

# Exploración Geofísica de Litio

## Estado del arte, nuevos paradigmas y direcciones futuras

**Dr. Ing. Ana Curcio**

**Geophysical Advisor**

**Society of exploration Geophysicists (SEG) Past Director at Large**



# Exploración Geofísica de Litio

## Estado del arte, nuevos paradigmas y direcciones futuras

### Agenda

- Objetivos
- Estado del arte – ventajas y desventajas de los distintos métodos geofísicos en exploración de salmueras
- Estado del arte - Kit multifísica efectivo
- Direcciones futuras
- Conclusiones

# Exploración Geofísica de Litio

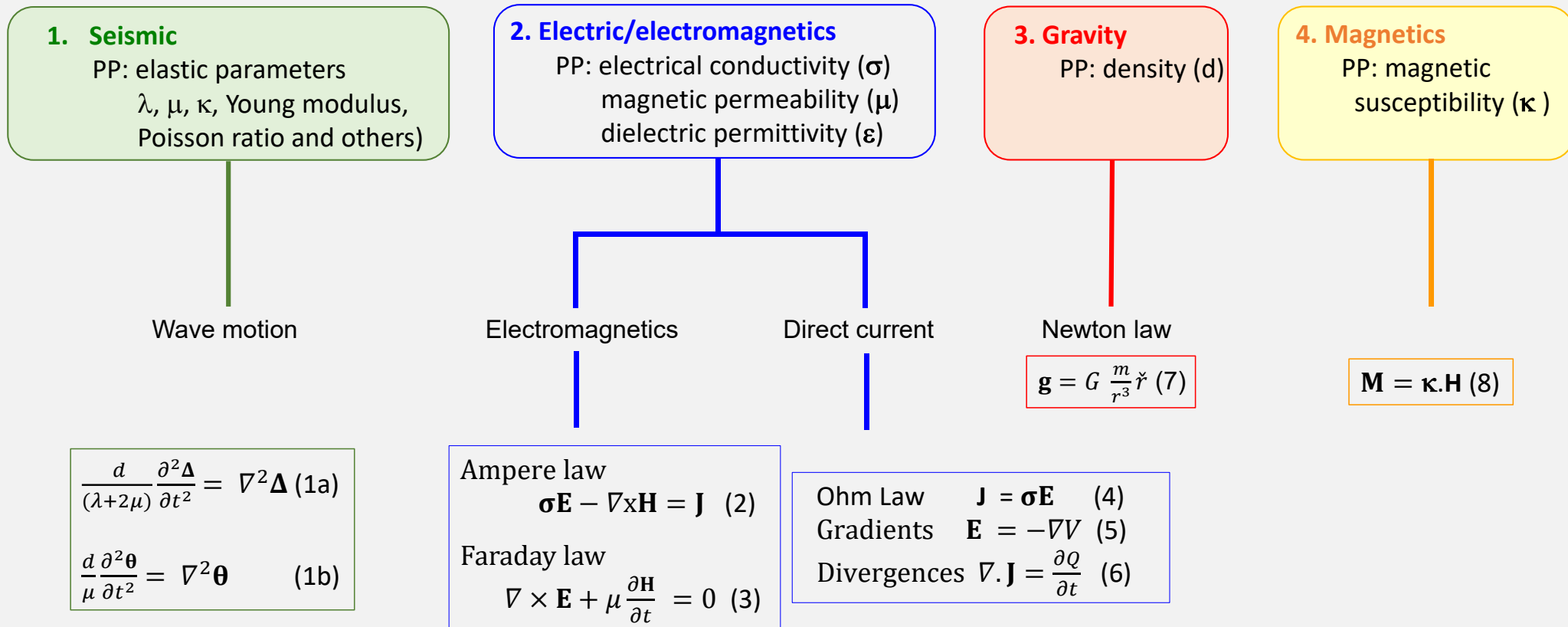
## Estado del arte, nuevos paradigmas y direcciones futuras

### Agenda

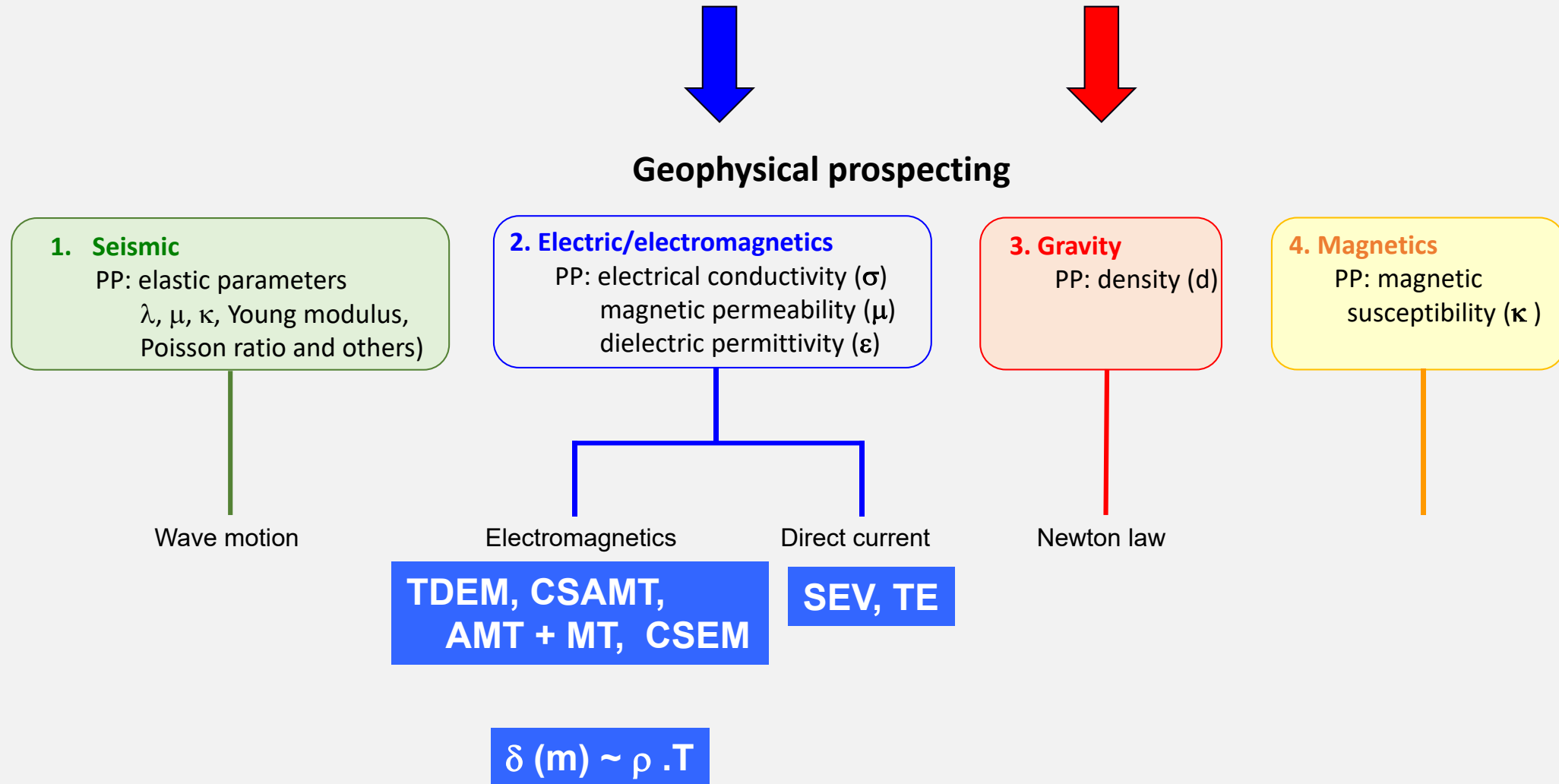
- Objetivos
- Estado del arte – ventajas y desventajas de los distintos métodos geofísicos en exploración de salmueras
- Estado del arte - Kit multifísica efectivo
- Direcciones futuras
- Conclusiones

# Prospección geofísica de salares

## Geophysical prospecting



# Prospección geofísica de salares

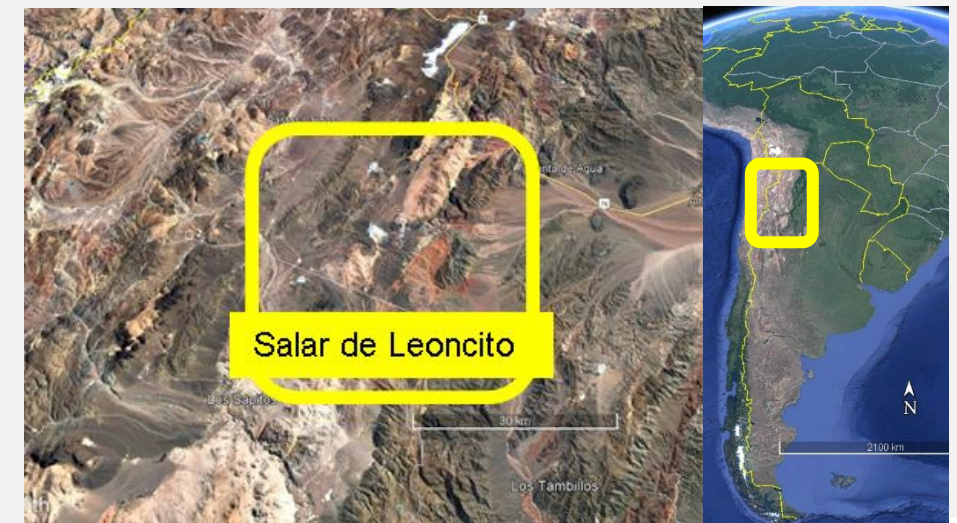


r = resistividad eléctrica (ohm-m)  
 T = periodo en segundos

Skin depth

$$\delta = \left(2 \frac{\rho}{\mu \omega}\right)^{1/2} \cong 503 \left(\frac{\rho}{f}\right)^{1/2}$$

# Prospección geofísica de salares



# Prospección geofísica de salares

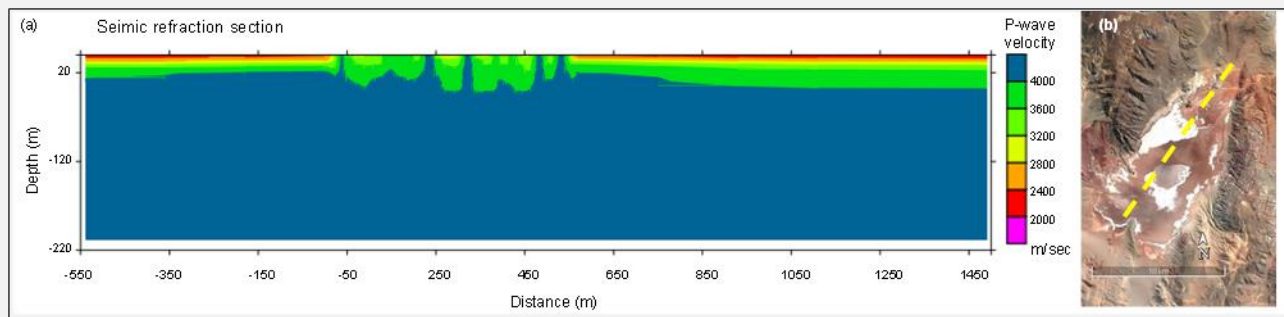
| GEOPHYSICAL RESPONSE IN LITHIUM EXPLORATION - SALT FLATS |                          |                          |                      |                         |                 |                |                                                                                                           |
|----------------------------------------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------|-------------------------|-----------------|----------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Methods                                                  |                          | Sensitivity to structure | Sensitivity to fluid | Depth of Investigation* | Field operation | Dimensionality | Main application                                                                                          |
| Seismic Methods                                          | Refraction seismic       | ++                       | -                    | Shallow                 | +               | 2D, 3D         | Lithology - Risk with high velocities halites                                                             |
|                                                          | Reflection Seismic       | ++                       | -                    | Deep                    | -               | 2D, 3D         | Basement and structure                                                                                    |
|                                                          | DC - SEV                 | ~                        | +                    | Shallow                 | +               | 1D             | Detect contact fresh water - brine, detect first conductive layer mapping                                 |
| Electric (DC) /                                          | DC - TE                  | ++                       | ++                   | Shallow                 | +               | 2D, 3D         | Detect freshwater-brine contacts in environments that present lateral variation (fans and stratification) |
| Electromagnetic (EM) methods                             | EM (TEM)                 | -                        | ++                   | Shallow                 | ++              | 1D             | Detect contact freshwater/brine - First conductive layer mapping                                          |
|                                                          | EM (CSAMT)               | ~                        | +                    | Shallow                 | +               | 2D             | Ultrashallow mapping - first conductive layer mapping                                                     |
|                                                          | EM (full tensor AMT+ MT) | ++                       | ++                   | shallow to deep         | +               | 2D,3D          | Structure and fluid; <u>lateral variation</u> ; attributes                                                |
| Potential Methods                                        | Gravity                  | ++                       | -                    | shallow to deep         | ++              | 2D,3D          | Structure and Basement                                                                                    |
|                                                          | Magnetics                | ++                       | -                    | shallow to deep         | ++              | 2D,3D          | ~ Magnetic~ Basement (metamorphic, igneous)                                                               |

Curcio, PDAC, Toronto, 2025

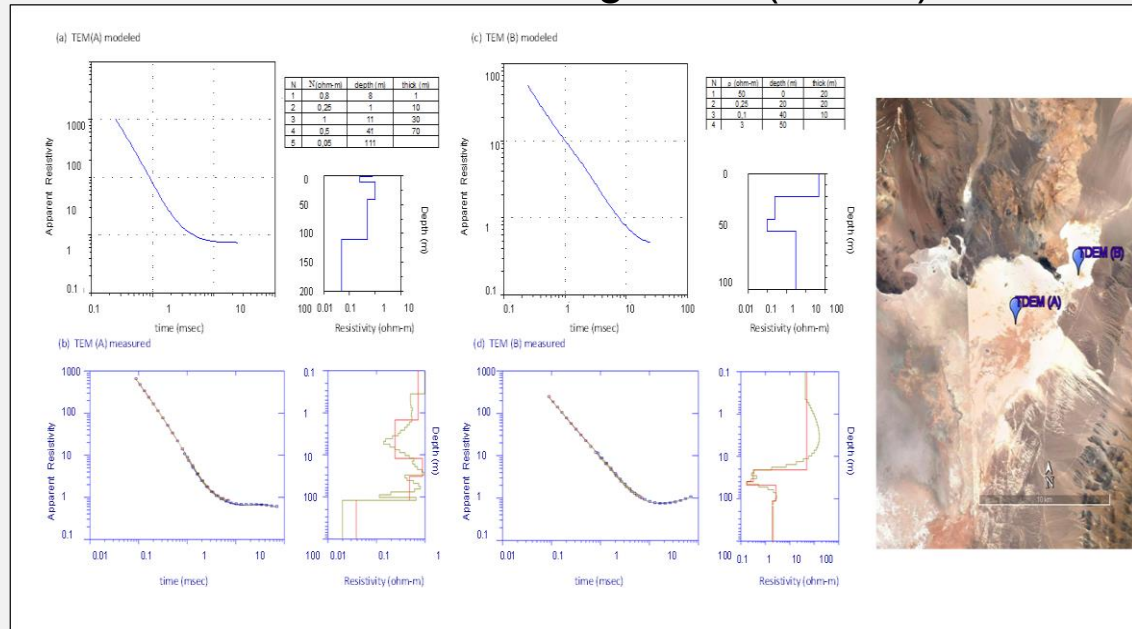
# Prospección geofísica de salares

## Tecnologías 'descartadas'

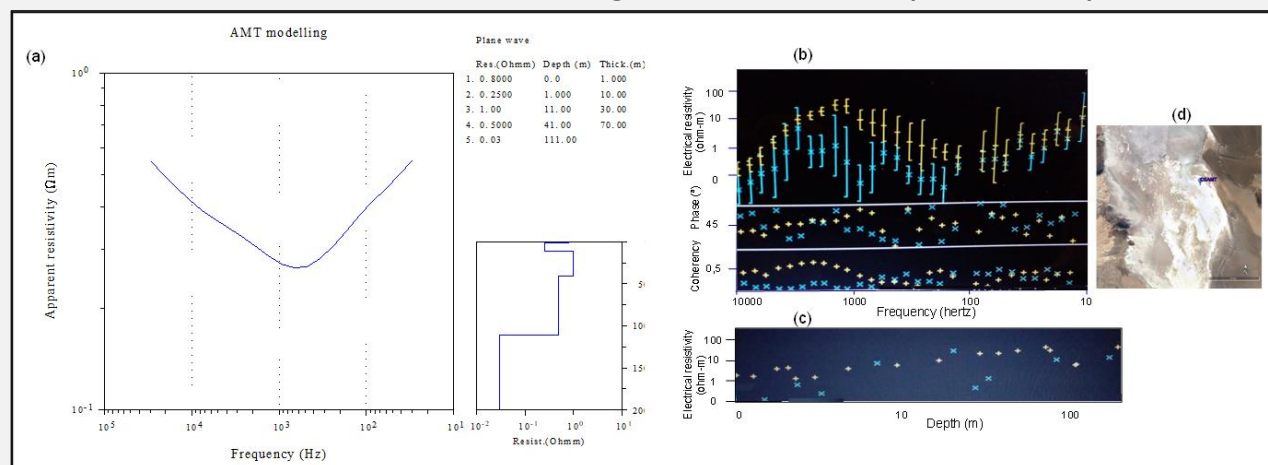
### Sísmica de Refracción



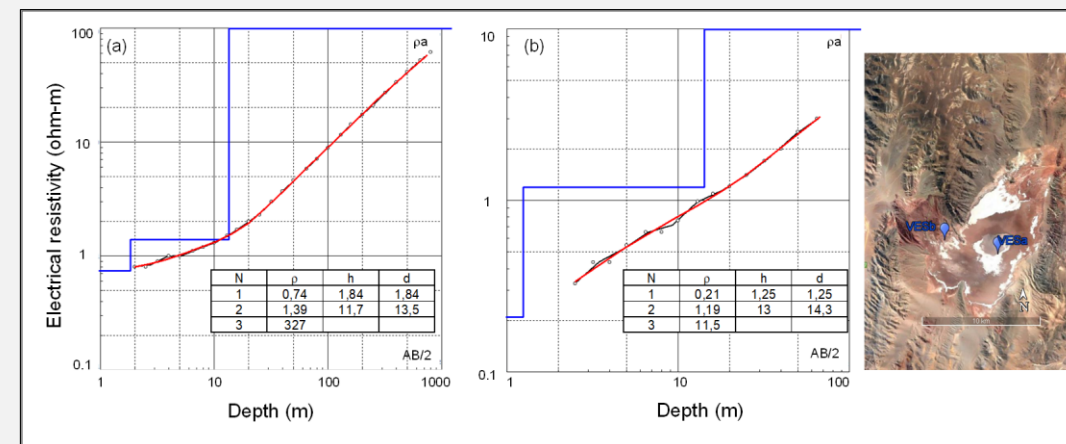
## Time domain electromagnetics (TDEM)



## Controlled Source AudioMagnetotellurics (CSAMT)



## Sondeo eléctrico vertical (SEV)



# Exploración Geofísica de Litio

## Estado del arte, nuevos paradigmas y direcciones futuras

### 1. Agenda

- Objetivos
- Estado del arte – ventajas y desventajas de los distintos métodos geofísicos en exploración de salmueras
- Estado del arte - Kit multifísica efectivo
- Direcciones futuras
- Conclusiones

# Prospección geofísica de salmueras

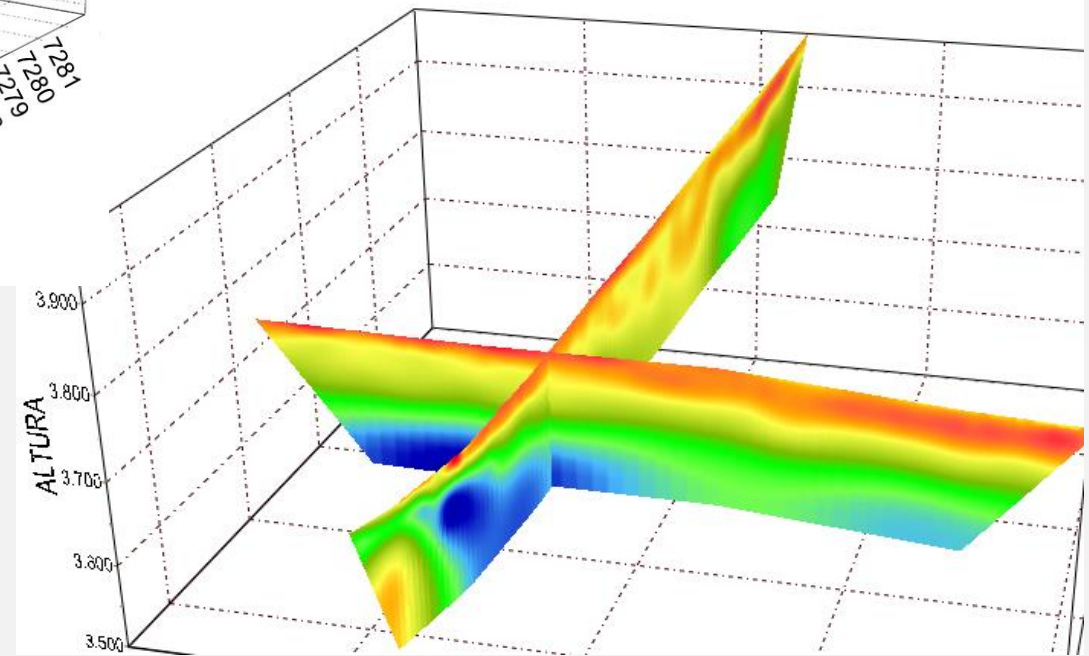
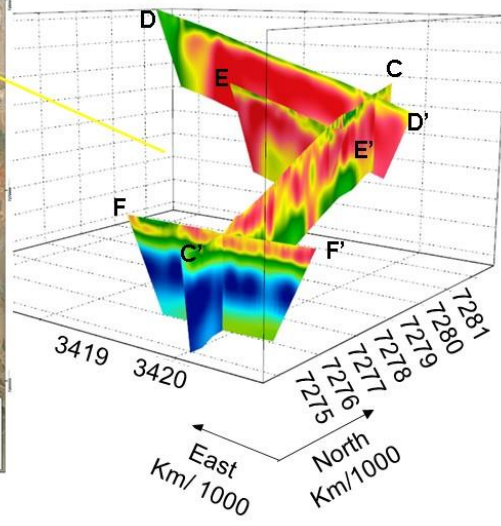
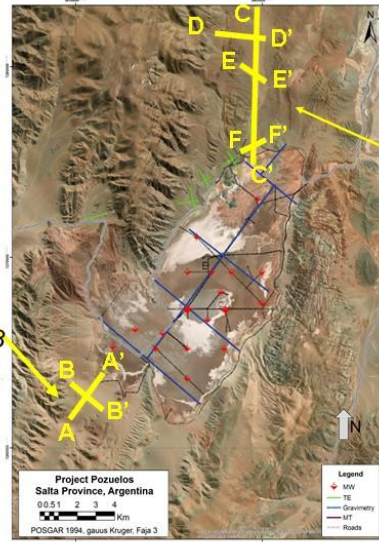
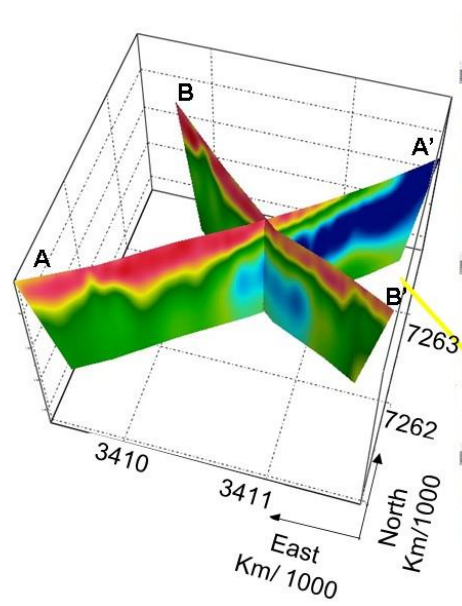
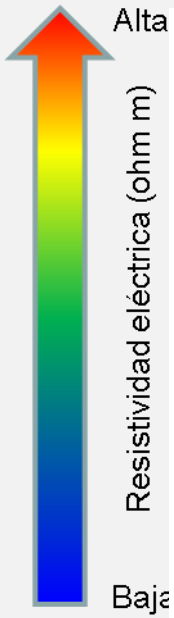
## Tecnologías 'eficientes' – Tomografía eléctrica

(a) ERT acquisition



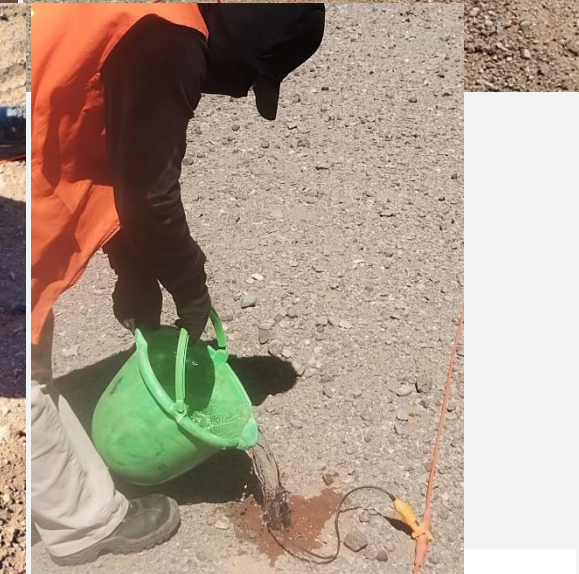
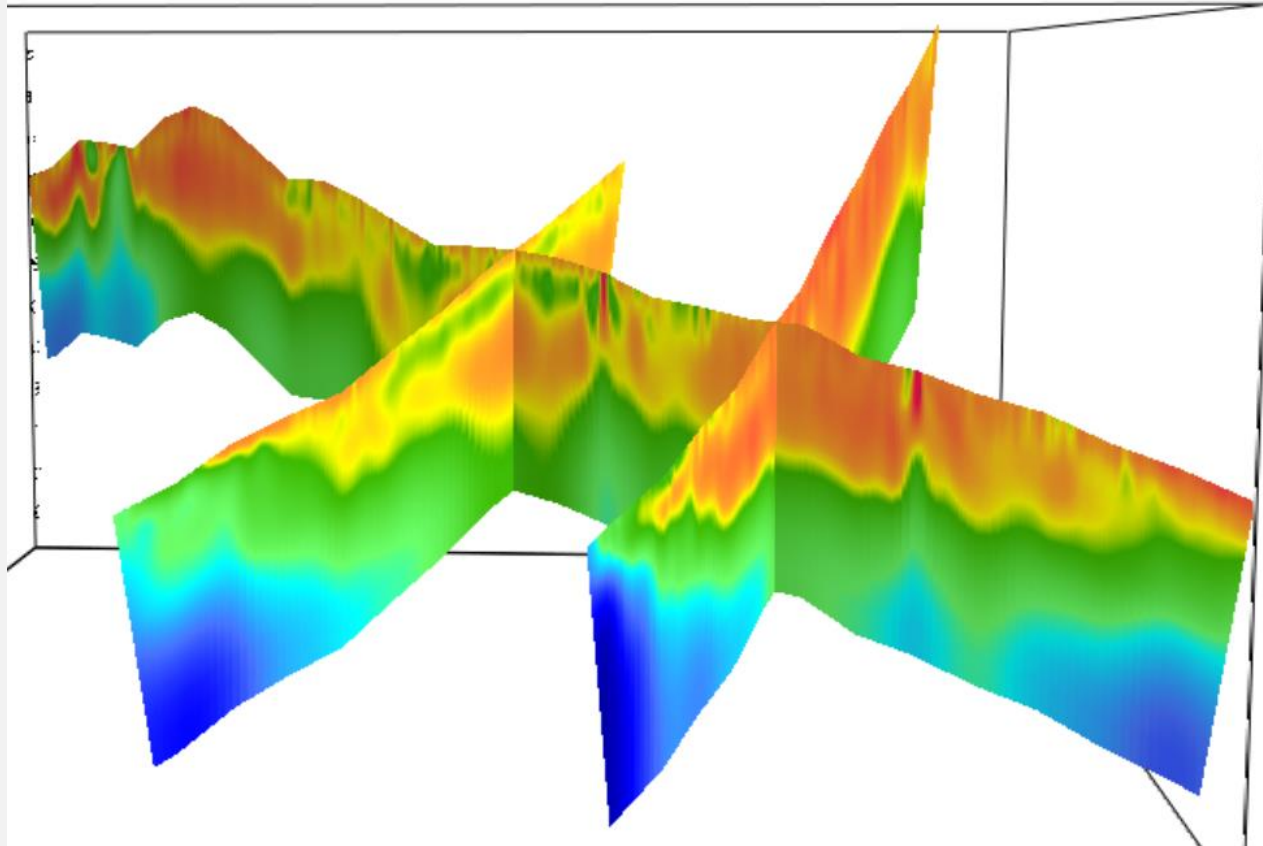
# Prospección geofísica de salmueras

## Tecnologías 'eficientes' – Tomografía eléctrica



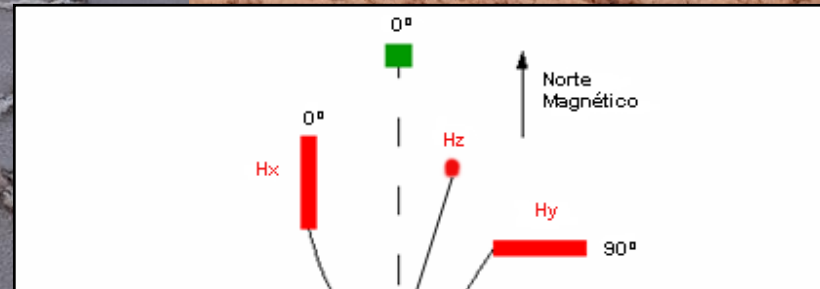
# Prospección geofísica de salmueras

## Tecnologías 'eficientes' – Tomografía eléctrica



# Prospección geofísica de salmueras

## Tecnologías 'eficientes' – Magnetotelúrica full tensor (AMT + MT)

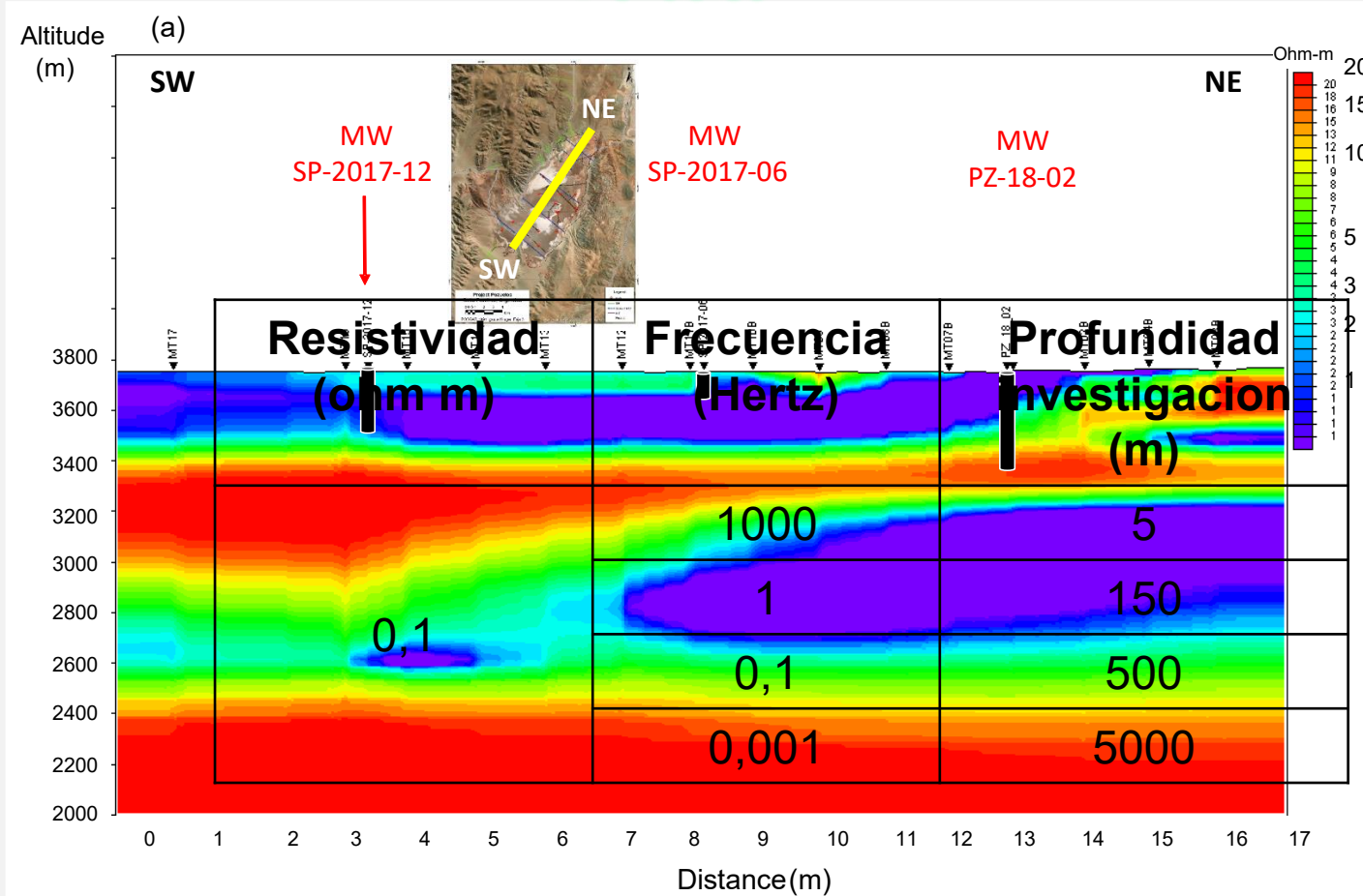


Cortesía de Proingeo SA

# Prospección geofísica de salmueras

## Tecnologías 'eficientes' – Magnetotelúrica full tensor (AMT + MT)

### Pozuelos



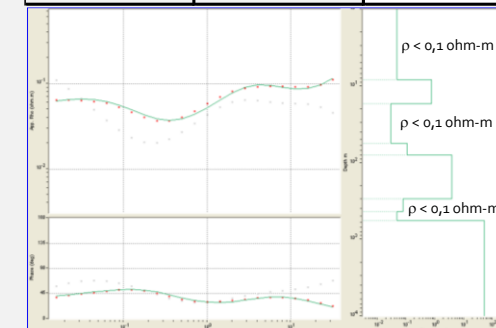
| Validation 1 | Basement | Produces brine?          |
|--------------|----------|--------------------------|
| SP-2017-06   | N/A      | in all column (115 m)    |
| MT11         | 348 m    | conductive in all column |
| Validation 2 | Basement | in all column (126 m)    |
| SP-2017-12   | N/A      | in all column (126 m)    |
| MT16         | 312 m    | conductive in all        |
| Validation 3 | Basement | in all column            |
| Pz - 18-02   | 348 m    | in all column            |
| MT06         | 290 m    | conductive in all        |
| Validation 4 | Basement | in all column            |
| DDH-400      | 319 m    | in all column            |
| MT27         | 381 m    | in all column            |

¿Por qué MT es un método eficiente?

$$\delta (m) \sim \rho \cdot T$$

$$\delta = \left(2 \frac{\rho}{\mu \omega}\right)^{1/2} \approx 503 \left(\frac{\rho}{f}\right)^{1/2}$$

(d)

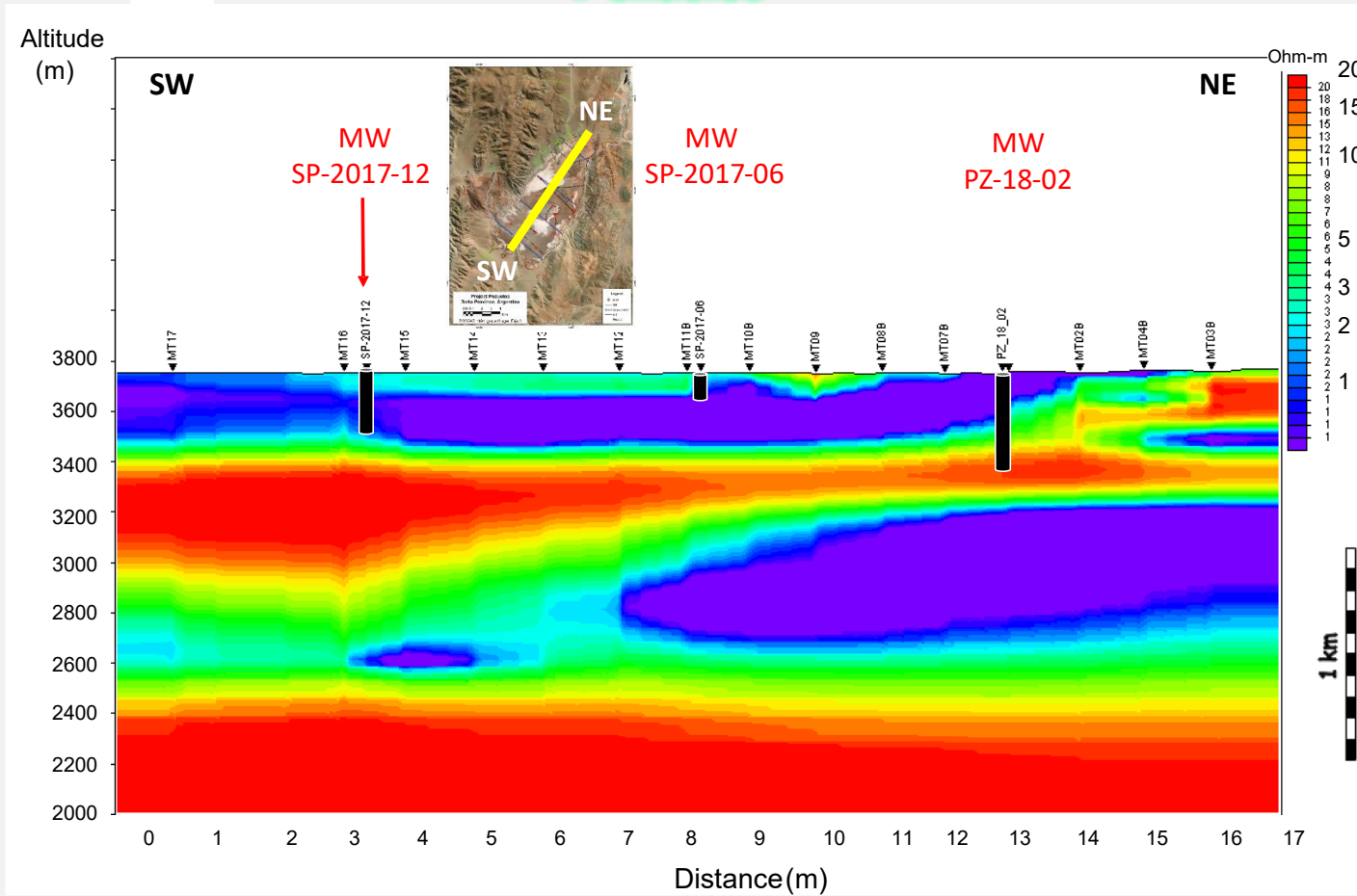


Curcio et al., An effective multiphysics toolkit for Lithium prospecting: From geophysics to the static reservoir model in Pozuelos salt flat, Argentina, Interpretation, 2022.

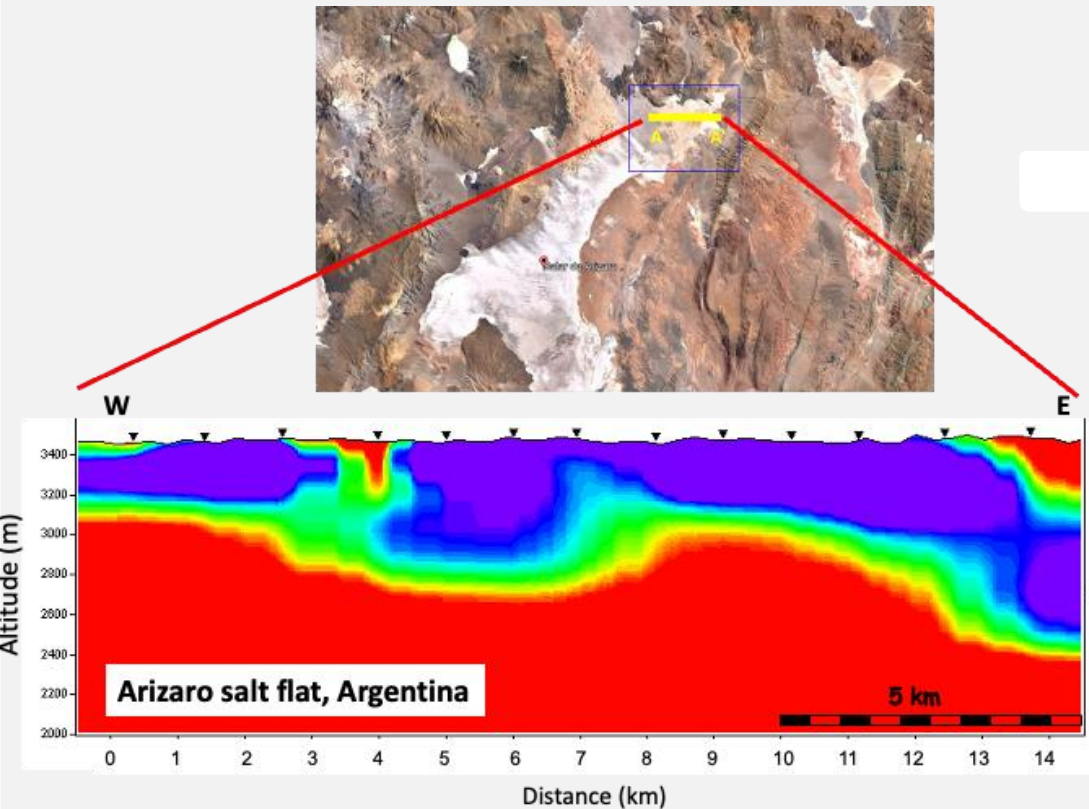
# Prospección geofísica de salmueras

## Tecnologías 'eficientes' – Magnetotelúrica full tensor (AMT + MT)

### Pozuelos



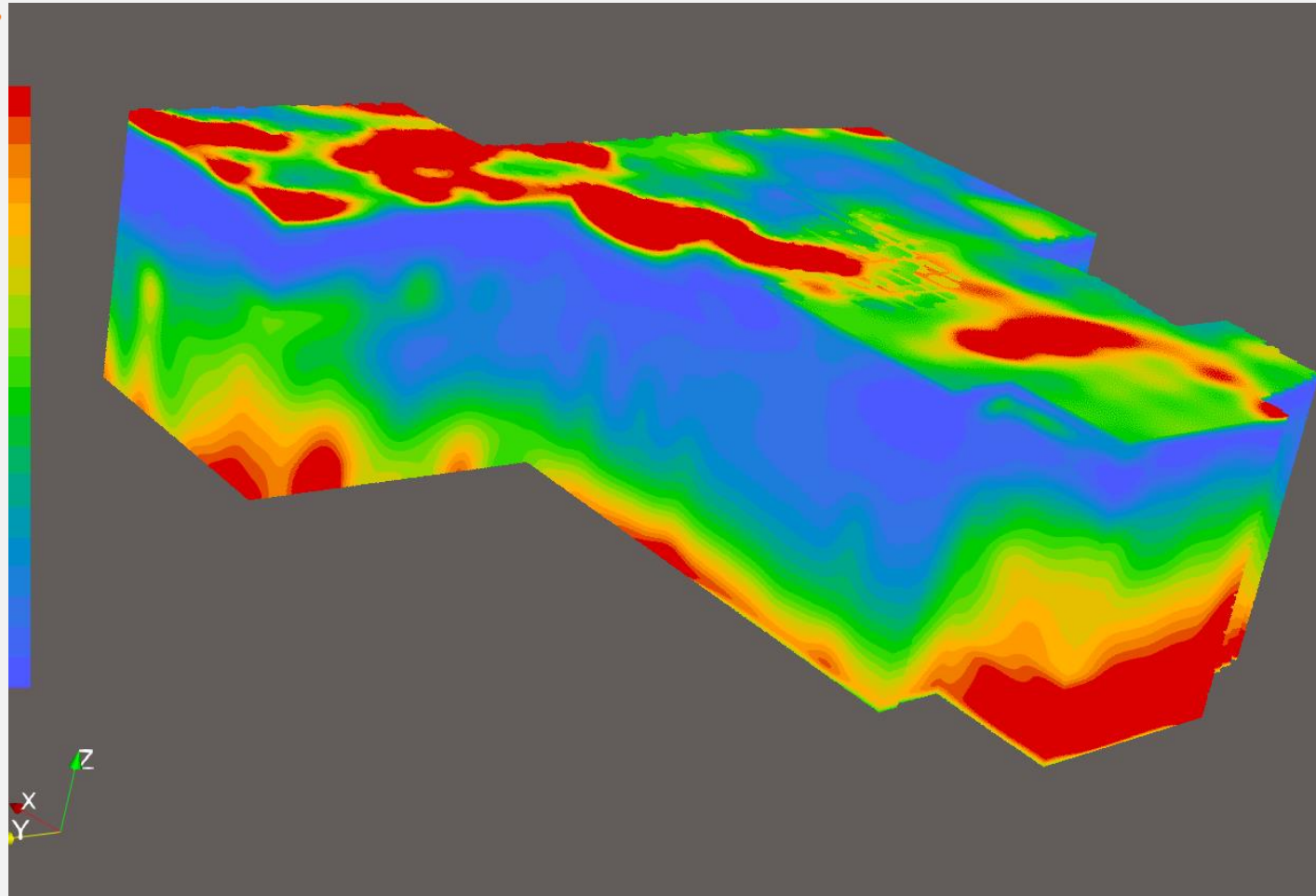
### Arizaro



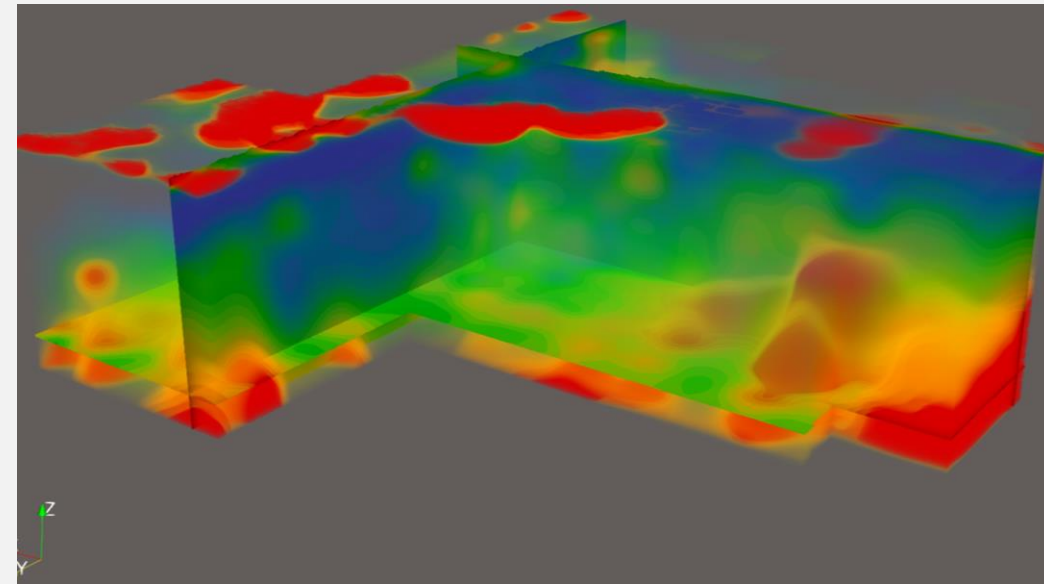
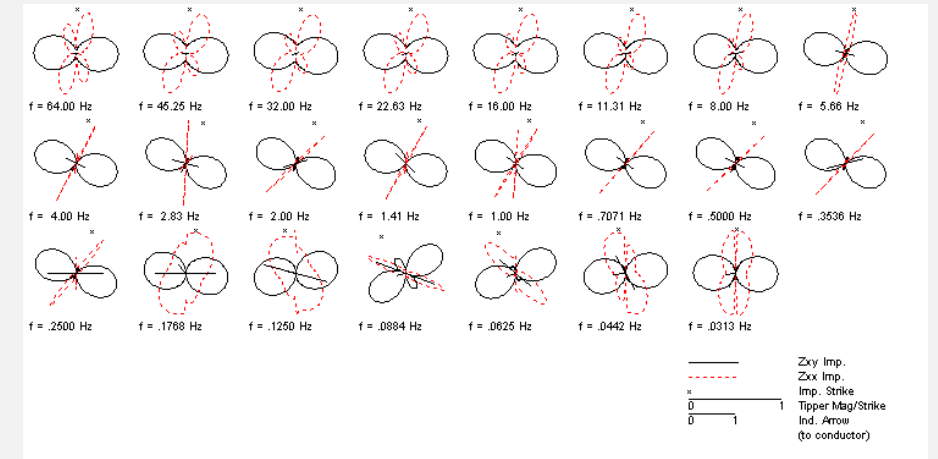
Application of Electromagnetic Methods for Reservoir Monitoring with Emphasis on Carbon Capture, Utilization, and Storage, 2023, C. Barajas-Olalde, César, A. Donald, A. Curcio, S. Davydycheva, R. Klapperich, Y. Martinez, A. Paembonan, W. Peck, K. Strack, P. Souprios, Minerals, 13. 10.3390/min13101308.

# Prospección geofísica de salmueras

## Tecnologías 'eficientes' – Magnetotelúrica full tensor (AMT + MT)



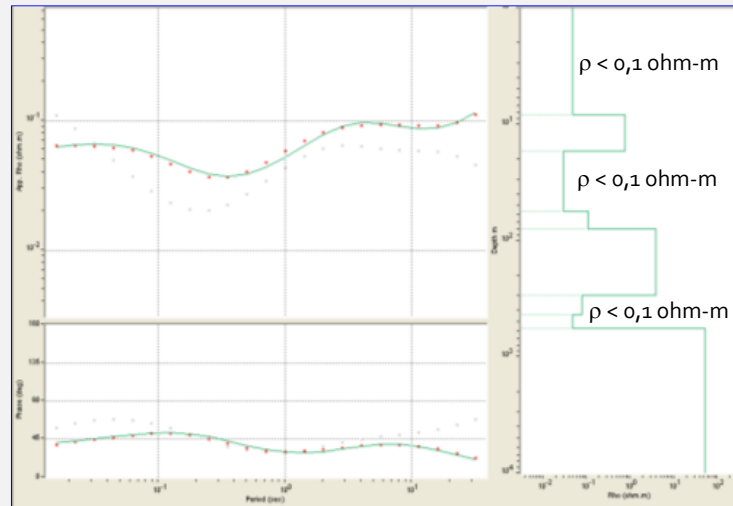
Modelo 3D AMT+MT



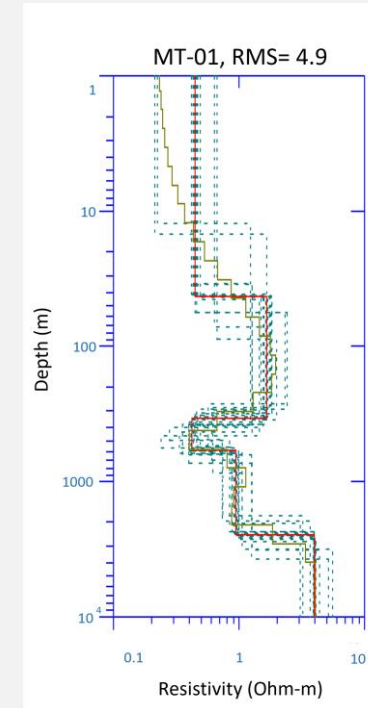
# Prospección geofísica de salares

## Tecnologías 'eficientes' – Magnetotelúrica full tensor (AMT + MT)

### Argentina



### Saudi Arabia

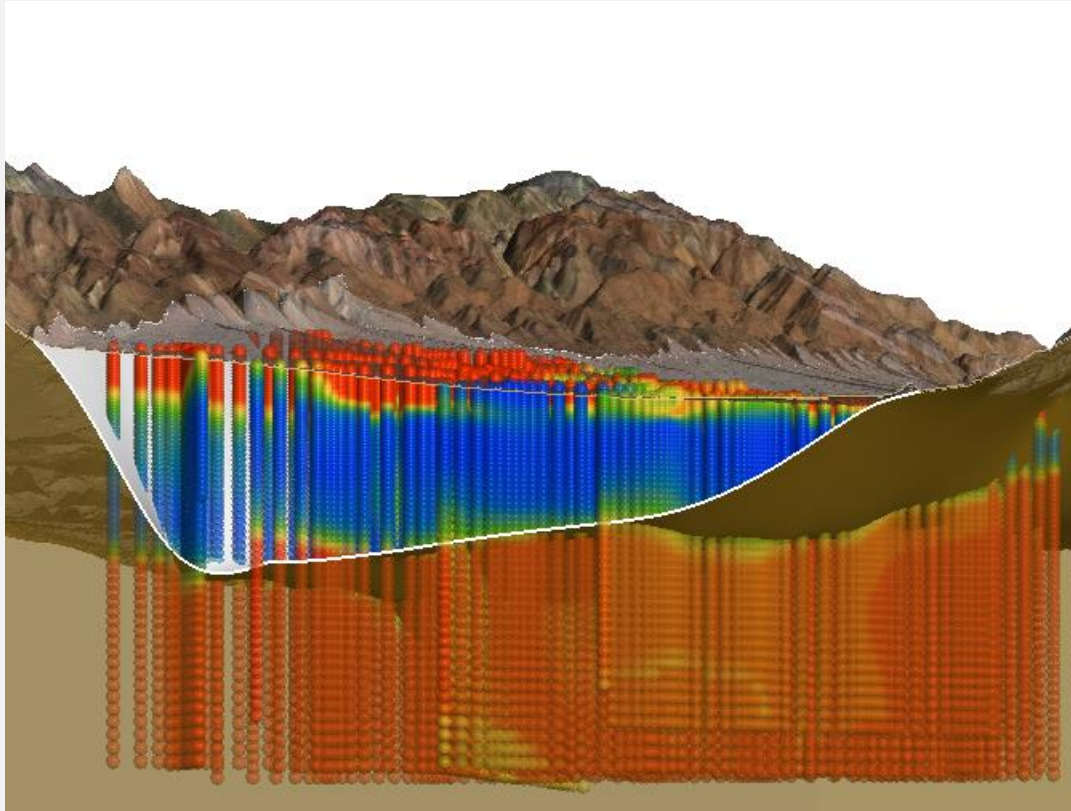


Application of Electromagnetic Methods for Reservoir Monitoring with Emphasis on Carbon Capture, Utilization, and Storage, 2023, C. Barajas-Olalde, César, A. Donald, A. Curcio, S. Davydycheva, R. Klapperich, Y. Martinez, A. Paembonan, W. Peck, K. Strack, P. Souprios, Minerals, 13. 10.3390/min13101308.

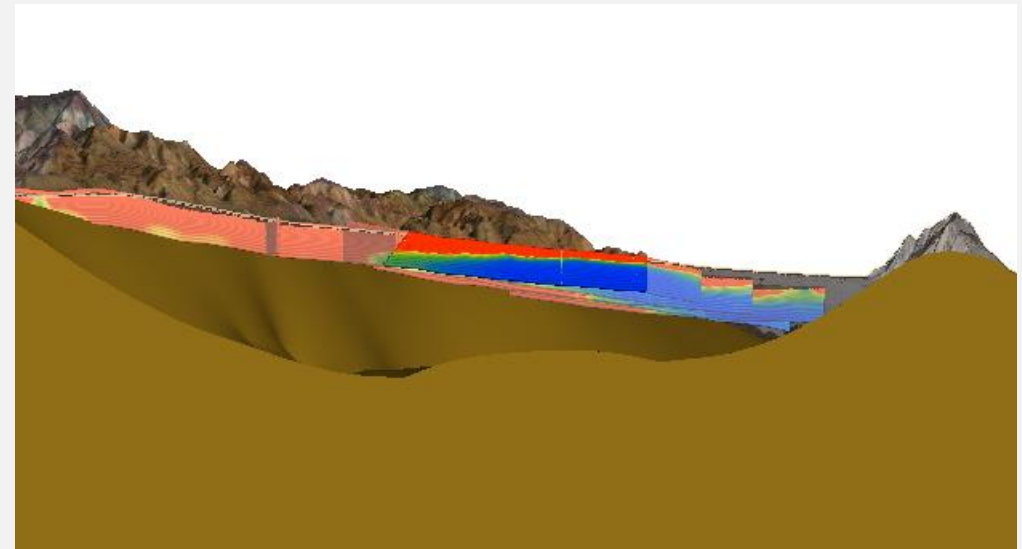
# Prospección geofísica de salares

Tecnologías 'eficientes' – TE + Magnetotelúrica full tensor (AMT + MT)

Magnetotelúrica full tensor (AMT + MT)

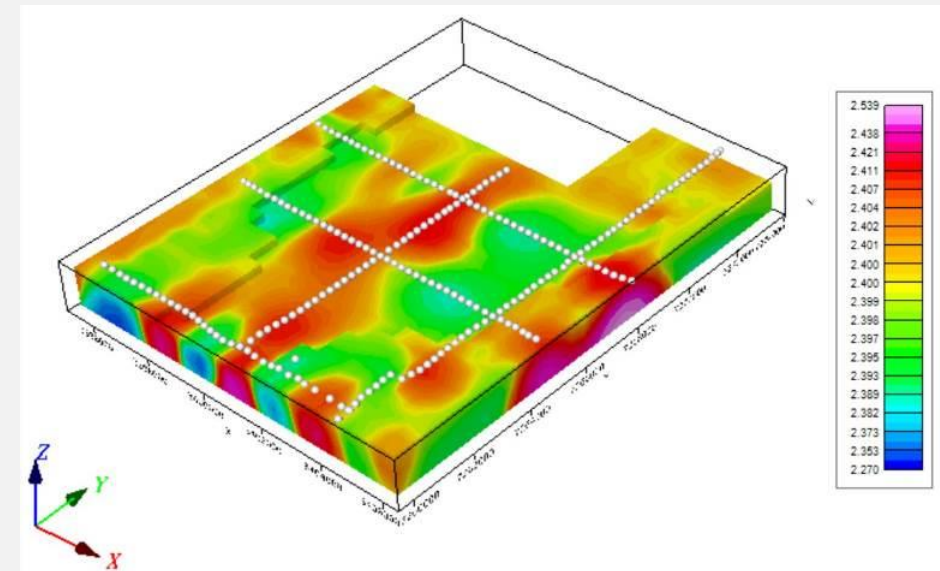
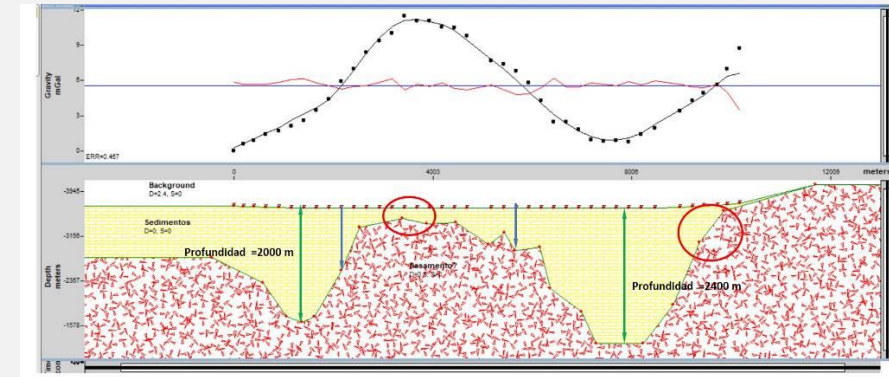
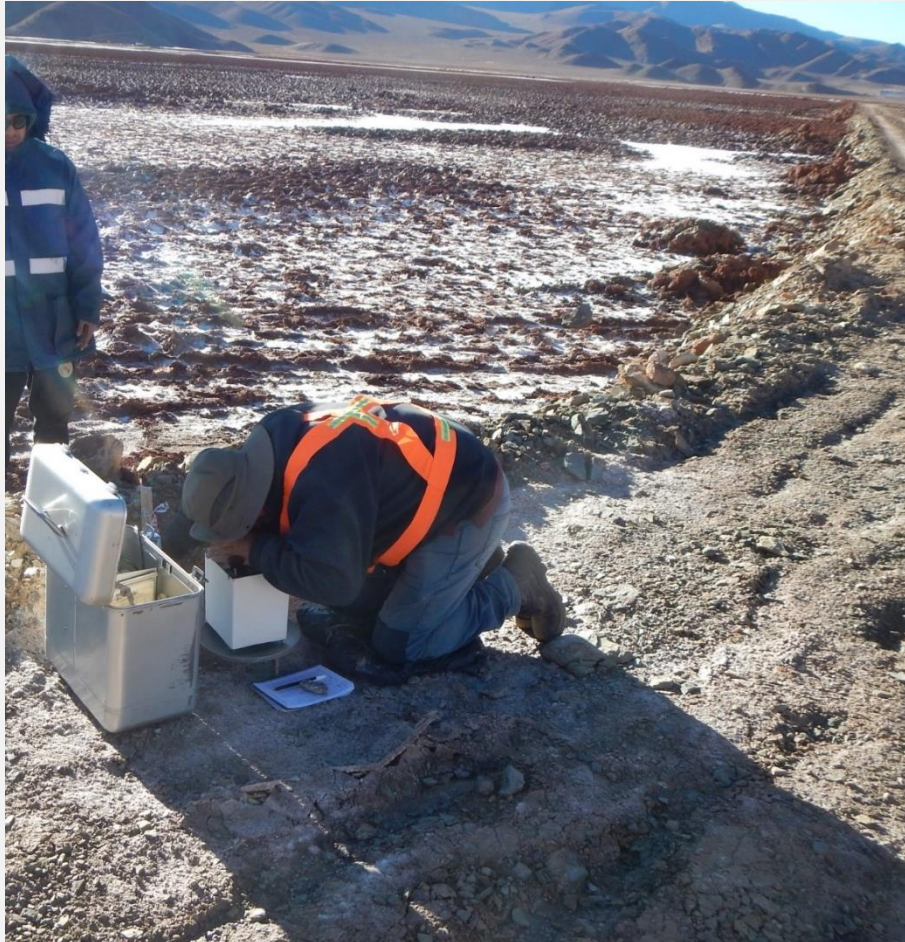


TE



# Prospección geofísica de salares

## Tecnologías 'eficientes' – Gravimetria



Curcio et al., An effective multiphysics toolkit for Lithium prospecting: From geophysics to the static reservoir model in Pozuelos salt flat, Argentina, Interpretation, 2022.

# Prospección geofísica de salares

## Tecnologías 'eficientes' – Gravimetria

### Pozuelos

➤ Interpretación cuantitativa y cualitativa

➤ Densidad 2.40 g/cm<sup>3</sup>

➤ Maximos estructurales y minimos estructurales

➤ Fallas / contactos (líneas blancas)

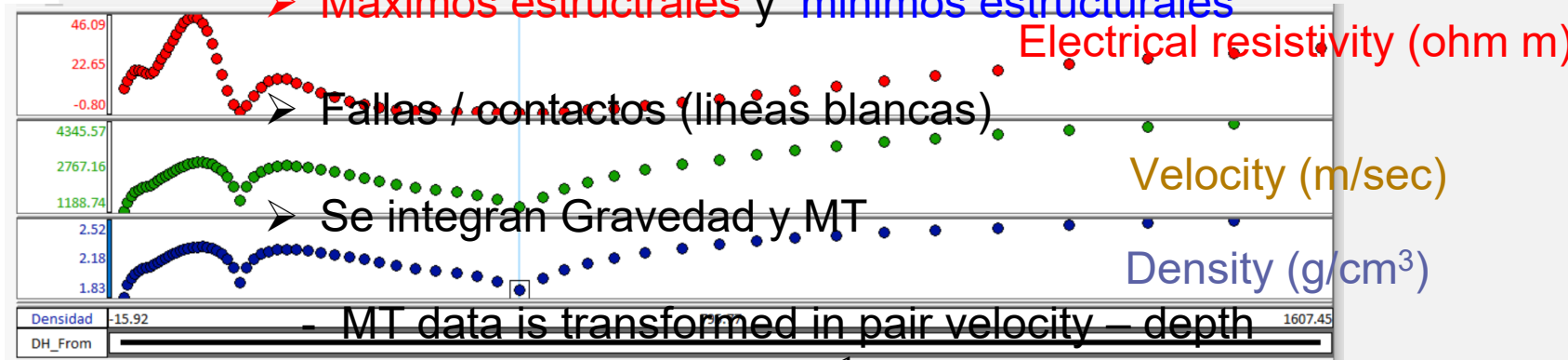
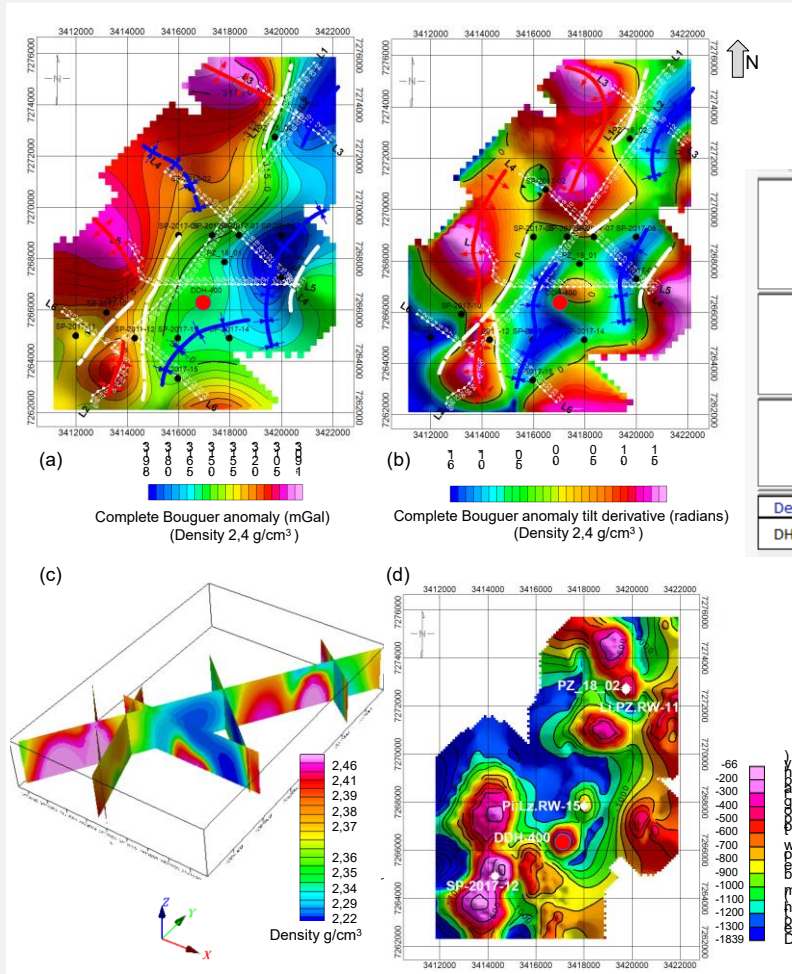
➤ Se integran Gravedad y MT

- MT data is transformed in pair velocity – depth

$$V_p = 2.888 \left( \frac{\rho_t}{\rho_w} z \right)^{\frac{1}{6}} \quad (\text{Hacikoylu et.al, 2006})$$

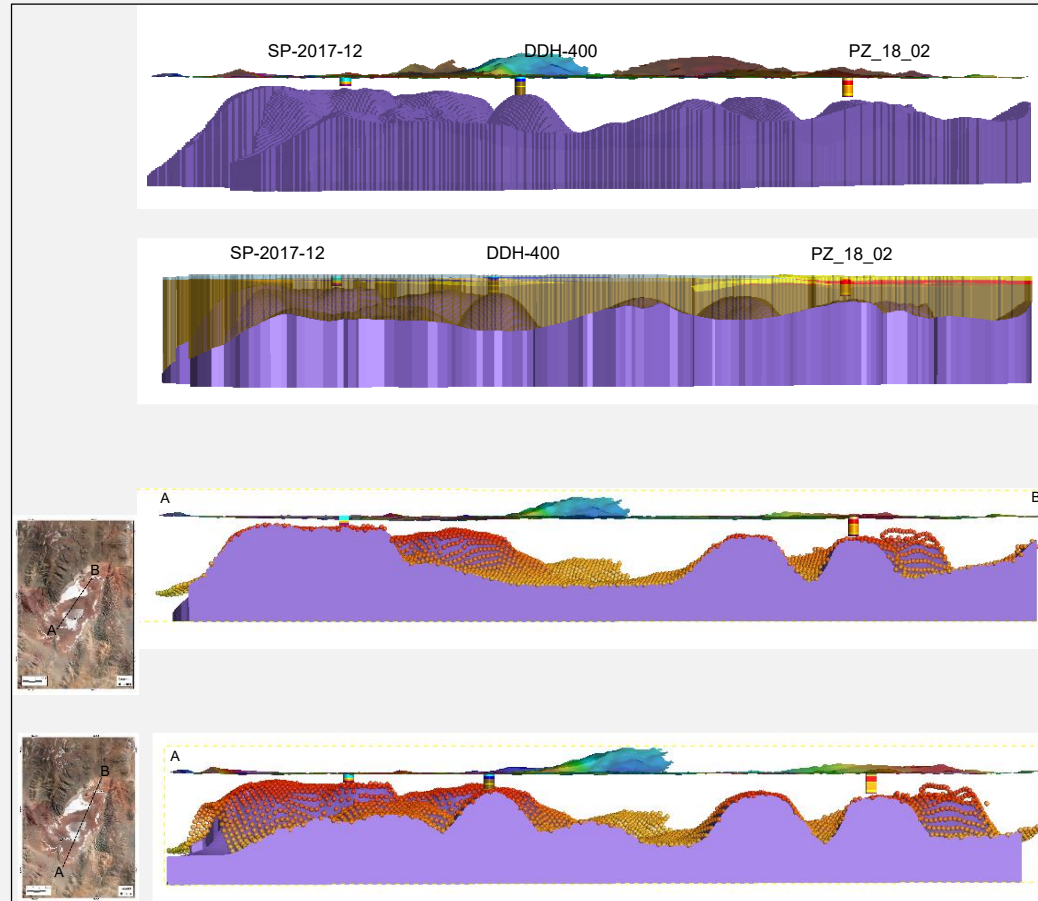
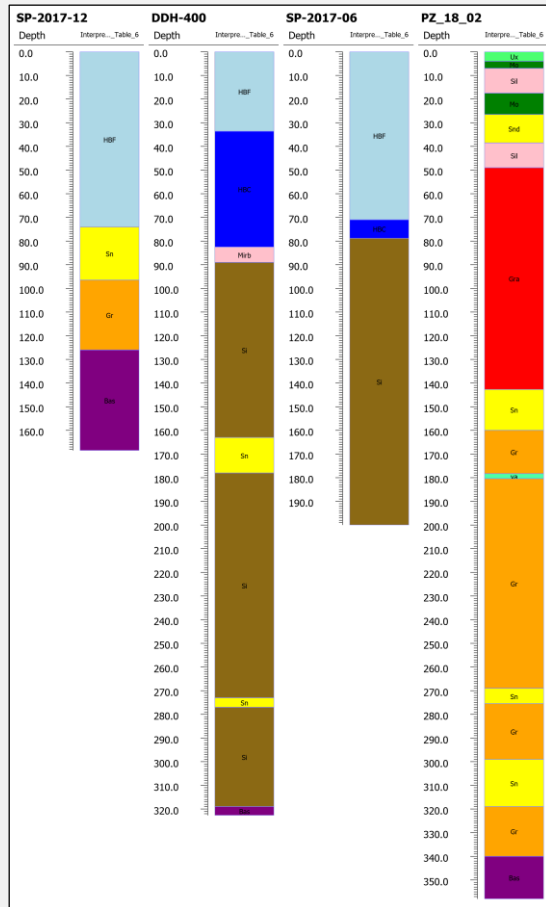
- Output is transformed through density – velocity

$$d = 0.31 (V_p)^{0.25} \quad (\text{Gardner, 1974})$$



# Modelo estático de reservorios

## Pozuelos



- Filled salt flat: 1.2 gr/cm<sup>3</sup>, conductive
- Deepest well: 470 m
- Neutron - density logs
- Deepest basement: 900 m
- 8 Lithofacies;

1. HBF, Fractured-banded halite

2. HBC, Massive halite

3. Gr, Lower matrix-supported gravel

4. Gra, Upper clast-supported gravel

5. Sn, Lower sand

6. Snd, Upper sand

7. Si, Silt

8. Bas, Basement.

# Exploración Geofísica de Litio

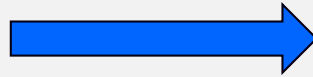
## Estado del arte, nuevos paradigmas y direcciones futuras

### Agenda

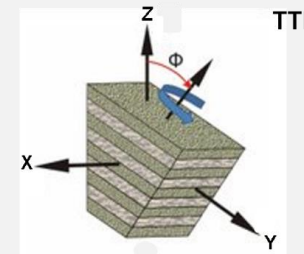
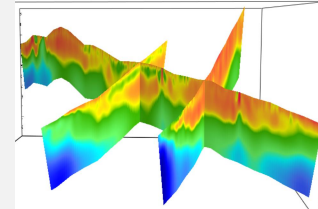
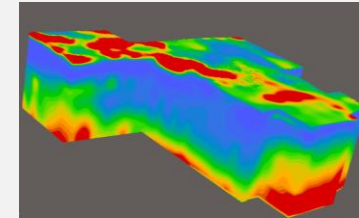
- Objetivos
- Estado del arte – ventajas y desventajas de los distintos métodos geofísicos en exploración de salmueras
- Estado del arte - Kit multifísica efectivo
- **Direcciones futuras**
- Conclusiones

## Direcciones futuras - discusiones

- Basamento
- Espesores netos
- Cuñas – detalle estratigráfico
- Exploración de agua profunda
- Conectividad entre salares
- Complejidad estructural
- Variación temporal de los modelos
- Direcciones de flujo de fluido  
Direcciones preferenciales de fracturamiento



- Calibraciones con información de pozo
- Integraciones multifísica
- Sísmica Pasiva – sísmica de reflexión somera
- Densificación de relevamientos
- Modelos 3D
- Time lapse (EM)
- Determinación de anisotropía



$$\underline{\underline{\sigma}}^{TTI} = R^T \begin{bmatrix} \sigma_{//} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{//} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{\perp} \end{bmatrix} R$$

# Exploración Geofísica de Litio

## Estado del arte, nuevos paradigmas y direcciones futuras

### Agenda

- Objetivos
- Estado del arte – ventajas y desventajas de los distintos métodos geofísicos en exploración de salmueras
- Estado del arte - Kit multifísica efectivo
- Direcciones futuras
- Conclusiones

Gracias!

Salar de Rio Grande, Argentina