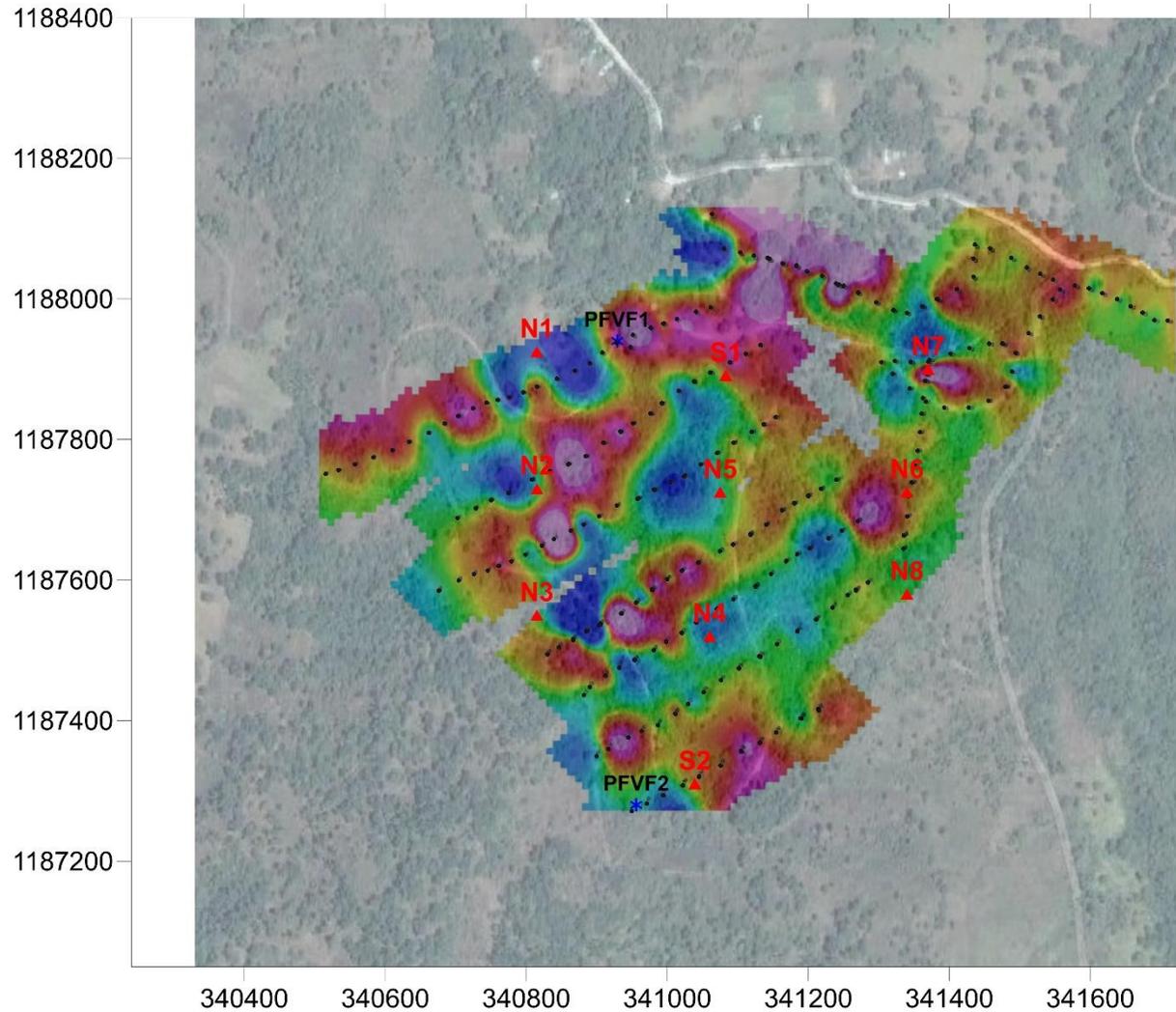


# Magnetometría

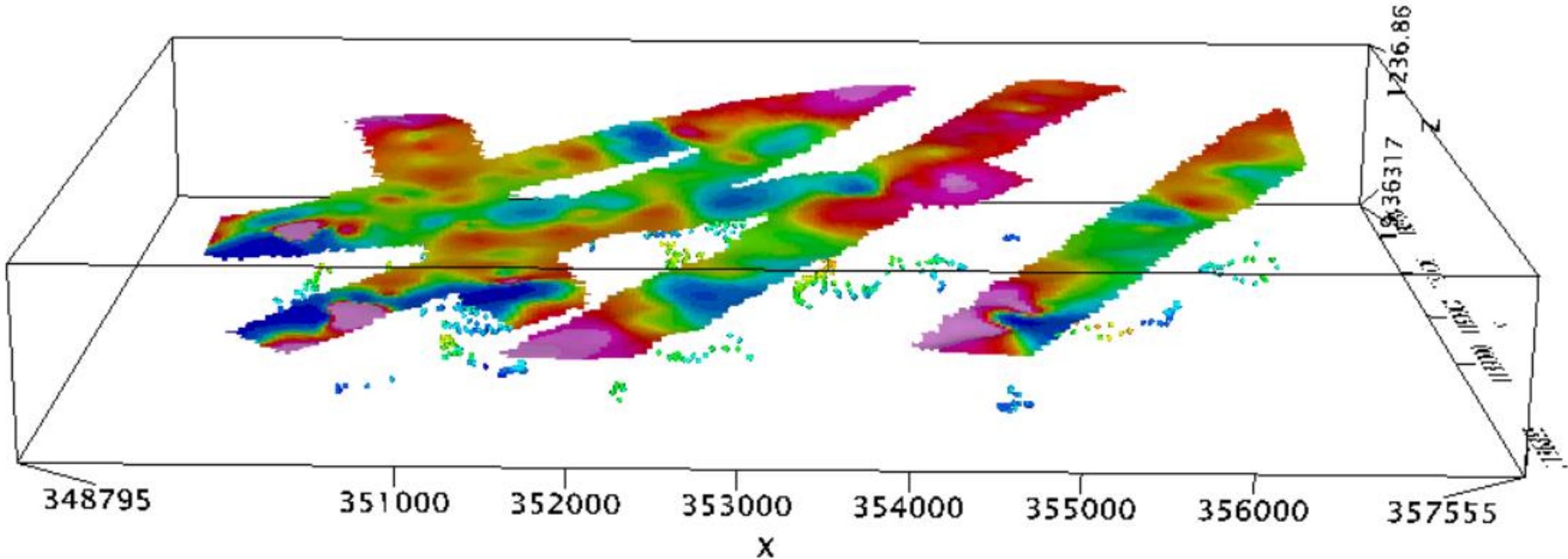
- Se realizan mediciones en forma de perfil
- Se requiere una estación base.



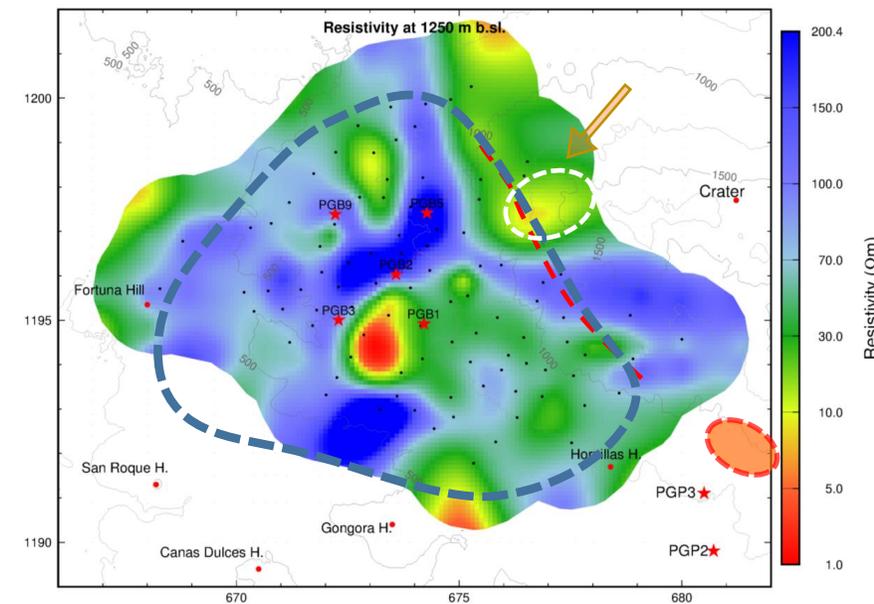
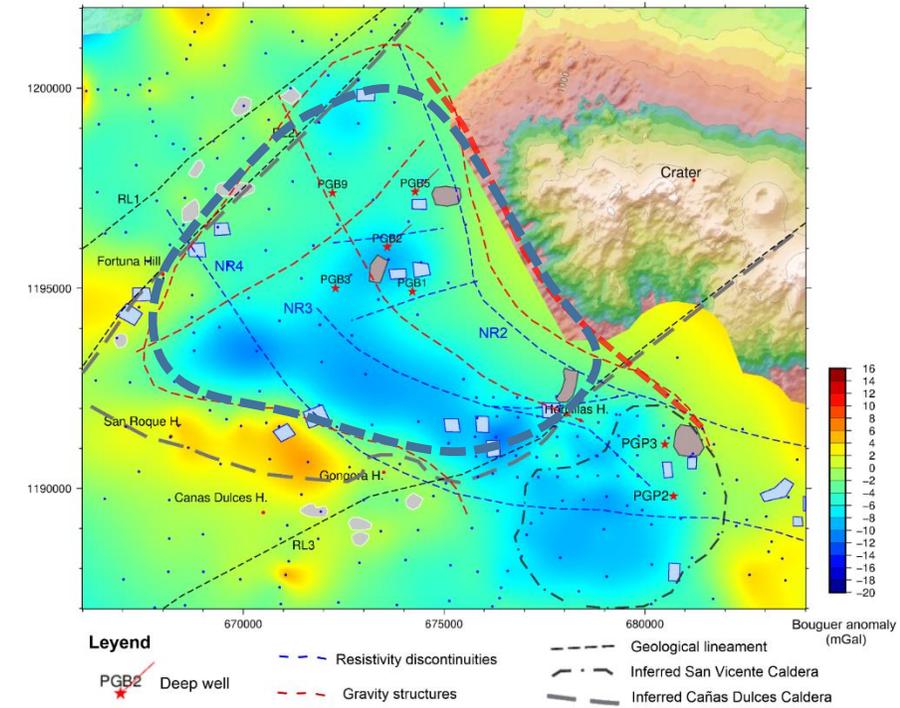
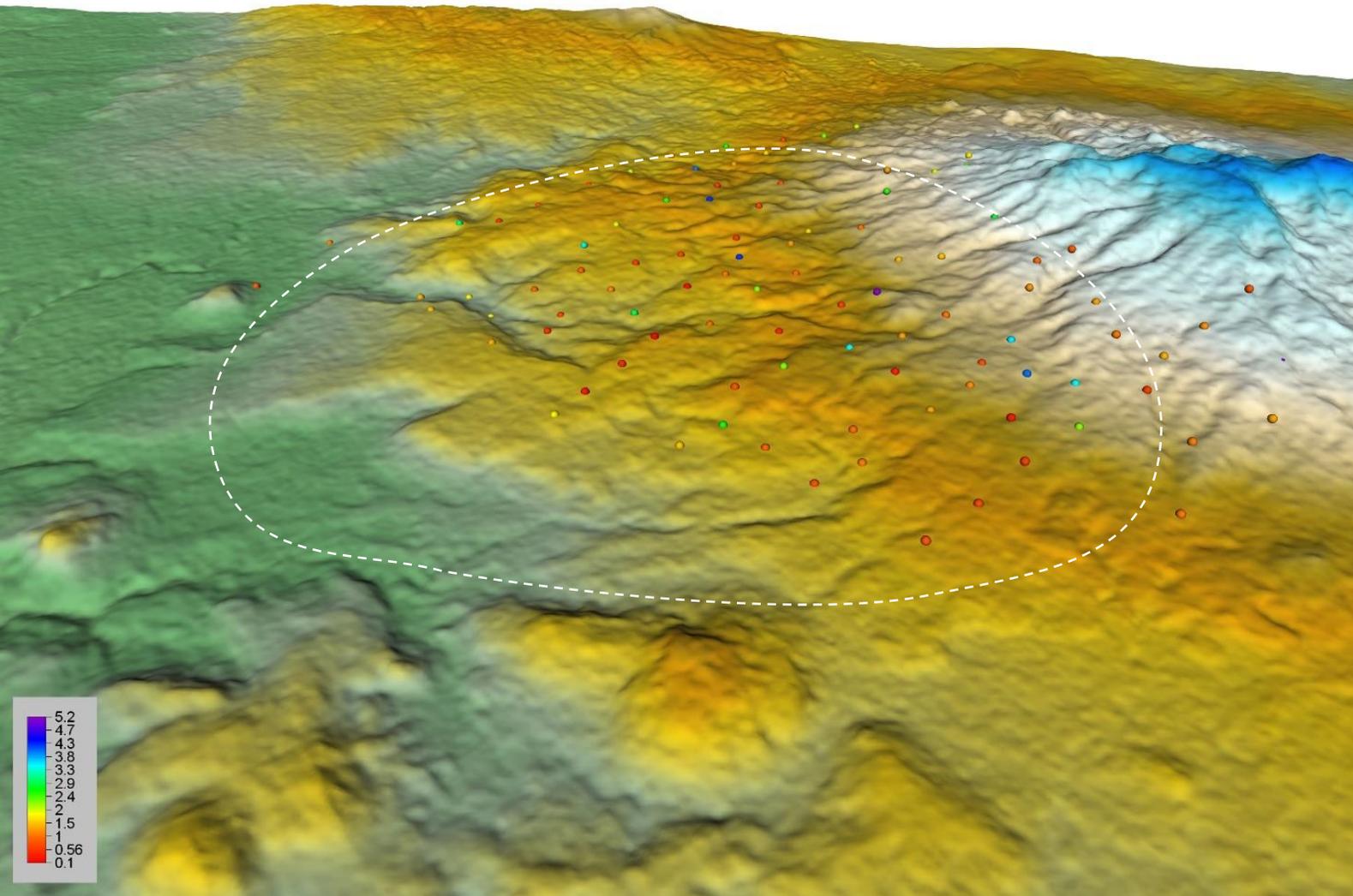
# Creación de mapa magnético



# Modelación de anomalía magnética y posibles profundidades de las fuentes

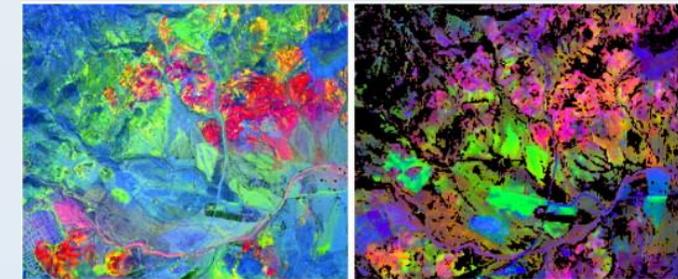
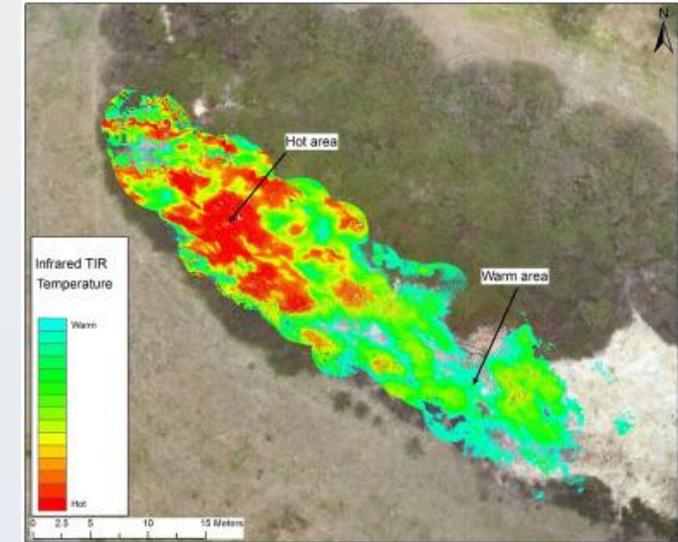
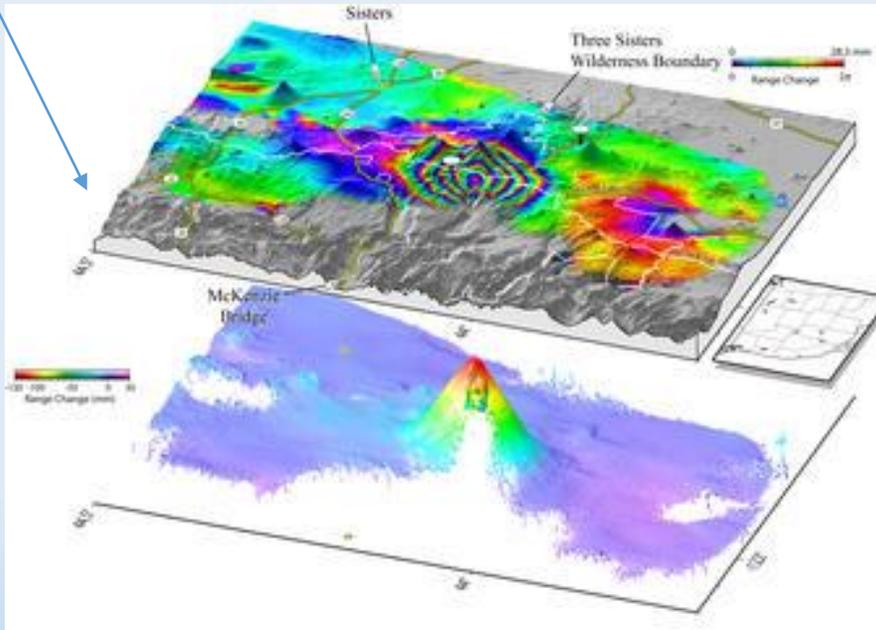


# Integración de resultados



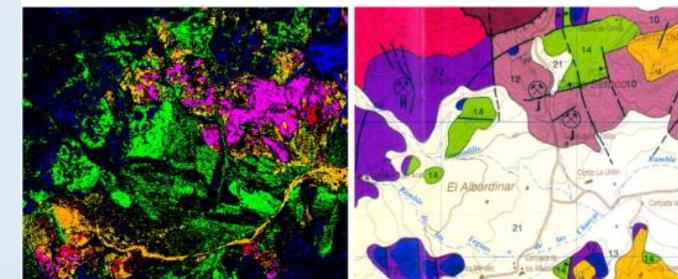
# Monitoreo remoto

- Mapeo de temperaturas: Thermal infrared
- Mapeo geológico / de minerales
- Deformación del subsuelo.



**A** HyMap Clay band ratios  
 ●  $R_{2100}/R_{2171} \approx$  Alunite  
 ●  $R_{2171}/R_{2206} \approx$  Illite  
 ●  $R_{2350}/R_{2258} \approx$  Limestone and seds.

**C** S2 Sabins band ratios  
 ● Band 11/12  $\approx$  Hydroxyl bearing  
 ● Band 04/02  $\approx$  All iron oxides  
 ● Band 04/11  $\approx$  Ferrous iron oxides



**B** HyMap MRSFF classification  
 ● Pyrophyllite  
 ● Alunite/Dickite  
 ● Alunite  
 ● Kaolinite  
 ● Illite  
 ● Limestone  
 ● Unclassified

**D** Arribas' geological map  
 ● 10: Ignimbrite  
 ● 11: Rhyolitic domes  
 ● 12: Ignimbrite  
 ● 13: Volcanoclastic & lacustrine seds  
 ● 14: Outflows and intrusive volcanics  
 ● 19: Reef complex  
 ● 21: Quaternary deposit

# Resumen sobre aplicación de los métodos

- Mapear y delimitar la capa sello: resistividad eléctrica (MT+TDEM)
- Determinar discontinuidades, cambios estructurales, contactos litológicos, buscando permeabilidad y para modelo conceptual:
  - Resistividad eléctrica (DC, MT, TDEM, etc)
  - Anomalía de Bouguer (gravimetría)
  - Anomalía magnética (magnetometría)
  - Sismicidad
- Determinar y delimitar la probable localización del reservorio: resistividad eléctrica, sismicidad.
- Determinar fuente de calor: resistividad eléctrica.



Muchas gracias!

Preguntas?

# Referencias

- Archie, G.E. (1942). The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Tran. AIME*, 146, 54-67.
- Árnason, K. (1989). *Central-loop transient electromagnetic sounding over a horizontally layered earth*. Orkustofnun, Reykjavík, report OS-89032/JHD-06, 129 pp.
- Hersir, G.P., and Björnsson, A. (1991). *Geophysical exploration for geothermal resources. Principles and applications*. UNU-GTP, Iceland, report 15, 94 pp.
- Hersir, G.P., and Árnason, K. (2009). Resistivity of rocks. *Paper presented at the Short Course on Surface Exploration for Geothermal Resources, organized by UNU-GTP and LaGeo, Santa Tecla, El Salvador*, 8 pp.