

La investigación reportada en esta tesis es parte de los programas de investigación del CICESE (Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, B.C.).

La investigación fue financiada por el CONACYT (Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología).

Todo el material contenido en esta tesis está protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México). El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo o titular de los Derechos Autor.

CICESE © 2022, Todos los Derechos Reservados, CICESE

# Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California



---

## Maestría en Ciencias en Ciencias de la Tierra con orientación en Geofísica Aplicada

---

### Exploración hidrogeológica en las inmediaciones del lago de Cuitzeo, Michoacán

Tesis

para cubrir parcialmente los requisitos necesarios para obtener el grado de  
Maestro en Ciencias

Presenta:

**Ivonne Janette Cruz Aquino**

Ensenada, Baja California, México

2022

Tesis defendida por

**Ivonne Janette Cruz Aquino**

y aprobada por el siguiente Comité

---

Dr. Diego Ruiz Aguilar

Director de tesis

Dr. Carlos Francisco Flores Luna

Dr. Eduardo Emilio Sánchez León

Dr. José Gómez Valdés



---

Dr. Javier Alejandro González Ortega

Coordinador del Posgrado en Ciencias de la Tierra

---

Dr. Pedro Negrete Regagnon

Director de Estudios de Posgrado

Resumen de la tesis que presenta Ivonne Janette Cruz Aquino como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Ciencias de la Tierra con orientación en Geofísica Aplicada.

### **Exploración hidrogeológica en las inmediaciones del lago de Cuitzeo, Michoacán**

Resumen aprobado por:

---

Dr. Diego Ruiz Aguilar

Director de tesis

La zona de Araró forma parte del acuífero Morelia-Queréndaro y se ha reportado un déficit de agua en dicho acuífero. Debido a ello, es de gran importancia el estudio de las condiciones actuales del acuífero de Araró para proveer de este vital recurso a la población. Además, se ha reportado la presencia de manifestaciones y alteraciones hidrotermales en el área que resultan de interés, debido al potencial geotérmico existente en la zona. En este sentido, los métodos electromagnéticos son herramientas muy utilizadas en la exploración de recursos hídricos subterráneos debido a que son sensibles a los cambios de conductividad eléctrica de las rocas, propiedad que se puede asociar a la presencia de fluidos. Y, dada la importancia de conocer las condiciones de los acuíferos en áreas geotérmicas y la escasa información de las condiciones hidrogeológicas actuales del acuífero somero situado en las inmediaciones de Araró, se realizó un estudio geofísico utilizando el método Transitorio Electromagnético (TEM) para así caracterizar la geometría del acuífero. Para ello, se realizaron 30 sondeos TEM distribuidos por toda la zona de estudio y se realizaron inversiones 1D empleando las técnicas de Marquardt y Occam. Los modelos geoléctricos se interpretaron correlacionando cuatro unidades hidrogeológicas: la primera unidad corresponde a la zona no saturada, con resistividades de 6 a 25  $\Omega\text{m}$ ; la segunda unidad, con resistividades de 25 a 95  $\Omega\text{m}$  se asocia al acuífero; la tercera unidad con resistividades  $< 6 \Omega\text{m}$  es la asociada a la capa arcillosa, producto de la alteración hidrotermal que puede estar actuando como un acuitardo, y la cuarta unidad se asocia al basamento del acuífero, cuyas resistividades son  $> 100 \Omega\text{m}$ . Para conocer las características del agua, se midieron parámetros físico-químicos de muestras de agua extraídas de pozos y norias del área de estudio. Con lo anterior, se encontró una relación entre la resistividad y algunos parámetros como sólidos disueltos totales, conductividad eléctrica y temperatura, indicando que altos valores de estos parámetros se sitúan en las zonas de baja resistividad.

**Palabras clave:** Acuífero, TEM, alteraciones hidrotermales, resistividad, conductividad eléctrica, temperatura

Abstract of the thesis presented by Ivonne Janette Cruz Aquino as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Master of Science with orientation in Applied Geophysics.

### **Hydrogeological exploration in the mediations of Lake Cuitzeo, Michoacan**

Abstract approved by:

---

Dr. Diego Ruiz Aguilar

Thesis Director

The Araro area is part of the Morelia-Querendaro aquifer and a water deficit has been reported in that aquifer. Due to this, it is of great importance to study the current conditions of the Araró aquifer to provide this vital resource to the population. In addition, the presence of hydrothermal manifestations and alterations has been reported in the area that are of interest, due to the existing geothermal potential in the area. In this sense, electromagnetic methods are widely used tools in the exploration of underground water resources because they are sensitive to changes in the electrical conductivity of rocks, a property that can be associated with the presence of fluids. Given the importance of knowing the conditions of the aquifers in geothermal areas and the scarce information on the current hydrogeological conditions of the aquifer located in the vicinity of Araro, a geophysical study was carried out using the Transient Electromagnetic Method (TEM) in order to characterize the geometry of the shallow aquifer. For this, 30 TEM surveys spatially distributed throughout the study area were carried out and 1D inversions were performed using the Marquardt and Occam techniques. The geoelectric models are interpreted by correlating four hydrogeological units: the first unit corresponds to the unsaturated zone, with resistivities from 6 to 25  $\Omega\text{m}$ ; the second unit, with resistivities from 25 to 95  $\Omega\text{m}$ , is associated with the aquifer; the third unit with resistivities  $< 6 \Omega\text{m}$ , is associated with the clay layer, a product of hydrothermal alteration that may be acting as an aquitard, and the fourth unit is associated with the basement of the aquifer, whose resistivities are  $> 100 \Omega\text{m}$ . Also, physical-chemical parameters of water samples extracted from wells and waterwheels located in the study area were measured, to know the characteristics of the water. A relationship was found between resistivity and some parameters such as Total Dissolved Solids, Electrical Conductivity and Temperature, with high values of all these parameters located in low resistivity areas.

**Keywords: Aquifer, TEM, hydrothermal alterations, resistivity, electric conductivity, temperature**

## **Dedicatoria**

**A mi hermana Arlette.**

## Agradecimientos

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE), por permitirme realizar mis estudios de posgrado, especialmente al Departamento de Ciencias de la Tierra por el aprendizaje adquirido y por las facilidades otorgadas durante mi estancia.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT) por brindarme el apoyo económico para realizar mis estudios de maestría.

A mi asesor, el Dr. Diego Ruiz Aguilar por brindarme la oportunidad de aceptarme como su estudiante, así como por el tiempo otorgado y las enseñanzas que me compartió en todo el proceso de elaboración de esta tesis. También agradezco que me haya considerado en las diferentes campañas de campo, lo cual me fue de ayuda para adquirir experiencia en campo.

A los miembros de comité de Tesis: El Dr. Carlos Francisco Flores Luna, Dr. José Gómez Valdés y Dr. Eduardo Emilio Sánchez León, por sus valiosas aportaciones durante mis avances de tesis, y por las observaciones realizadas en este escrito, las cuales me ayudaron a mejorarlo.

Al IPICYT, por la facilidad de proporcionarme el equipo para la adquisición de los datos de esta tesis, especialmente al M.C. David Ernesto Torres Gaytán, por el apoyo en campo. También agradezco a Evelyn; Laura; Nelly; Fidel, mejor conocido como Pilli y Sebastián, por ayudarme en la adquisición de mis datos.

A mi familia que siempre estuvo al pendiente. A mis padres y hermanos por brindarme su apoyo, amor y soporte en todo momento.

A mis compañeros de Ciencias de la Tierra por el compañerismo y los momentos compartidos, especialmente a Cristal Méndez, Maribel Reyes, Moisés Guzmán y a mi amigo de varios años, Eduardo López, por todo el apoyo recibido de ustedes y por su valiosa amistad.

A Erick García por la amistad que surgió, por las salidas y por los buenos momentos que pasamos en Ensenada, en las diferentes campañas de campo y en lo deportivo.

A mis Profesores de CT por las enseñanzas compartidas, especialmente al Dr. Luis Gallardo y Dr. Alejandro González, por la pasión con la que transmiten el conocimiento.

Al pueblo de México, por su apoyo indirecto en las becas que se nos otorgan y que hace posible que podamos desarrollarnos en el ámbito científico.

## Tabla de contenido

|   | Página |
|---|--------|
| Resumen en español .....                            | ii     |
| Resumen en inglés .....                             | iii    |
| Dedicatoria .....                                   | iv     |
| Agradecimientos .....                               | v      |
| Lista de figuras .....                              | ix     |
| Lista de tablas .....                               | xii    |
| <br>  |        |
| <b>Capítulo 1. Introducción</b>                     |        |
| 1.1. Justificación .....                            | 2      |
| 1.2. Hipótesis .....                                | 3      |
| 1.3. Objetivos .....                                | 3      |
| 1.3.1. Objetivo general .....                       | 3      |
| 1.3.2. Objetivos específicos .....                  | 3      |
| <br>  |        |
| <b>Capítulo 2. Fundamentos Teóricos</b>             |        |
| 2.1. Ecuaciones de Maxwell .....                    | 4      |
| 2.2. Método Transitorio Electromagnético .....      | 5      |
| 2.2.1. Solución para un medio homogéneo .....       | 6      |
| 2.2.2. Resistividad aparente .....                  | 7      |
| 2.2.3. Profundidad de difusión .....                | 8      |
| 2.3. Teoría de inversión .....                      | 8      |
| 2.3.1. Estrategia para problemas no lineales .....  | 10     |
| 2.3.2. Inversión de Marquardt .....                 | 11     |
| 2.3.2.1. Descomposición de Valores Singulares ..... | 12     |
| 2.3.2.2. Importancias .....                         | 13     |
| 2.3.2.3. Modelos equivalentes .....                 | 13     |
| 2.3.3. Inversión de Occam .....                     | 13     |
| <br>  |        |
| <b>Capítulo 3. Zona de estudio</b>                  |        |
| 3.1. Localización .....                             | 15     |
| 3.2. Marco geológico .....                          | 15     |
| 3.2.1. Geología estructural .....                   | 15     |
| 3.2.2. Estratigrafía .....                          | 16     |
| 3.3. Marco hidrogeológico .....                     | 18     |
| 3.4. Estudios previos .....                         | 19     |
| 3.4.1. Estudios geofísicos .....                    | 19     |
| 3.4.2. Estudios geoquímicos .....                   | 22     |
| 3.5. Adquisición de datos .....                     | 23     |
| 3.5.1. Instrumentación del TEM .....                | 23     |

**Capítulo 4. Inversión de Datos**

|  |    |
|--|----|
| 4.1. Inversión 1D . . . . .  | 25 |
| 4.1.1. Datos TEM . . . . .   | 25 |
| 4.1.2. Resultados de la inversión tipo Occam y Marquardt . . . . . | 25 |

**Capítulo 5. Discusión e interpretación de resultados**

|   |    |
|---|----|
| 5.1. Interpretación de los modelos de inversión TEM . . . . . | 30 |
| 5.2. Integración de resultados . . . . .                      | 38 |

**Capítulo 6. Conclusiones**

|                             |    |
|-----------------------------|----|
| Literatura citada . . . . . | 45 |
| Anexo . . . . .             | 48 |

## Lista de figuras

| Figura  | Página |
|---|--------|
| 1. Comportamiento de la señal TEM. Modificado de McNeill (1990). . . . .  | 6      |
| 2. Localización de la zona de estudio. Mapa creado en Qgis. . . . .   | 15     |
| 3. Unidades litológicas de la zona de estudio. Mapa creado en Qgis. Tomado de Viggiano y Gutiérrez (2005). . . . .  | 16     |
| 4. Geología del acuífero Morelia-Queréndaro. Tomado de CONAGUA (2020). . . . .  | 19     |
| 5. Mapa de anomalía magnética reducida al polo. Tomado de Gómez Cortes (2015). . . . .  | 20     |
| 6. Mapa de un corte de resistividad a profundidad. Tomado de Gómez Cortes (2015). . . . .   | 21     |
| 7. Mapa que muestra los valores de anomalía de Bouguer. Tomado de Gómez Cortes (2015). . . . .  | 21     |
| 8. Diagrama de Piper de la zona de Araró. Tomado de Vigil Barrientos (2017). . . . .  | 22     |
| 9. Ubicación de los sondeos TEM adquiridos en la zona de estudio. . . . .   | 23     |
| 10. Equipo TerraTEM24. a) Consola receptora. b) Carretes de cable de bobina transmisora y receptora. c) Batería. d) Cable de alimentación de la consola, cable del receptor y cable del transmisor. . . . .   | 24     |
| 11. Funcionamiento del TEM con una configuración Single loop. . . . .   | 24     |
| 12. (a) Datos correspondientes al sitio ARA23. (b) Datos limpios. . . . .   | 25     |
| 13. (a-c) Modelos inversos tipo Occam R1 y R2 (verde y negro), Marquardt (rojo), modelos equivalentes (gris) y parámetros de importancia (números en negro y azul) de los sondeos ARA01, ARA13 Y ARA22. (d-f) Ajuste entre datos calculados y datos observados de los sondeos ARA01, ARA13 y ARA22. (g-i) Transformación de resistividad aparente en tiempo tardío de los sondeos ARA01, ARA13 y ARA22. . . . . | 27     |
| 14. (a-b) Corte de resistividad de todos los sondeos a 20 y 150 m de profundidad, respectivamente. (c-d) Corte de valores de importancia de todos los sondeos a 20 y 150 m de profundidad. Las cruces indican la ubicación de cada sondeo. . . . .  | 29     |
| 15. (a) Perfil 2D de los modelos inversos de los sondeos ARA02, ARA10, ARA11, ARA23 y ARA27. La línea azul discontinua representa la profundidad de investigación.(b) Pseudo-sección 2D de los modelos inversos de los sondeos ARA02, ARA10, ARA11, ARA23 y ARA27. La línea negra discontinua representa la profundidad de investigación. . . . .   | 31     |
| 16. (a) Perfil 2D de los modelos inversos de los sondeos ARA10, ARA12, ARA13, ARA14 Y ARA06. La línea azul discontinua representa la profundidad de investigación.(b) Pseudo-sección 2D de los modelos inversos de los sondeos ARA10, ARA12, ARA13, ARA14 Y ARA06. La línea negra discontinua representa la profundidad de investigación. . . . .   | 32     |
| 17. (a) Perfil 2D de los modelos inversos de los sondeos ARA01, ARA05, ARA12 y ARA17. La línea azul discontinua representa la profundidad de investigación.(b) Pseudo-sección 2D de los modelos inversos de los sondeos ARA01, ARA05, ARA12 y ARA17. La línea negra discontinua representa la profundidad de investigación. . . . .   | 34     |

| Figura  | Página |
|---|--------|
| 18. (a) Perfil 2D de los modelos inversos de los sondeos ARA20, ARA16, ARA09, ARA04, ARA02 y ARA01. La línea azul discontinua representa la profundidad de investigación.(b) Pseudo-sección 2D de los modelos inversos de los sondeos ARA20, ARA16, ARA09, ARA04, ARA02 y ARA01. La línea negra discontinua representa la profundidad de investigación. . . . . | 35     |
| 19. Pseudo-sección 2D de los sitios ARA02, ARA05 y ARA14. Pozo litológico reportado por Viggiano y Gutiérrez (2003). . . . .  | 36     |
| 20. (a-d) Cortes de resistividad de todos los sondeos TEM a profundidades de 20, 60, 80 y 150 m. . . . .  | 37     |
| 21. Mapa de resistividad a 40 m de profundidad. Se representan también los valores de SDT de los pozos y norias muestreados, de acuerdo al Criterio Ecológico de Calidad del Agua (SEMARNAT, 2008). . . . .   | 39     |
| 22. Mapa de resistividad a 40 m de profundidad. Se representan también los valores de SDT de los pozos y norias muestreados, de acuerdo a la clasificación de aguas subterráneas (CONAGUA, 2019). . . . .   | 39     |
| 23. Mapa de resistividad a 40 m de profundidad. Se representan también los valores de CE de los pozos y norias muestreados, de acuerdo a la clasificación de riesgo de salinidad del agua (Olías et al., 2005). . . . .   | 40     |
| 24. Relación STD - CE de las muestras de agua de los pozos y norias. . . . .  | 41     |
| 25. Mapa de resistividad a 40 m de profundidad. Se representa también los valores de Temperatura de los pozos y norias muestreados, de acuerdo a la NOM-001-SEMARNAT-1996. . . . .  | 42     |
| 26. (a-c) Modelos inversos tipo Occam R1 y R2 (verde y negro), Marquardt (rojo), modelos equivalentes (gris) y parámetros de importancia (números en negro y azul) de los sondeos ARA01, ARA02 y ARA03. (d-f) Ajuste entre datos calculados y datos observados de los sondeos ARA01, ARA02 y ARA03. . . . .   | 48     |
| 27. (a-c) Modelos inversos tipo Occam R1 y R2 (verde y negro), Marquardt (rojo), modelos equivalentes (gris) y parámetros de importancia (números en negro y azul) de los sondeos ARA04, ARA05 y ARA06. (d-f) Ajuste entre datos calculados y datos observados de los sondeos ARA04, ARA05 y ARA06. . . . .   | 49     |
| 28. (a-c) Modelos inversos tipo Occam R1 y R2 (verde y negro), Marquardt (rojo), modelos equivalentes (gris) y parámetros de importancia (números en negro y azul) de los sondeos ARA07, ARA08 y ARA09. (d-f) Ajuste entre datos calculados y datos observados de los sondeos ARA07, ARA08 y ARA09. . . . .   | 50     |
| 29. (a-c) Modelos inversos tipo Occam R1 y R2 (verde y negro), Marquardt (rojo), modelos equivalentes (gris) y parámetros de importancia (números en negro y azul) de los sondeos ARA10, ARA11 y ARA12. (d-f) Ajuste entre datos calculados y datos observados de los sondeos ARA10, ARA11 y ARA12. . . . .   | 51     |

| Figura  | Página |
|---|--------|
| 30. (a-c) Modelos inversos tipo Occam R1 y R2 (verde y negro), Marquardt (rojo), modelos equivalentes (gris) y parámetros de importancia (números en negro y azul) de los sondeos ARA13, ARA14 y ARA15. (d-f) Ajuste entre datos calculados y datos observados de los sondeos ARA13, ARA14 y ARA15. . . . . | 52     |
| 31. (a-c) Modelos inversos tipo Occam R1 y R2 (verde y negro), Marquardt (rojo), modelos equivalentes (gris) y parámetros de importancia (números en negro y azul) de los sondeos ARA16, ARA17 y ARA18. (d-f) Ajuste entre datos calculados y datos observados de los sondeos ARA16, ARA17 y ARA18. . . . . | 53     |
| 32. (a-c) Modelos inversos tipo Occam R1 y R2 (verde y negro), Marquardt (rojo), modelos equivalentes (gris) y parámetros de importancia (números en negro y azul) de los sondeos ARA20, ARA21 y ARA22. (d-f) Ajuste entre datos calculados y datos observados de los sondeos ARA20, ARA21 y ARA22. . . . . | 54     |
| 33. (a-c) Modelos inversos tipo Occam R1 y R2 (verde y negro), Marquardt (rojo), modelos equivalentes (gris) y parámetros de importancia (números en negro y azul) de los sondeos ARA23, ARA24 y ARA25. (d-f) Ajuste entre datos calculados y datos observados de los sondeos ARA23, ARA24 y ARA25. . . . . | 55     |
| 34. (a-c) Modelos inversos tipo Occam R1 y R2 (verde y negro), Marquardt (rojo), modelos equivalentes (gris) y parámetros de importancia (números en negro y azul) de los sondeos ARA26, ARA27 y ARA28. (d-f) Ajuste entre datos calculados y datos observados de los sondeos ARA26, ARA27 y ARA28. . . . . | 56     |
| 35. (a-c) Modelos inversos tipo Occam R1 y R2 (verde y negro), Marquardt (rojo), modelos equivalentes (gris) y parámetros de importancia (números en negro y azul) de los sondeos ARA29, ARA30 y ARA31. (d-e) Ajuste entre datos calculados y datos observados de los sondeos ARA29, ARA30 y ARA31. . . . . | 57     |

## Lista de tablas

| Tabla |  | Página |
|-------|--|--------|
| 1.    | Unidades geoeléctricas e hidrogeológicas. . . . .  | 30     |
| 2.    | Criterios de calidad del agua: Niveles máximos permitidos. . . . .   | 38     |
| 3.    | Modificación de la clasificación propuesta por el comité de Consultores de la Universidad de California para Dirección de Calidad del agua en 1972 (Olías et al., 2005). . . . . | 40     |
| 4.    | Información obtenida de la inversión 1D de marquardt, y de las coordenadas de los 30 sondeos TEM. . . . .  | 58     |

## Capítulo 1. Introducción

---

El agua es un elemento crucial para el funcionamiento de los ecosistemas y la provisión de servicios ambientales de los que dependemos para sobrevivir. En México se reconoce al agua como un asunto estratégico y de seguridad nacional al día de hoy, por lo que se ha convertido en un elemento central de la política de desarrollo social y económica; su disponibilidad condiciona la posibilidad de desarrollo de algunas regiones del país y su calidad es factor determinante para la salud y bienestar de la población (CONAGUA, 2006).

De acuerdo con CONAGUA (2019), anualmente México recibe aproximadamente 1,449,471 millones de metros cúbicos de agua en forma de precipitación. La cual, se estima que, de esa cantidad el 72.1 % se evapotranspira y regresa a la atmósfera, el 21.4 % escurre por los ríos o arroyos, y el 6.4 % restante se infiltra al subsuelo de forma natural y recarga los acuíferos.

La zona de Araró forma parte del acuífero Morelia-Queréndaro, definido con la clave 1602 en el Sistema de Información Geográfica para el Manejo de Agua Subterránea de la CONAGUA y se ubica en la porción noreste del estado de Michoacán. Además, el acuífero pertenece a la Región Hidrológica 12, Lerma-Chapala-Santiago.

Para el año 2020, el volumen de extracción de aguas subterráneas para este acuífero fue de 169 millones de metros cúbicos anuales, que reporta el Registro Público de Derechos de Agua (REPGA) de la Subdirección General de Administración del Agua. Mientras que la disponibilidad media anual de agua subterránea fue de  $-10.205048 \text{ hm}^3/\text{año}$ , lo que indica que no existe un volumen disponible para otorgar nuevas concesiones; por el contrario, el déficit es de  $-10,205,048$  metros cúbicos anuales que se están extrayendo a costa del almacenamiento no renovable del acuífero (CONAGUA, 2006).

Araró es considerado como un prospecto geotérmico que se encuentra en la parte oriental del sector central del Cinturón Volcánico Mexicano (CVM). Las fallas más relevantes en esta zona son la Falla Huingo y la Falla Araró-Zimirao. Estas fallas y los sistemas de fallamiento y fracturas asociadas actúan como conductos para el movimiento de los fluidos hidrotermales hacia la superficie con temperaturas de descarga superficial entre  $31 \text{ °C}$  y  $98 \text{ °C}$  (Casarrubias et al., 1990; Vigil, 2017).

En esta zona se encuentran manantiales termales con escape de fluidos y zonas de alteración, agrupados en varias áreas. De acuerdo con Hiriart Le Bert (2011), las aguas de los manantiales en esta área son de tipo clorurado sódico con concentraciones promedio de boro de 55 ppm.

Por lo anterior, la zona de Araró es de especial interés para el desarrollo de la energía geotérmica. Según Suwai (2009), el estudio de los acuíferos es relevante en áreas geotérmicas porque representan la mejor fuente de agua de un sistema geotérmico.

También, se ha reportado que los manantiales de San Nicolás Simirao tienen aguas salinas con conductividades eléctricas promedio de  $4,600 \mu\text{S}/\text{cm}$ , y salinidad del orden de  $2,340 \text{ mg}/\text{l}$ , en promedio. Por lo que la salinidad y composición de los gases sugieren que las aguas de los manantiales de Simirao provienen de una mezcla entre aguas geotérmicas profundas con acuíferos someros de agua dulce (Viggiano y Gutiérrez, 2003).

En este sentido, los métodos electromagnéticos son herramientas muy utilizadas en la exploración de recursos hídricos subterráneos debido a que son sensibles a los cambios de conductividad eléctrica de las rocas (Cassiani et al., 2006), propiedad que se puede asociar a la presencia de fluidos. Dado que no se tiene mucha información de las condiciones del acuífero en la zona de Araró, con el uso del Método Transitorio Electromagnético (TEM), además de caracterizar la geometría del acuífero somero, se busca inferir la influencia de fluidos geotérmicos en él. Teniendo en cuenta que la profundidad de investigación está determinada por el tiempo  $t$  en el que la señal decae al nivel de ruido, el momento de la fuente y la resistividad del subsuelo (Spies, 1989).

Este trabajo de tesis consiste de seis capítulos, iniciando con el capítulo 1 que consiste de una breve introducción, de la justificación, hipótesis y objetivos de este trabajo. En el capítulo 2 se presenta la teoría relacionada con los métodos electromagnéticos, mientras que en el capítulo 3 se aborda la ubicación, geología y algunos estudios previos de la zona de estudio, así como la adquisición de los datos. En el capítulo 4 se incluye el procesamiento e inversión 1D de los datos TEM y en el capítulo 05 se discuten e interpretan los resultados obtenidos de la inversión y de información obtenida del muestreo de agua en pozos y norias, finalizando con el capítulo 6 en donde se presentan las conclusiones.

## **1.1. Justificación**

Algunos autores mencionan que los datos recabados hasta ahora sobre la cuenca de Cuitzeo resultan insuficientes, por lo que es necesario obtener más información de las condiciones actuales del acuífero. En este estudio se pretende delimitar la geometría del acuífero somero que se está explotando en las inmediaciones de Araró mediante TEM.

## **1.2. Hipótesis**

Con la interpretación de datos TEM se podrá determinar la influencia de los fluidos geotérmicos en el acuífero somero ubicado en las inmediaciones de Araró.

## **1.3. Objetivos**

### **1.3.1. Objetivo general**

Interpretar datos adquiridos con el TEM en las inmediaciones de Araró, Michoacán para la obtención de modelos que permitan correlacionarlos con unidades hidrogeológicas en la zona de estudio. Además, se explorará la factibilidad de utilizar el Método Radiomagnetotelúrico.

### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Caracterizar las unidades hidrogeológicas a partir de datos TEM.
- Interpretar, en caso de ser posible, pruebas de bombeo para identificar las características y propiedades del acuífero.
- Correlacionar los modelos geoelectricos con los parámetros físico-químicos de las muestras de agua obtenidas en la zona de estudio.

## Capítulo 2. Fundamentos Teóricos

---

### 2.1. Ecuaciones de Maxwell

Todos los fenómenos electromagnéticos están gobernados por las ecuaciones empíricas de Maxwell que describen la variación en tiempo de los campos eléctricos y magnéticos. Estas son ecuaciones diferenciales lineales de primer orden desacopladas pero que pueden ser acopladas mediante relaciones constitutivas empíricas, las cuales reducen el número de funciones básicas de campo vectorial, de cinco a dos (Ward y Hohmann, 1988).

Las ecuaciones de Maxwell son expresadas en forma diferencial como:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}, \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} + \mathbf{j}, \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0, \quad (3)$$

$$y \quad \nabla \cdot \mathbf{D} = q, \quad (4)$$

donde  $\mathbf{E}$  es la intensidad de campo eléctrico en V/m,  $\mathbf{B}$  es la densidad de flujo magnético en Vs/m<sup>2</sup>,  $\mathbf{H}$  es la intensidad del campo magnético en A/m,  $\mathbf{D}$  es el desplazamiento eléctrico en As/m<sup>2</sup>,  $\mathbf{j}$  es la densidad de corriente eléctrica en A/m<sup>2</sup> y  $q$  es la densidad de carga eléctrica en As/m<sup>3</sup>.

La ecuación (1) corresponde a la Ley de Faraday, la cual describe que un campo eléctrico es inducido por un flujo magnético variable y su intensidad depende de la velocidad de esta variación. En la ecuación (2) se representa la Ley de Ampere, esta expresa al campo magnético inducido como la suma de la densidad de corriente y la variación temporal del desplazamiento eléctrico. Por otra parte, la Ley de Gauss para el magnetismo está dada por la ecuación (3) y establece la inexistencia de monopolos magnéticos. Finalmente, la ecuación (4) representa a la Ley de Gauss para la electricidad, la cual relaciona el campo eléctrico y la distribución de cargas eléctricas.

Las ecuaciones descritas con anterioridad deben ser acopladas con las propiedades físicas de la Tierra mediante las relaciones constitutivas:

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}, \quad (5)$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E}, \quad (6)$$

$$y \quad \mathbf{j} = \sigma \mathbf{E}. \quad (7)$$

En la ecuación (5),  $\mu$  es la permeabilidad magnética, propiedad que relaciona la densidad de flujo magnético con el campo magnético. La permitividad eléctrica  $\varepsilon$  relaciona el campo eléctrico con el desplazamiento eléctrico en la ecuación (6). Por último, la conductividad eléctrica  $\sigma$  relaciona la densidad de corriente con el campo eléctrico en la ecuación (7), también llamada Ley de Ohm.

Consideramos un medio lineal, homogéneo e isotrópico para tratar a las propiedades tensoriales  $\varepsilon$ ,  $\mu$  y  $\sigma$  como escalares. También se supone que la permeabilidad magnética de los materiales es constante e igual a la del vacío, siendo  $\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Vs/Am}$  y la permitividad eléctrica del vacío  $\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ Am/Vs}$ .

## 2.2. Método Transitorio Electromagnético

Las técnicas electromagnéticas de exploración geofísica se utilizan para estimar la distribución de resistividades en el subsuelo, y son una alternativa a los de corriente directa. Las técnicas electromagnéticas pueden ser divididas en dos grupos: en el dominio de la frecuencia y en el dominio del tiempo. El método del sondeo electromagnético transitorio, comúnmente conocido como sondeo TEM o TDEM (Transient Electromagnetic, Time Domain Electromagnetic) es una técnica del último grupo usada en diversas aplicaciones (hidrogeología, minería, geotermia, etc.).

El objetivo principal del método electromagnético TEM es mostrar la distribución de la resistividad del subsuelo. Es una técnica con gran resolución vertical, y permite obtener una imagen detallada de las condiciones del subsuelo. En general, la técnica del TEM consiste en construir una espira con un cable en forma de cuadrado, por la que se deja pasar una corriente continua de gran intensidad que crea un campo magnético primario; después de cierto tiempo se interrumpe abruptamente el flujo de corriente y el campo magnético primario colapsa. Así, corrientes de eddy son inducidas en el subsuelo, las cuales originan un campo magnético secundario.

La tasa de cambio de este campo magnético secundario es medida como voltaje inducido en una bobina receptora. La forma del decaimiento de este voltaje contiene información sobre la distribución de la resistividad del terreno debido a que la magnitud y la distribución de la corriente inducida dependen de él.

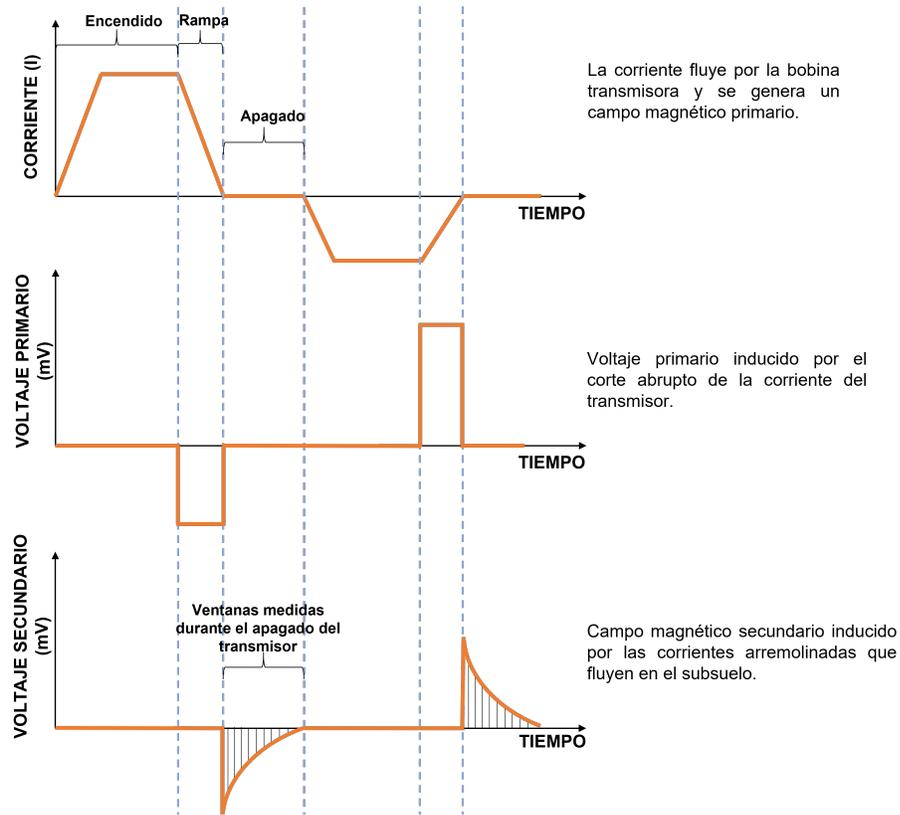


Figura 1. Comportamiento de la señal TEM. Modificado de McNeill (1990).

### 2.2.1. Solución para un medio homogéneo

Asumiendo una bobina horizontal con radio  $a$  y una corriente  $I$  localizada en  $z = 0$ , la componente vertical del campo magnético  $\dot{H}_z$  en el centro de la bobina debido a una excitación escalonada está dada por (Ward y Hohmann, 1988):

$$\dot{H}_z = \frac{-I}{\sigma\mu_0 a^3} \left[ 3\text{erf}(\Theta a) - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \Theta a (3 + 2\Theta^2 a^2) e^{-(\Theta^2 a^2)} \right], \quad (8)$$

donde  $\Theta$  es:

$$\Theta = \sqrt{\frac{\mu_0 \sigma}{4t}}, \quad (9)$$

y la función de error de Gauss está dada por:

$$\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-\tau^2} d\tau. \quad (10)$$

### 2.2.2. Resistividad aparente

De acuerdo con Spies y Eggers (1986), la resistividad aparente en los sondeos TEM para tiempos tempranos, se puede aproximar a la resistividad verdadera de la capa superior del subsuelo utilizando la definición de fase de onda. Para los tiempos tardíos se debe aplicar la definición de etapa tardía para aproximar la resistividad real a la capa inferior.

Para tiempos tempranos, después del apagado, la ecuación (8) se reduce a:

$$\dot{H}_{z,et} = -\frac{3I}{\sigma\mu_0 a^3}, \quad (11)$$

mientras que para tiempos tardíos:

$$\dot{H}_{z,et} = -\frac{Ia^2}{20\sqrt{\pi}} (\mu_0\sigma)^{\frac{2}{3}} t^{-\frac{5}{2}}. \quad (12)$$

Reordenando los términos de la ecuación (11), la resistividad aparente para tiempos tempranos está dada por:

$$\rho_{a,et} = -\frac{\mu_0 a^3}{3I} \dot{H}_{z,et}. \quad (13)$$

Similarmente, reordenando los términos de la ecuación (12), la resistividad aparente para tiempos tardíos es:

$$\rho_{a,lt} = -\left[\frac{I^2 a^4}{20^2 \pi t^5}\right]^{\frac{1}{3}} \mu_0 \dot{H}_{z,lt}^{\frac{2}{3}}. \quad (14)$$

La aproximación de tiempos tardíos es válida para sondeos de zona lejana. Mientras que las aproximaciones de tiempos tempranos trabajan para sondeos de zona cercana, en donde el número de inducción es menor a 1. El número de inducción en el dominio de la frecuencia está dada por (Spies y Frischnecht, 1991):

$$B_{FD} = \sqrt{\frac{\mu_0 \sigma \omega}{2}} r, \quad (15)$$

y para el dominio del tiempo:

$$B_{TD} = \sqrt{\frac{\mu_0 \sigma}{4t}} r, \quad (16)$$

en donde  $r$  es la separación fuente-receptor.

### 2.2.3. Profundidad de difusión

La profundidad de difusión de las ondas electromagnéticas en el dominio del tiempo está dada por (Ward y Hohmann, 1988):

$$\delta_{TD} = \sqrt{\frac{2t}{\mu_o \sigma}}, \quad (17)$$

donde  $\mu_o$  es la permeabilidad magnética,  $\sigma$  la conductividad eléctrica y  $t$  el tiempo.

### 2.3. Teoría de inversión

La teoría de inversión es definida como un conjunto de técnicas matemáticas y estadísticas que permiten obtener información útil del mundo físico a partir de inferencias logradas a través de observaciones. La finalidad es encontrar un modelo que obtenga una respuesta similar a los valores reales medidos, bajo ciertas restricciones (Menke, 1989).

Para resolver el problema de inversión se debe combinar correctamente las observaciones y la información *a priori*. Por lo que es necesario tener suficiente conocimiento de la física del problema como para poder generar datos sintéticos a partir del modelo. A este problema se le conoce como resolución del problema directo (Pérez, 2014).

En geofísica, la inversión ha sido desarrollada para entender el interior de la Tierra a partir de datos obtenidos desde la superficie. Sin embargo, el problema inverso aparece en muchas otras ramas de las ciencias, como pueden ser la tomografía médica, el procesado de imagen o el ajuste de curvas. En nuestro caso, los parámetros son las resistividades y espesores del subsuelo, los datos son las observaciones medidas en la superficie y el modelo queda aún por determinar.

Para un conjunto de datos electromagnéticos, se tiene un vector de datos  $\mathbf{d}$  que contiene  $N$  observaciones.

$$\mathbf{d} = (d_1, \dots, d_N)^T. \quad (18)$$

Usualmente, los datos adquiridos contienen incertidumbre, por lo que se establece un vector de errores  $\delta$  para incluirla en el cálculo posterior:

$$\delta = (\delta_1, \dots, \delta_N)^T. \quad (19)$$

También se define un vector de tamaño  $M \times 1$  para los parámetros del modelo, los cuales son los valores

de resistividad en cada una de las celdas en las que se discretiza el dominio modelado

$$\mathbf{m} = (m_1, \dots, m_M)^T. \quad (20)$$

El objetivo de la inversión es encontrar un modelo que explique los datos con sus errores. Los datos están relacionados con los parámetros del modelo  $\mathbf{m}$  y con los errores  $\delta$ , a través de una función  $\mathbf{m}$  llamada operador de modelado directo  $\mathbf{F}(\mathbf{m})$  que contiene relaciones físicas asociadas al problema:

$$\mathbf{d} = \mathbf{F}(\mathbf{m}) + \mathbf{e}. \quad (21)$$

El operador  $\mathbf{F}$  genera un conjunto de datos calculados o sintéticos  $\mathbf{d}'$  cuando se le ingresan parámetros del modelo. Esto es

$$\mathbf{d}' = \mathbf{F}(\mathbf{m}). \quad (22)$$

El objetivo de la inversión es minimizar la diferencia entre los datos calculados  $\mathbf{d}'$  y los datos medidos. Utilizando un criterio de mínimos cuadrados se define una función objetivo  $\psi$  para minimizar:

$$\psi_d = (\mathbf{d} - \mathbf{d}')^T \mathbf{W}^2 (\mathbf{d} - \mathbf{d}') = \boldsymbol{\varepsilon}^T \mathbf{W}^2 \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (23)$$

donde  $\boldsymbol{\varepsilon} = (\mathbf{d} - \mathbf{d}')$  es el vector residual.  $\mathbf{W}$  es una matriz de peso que utiliza el vector de errores  $\delta$  para ponderar la función y está definida como

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\delta_1} & \dots & 0 \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & \dots & \frac{1}{\delta_N} \end{bmatrix}. \quad (24)$$

La calidad en el ajuste de los datos puede ser calculada a través del valor cuadrático medio o RMS por sus siglas en inglés, el cual está definido como

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{(d_i - d'_i)^2}{\delta d_i^2}}. \quad (25)$$

Un  $RMS = 1$  indica un ajuste adecuado dentro de los errores de los datos permitidos. Cuando el  $RMS < 1$  se tiene un sobreajuste de los datos, es decir, el residual entre los datos observados y calculados en promedio es menor que la incertidumbre en los datos. Por último, un  $RMS > 1$  indica un subajuste, el residual es más grande que los errores. Es importante señalar que un RMS bajo no siempre indica el mejor modelo, en el caso de la geofísica se debe revisar siempre que el modelo tenga sentido

geológico.

En el caso más simple, un modelo puede derivarse a través de un esquema de inversión directo tipo  $\mathbf{m} = \mathbf{F}^{-1}\mathbf{d}$ . Sin embargo, en los problemas de inversión que se presentan en los métodos electromagnéticos, los datos se relacionan con los parámetros de manera no lineal (Meju, 1994), por lo que la función  $\mathbf{F}(\mathbf{m})$  debe ser linealizada.

### 2.3.1. Estrategia para problemas no lineales

Gauss sugiere que los problemas no lineales pueden ser resueltos a través de aproximaciones sucesivas utilizando el método lineal de mínimos cuadrados (Meju, 1994). Esto conlleva a una linealización de la función  $\mathbf{F}(\mathbf{m})$ , a través de series de Taylor de primer orden alrededor de un modelo inicial y posteriormente mejorar dicho modelo a través de un método iterativo.

Se comienza estableciendo el modelo inicial  $\mathbf{m}_0$ , puede ser con conocimiento *a priori* (i.e., estudios previos) o una mera conjetura. El modelo  $\mathbf{m}_0$  es perturbado iterativamente. En cada iteración  $k$ , se establece un cambio  $\Delta\mathbf{m}_k$  y el modelo se actualiza a

$$\mathbf{m}_{k+1} = \mathbf{m}_k + \Delta\mathbf{m}_k. \quad (26)$$

El problema se linealiza a través de una expansión de Taylor a primer orden

$$\mathbf{F}(\mathbf{m}_k + \Delta\mathbf{m}_k) = \mathbf{F}(\mathbf{m}_k) + \frac{\partial\mathbf{F}(\mathbf{m}_k)}{\partial\mathbf{m}_k} \Delta\mathbf{m}_k + \dots \approx \mathbf{F}(\mathbf{m}_k) + \mathbf{J}\Delta\mathbf{m}_k, \quad (27)$$

donde  $\mathbf{J}$  es una matriz de sensibilidad de  $N \times M$  llamada Jacobiano, la cual describe la sensibilidad de los datos a pequeñas perturbaciones en los parámetros del modelo. El Jacobiano se define como

$$\mathbf{J} = \begin{bmatrix} \frac{\partial\mathbf{F}_1(\mathbf{m})}{\partial\mathbf{m}_1} & \dots & \frac{\partial\mathbf{F}_1(\mathbf{m})}{\partial\mathbf{m}_M} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial\mathbf{F}_N(\mathbf{m})}{\partial\mathbf{m}_1} & \dots & \frac{\partial\mathbf{F}_N(\mathbf{m})}{\partial\mathbf{m}_M} \end{bmatrix}. \quad (28)$$

Ahora se incluyen estos cambios en la función objetivo  $\psi$ :

$$\psi(\Delta\mathbf{m}_k) = (\mathbf{d} - \mathbf{F}(\mathbf{m}_k) - \mathbf{J}\Delta\mathbf{m}_k)^T \mathbf{W}^2 (\mathbf{d} - \mathbf{F}(\mathbf{m}_k) - \mathbf{J}\Delta\mathbf{m}_k). \quad (29)$$

Se puede encontrar el mínimo de la función  $\psi$  derivando con respecto a la actualización del modelo

$\Delta \mathbf{m}_k$  e igualando a cero. Por lo que una solución de mínimos cuadrados para  $\Delta \mathbf{m}_k$

$$\Delta m_k = (\mathbf{J}^T \mathbf{W}^2 \mathbf{J})^{-1} \mathbf{J}^T \mathbf{W}^2 (\mathbf{d} - \mathbf{F}(\mathbf{m}_k)). \quad (30)$$

La ecuación 30 es conocida como Gauss-Newton. Este proceso de inversión iterativo es cortado en la  $k$ -ésima iteración si se considera que el modelo  $\mathbf{m}_k$  produce un ajuste aceptable o si se llegó a un número deseado de iteraciones. La lentitud con la que este algoritmo converge puede deberse a dos factores: el modelo inicial  $\mathbf{m}_0$  no es óptimo o la matriz  $\mathbf{J}^T \mathbf{W}^2 \mathbf{J}$  no tiene inversa, dado que no es una matriz cuadrada o su determinante es cero. Se puede establecer una función de penalización que considere el problema original de minimización de la ecuación y una restricción 23 adicional:

$$\psi = \psi_d + \lambda \psi_m, \quad (31)$$

donde  $\lambda$  es un parámetro de regularización, el cual evita que la función de costo de los datos  $\psi_d$  o la función de costo del modelo  $\psi_m$  dominen sobre la función de costo total.

### 2.3.2. Inversión de Marquardt

Es un método de inversión que depende en gran medida de la elección del modelo inicial (Ruiz et al., 2018), el cual utiliza una cantidad mínima de parámetros del modelo. Este método es conocido como Marquardt-Levenberg o mínimos cuadrados amortiguado y la actualización del modelo ( $\Delta m_k$ ) está definida por la ecuación (Levenberg, 1944; Marquardt; 1963):

$$\Delta m_k = (J^T W_d^2 J + \beta^2 I)^{-1} J^T W_d^T (d - F(m_k)), \quad (32)$$

donde  $I$  es la matriz identidad,  $\beta$  es el multiplicador de Lagrange,  $W_d$  es una matriz de peso que contiene los errores de los datos medidos,  $F(m_k)$  es el operador de modelado directo,  $J$  es la matriz del Jacobiano que describe la sensibilidad de los datos con respecto a una pequeña perturbación en los parámetros del modelo.

En la inversión de Marquardt es común invertir la matriz de sensibilidad (Ec. 32), mediante la descomposición de valores singulares (SVD), en la que los valores singulares se ordenan por su importancia (se normalizan de acuerdo al más grande, de manera que quedan entre el rango de 1 y 0). Por consiguiente, cada parámetro obtenido a partir de la inversión de los datos corresponde a un valor singular y se puede valorar su importancia en la descomposición. Los parámetros más importantes en la inversión se asocian con valores singulares mayores (García Suárez, 2021).

### 2.3.2.1. Descomposición de Valores Singulares

Para calcular la inversa en la ecuación (32), se suele utilizar la Descomposición de Valores Singulares (DVS). Este método establece que cualquier matriz  $N \times M$  se puede separar de la siguiente manera (Menke, 1984):

$$\mathbf{G} = \mathbf{U} \mathbf{\Lambda} \mathbf{V}^T, \quad (33)$$

donde:

- La matriz ortogonal  $\mathbf{U} \in \mathbb{R}^{N \times N}$  consiste de eigenvectores que abarcan el espacio de datos. Los eigenvectores de  $\mathbf{G}\mathbf{G}^T$  están contenidos en  $\mathbf{U}$ .
- La matriz ortogonal  $\mathbf{V} \in \mathbb{R}^{M \times M}$  abarca el espacio del modelo y consta de los eigenvectores de  $\mathbf{G}^T\mathbf{G}$ .
- $\mathbf{\Lambda} \in \mathbb{R}^{N \times M}$  es una matriz diagonal de eigenvalores. Los elementos diagonales  $\lambda_i$  son no negativos y son llamados valores singulares. Estos valores singulares están dispuestos en orden decreciente.

Si la matriz  $\mathbf{G}$  es  $rank(\mathbf{G}) = p \leq \min(M, N)$ , entonces existe un número  $p$  de valores singulares distinto de cero. La DVS se aplica al Jacobiano  $\mathbf{J}_w = \mathbf{W}_d \mathbf{J}$  y la ecuación (32) se expresa como (Lines y Treitel, 1984):

$$\begin{aligned} \Delta m_k &= V \underbrace{(\mathbf{\Lambda}^2 + \beta^2 I)^{-1} \mathbf{\Lambda}^T \mathbf{\Lambda} \mathbf{\Lambda}^{-1} U^T}_{\mathbf{Q}} W_d (d - F(m_k)) \\ &= V Q \lambda^{-1} U^T W_d (d - F(m_k)), \end{aligned} \quad (34)$$

donde la matriz diagonal de amortiguamiento  $\mathbf{Q}$ , tiene valores:

$$Q_{ii} = \frac{\lambda_i^2}{\lambda_i^2 + \beta^2}. \quad (35)$$

Si se normaliza por el valor singular máximo  $\lambda_{max}$ :

$$\hat{Q}_{ii} = \frac{\lambda_i^2 / \lambda_{max}^2}{\lambda_i^2 / \lambda_{max}^2 + \hat{\beta}^2}. \quad (36)$$

El término  $\hat{\beta} = \frac{\beta}{\lambda_{max}}$  es el umbral de valor singular y marca el límite más allá del cual se amortigua un valor singular. Además, se debe tener en cuenta que un valor de  $\beta^2 = 0$  da como resultado el método

de Gauss-Newton.

### 2.3.2.2. Importancias

La resolución de los parámetros del modelo se puede investigar mediante la matriz amortiguada  $\hat{Q}$  normalizada. La matriz de resolución  $\mathbf{R}$  de los parámetros del modelo, está definida como (Menke, 1984):

$$R = V \hat{Q} \hat{Q}^T V^T, \quad (37)$$

Los parámetros de importancia del modelo  $\mathbf{m}_i$  se obtienen:

$$imp_i = \sqrt{R_{ii}}. \quad (38)$$

Con un rango de valores de entre 0 y 1. Los valores de importancia cercanos a 1, indican que los parámetros del modelo se encuentran bien resueltos.

### 2.3.2.3. Modelos equivalentes

Los modelos equivalentes se pueden utilizar para evaluar la resolución de los parámetros del modelo. Dos modelos son equivalentes si sus respuestas son idénticas dentro un cierto límite de error (Spies y Frischknecht, 1991). Scholl (2005) implementó un esquema de inversión híbrido Marquardt-Montecarlo para calcular modelos equivalentes. Esto consiste en perturbar aleatoriamente los parámetros del modelo inverso de Marquardt dentro de un pequeño porcentaje. Si el ajuste de los datos están dentro de un rango aceptable, el modelo se guarda. Si no, se realiza una nueva rutina de inversión de Marquardt pero con el modelo perturbado como modelo de partida y se repiten los pasos. El resultado es un conjunto de modelos que representan los modelos equivalentes (Scholl, 2005). Por lo tanto, estos modelos equivalentes se utilizan para evaluar la resolución de los parámetros del modelo: si los modelos equivalentes muestran una alta variabilidad dentro de un parámetro del modelo, este parámetro del modelo no está bien resuelto. Por el contrario, si los modelos equivalentes muestran una baja variabilidad, el parámetro del modelo correspondiente está bien resuelto.

### 2.3.3. Inversión de Occam

Este método de inversión para datos electromagnéticos fue desarrollado por Constable et al. (1987). El método de inversión de Occam propone encontrar el modelo más suave que ajuste los datos y sea el más

simple dentro de una tolerancia razonable (Ecuación 8). La actualización del modelo está dada por:

$$\Delta m_k = (J^T W_d^2 J + \lambda R_{1,2}^T R_{1,2})^{-1} [J^T W_d^2 (d - F(m_k)) - \lambda R_{1,2}^T R_{1,2} m_k], \quad (39)$$

donde  $W_d$  es una matriz de peso que contiene los errores de los datos medidos,  $F(m_k)$  es el operador del modelado directo,  $\lambda$  es un parámetro de regularización,  $R_1$  y  $R_2$  son restricciones en forma de rugosidad definidas por la primera y segunda derivada de resistividad con respecto a la profundidad.

## Capítulo 3. Zona de estudio

### 3.1. Localización

La localidad de Araró se ubica dentro del municipio de Zinapécuaro, en la porción nororiental del Estado de Michoacán. A unos 40 kilómetros al noreste de Morelia, 30 kilómetros al noreste del campo geotérmico de Los Azufres, y al oriente del lago de Cuitzeo (Fig. 2). La zona de estudio se localiza entre las coordenadas 19°53' y 19°55' latitud norte y, 100°47' y 100°51' longitud oeste y se encuentra al interior de una depresión tectónica de dirección general este-oeste, conocida como Graben de Cuitzeo-Maravatío, que parece ser parte de una fosa tectónica más grande que se extiende desde Chapala, Jalisco, hasta Tepetongo, Edo. México (Hiriart Le Bert, 2011).

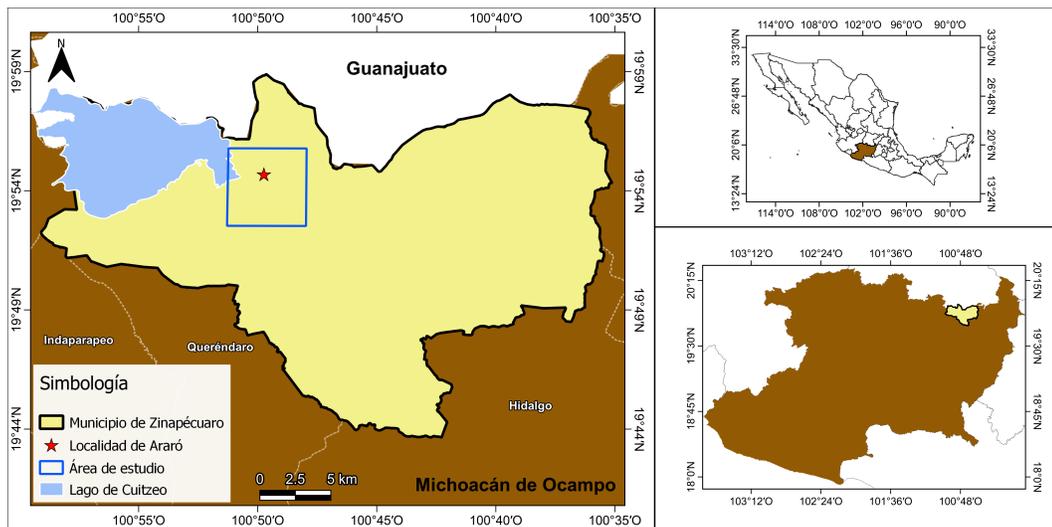


Figura 2. Localización de la zona de estudio. Mapa creado en Qgis.

### 3.2. Marco geológico

#### 3.2.1. Geología estructural

El prospecto geotérmico de Araró se encuentra en la parte oriental del sector central del Cinturón Volcánico Mexicano (CVM). Las estructuras locales más importantes y aparentemente activas son las fallas Huingo y Araró-Zimirao, de tipo normal y orientación general este-oeste, con variaciones hasta noreste-suroeste (Viggiano y Gutiérrez, 2003). A través de ellas afloran la mayor parte de las manifestaciones termales. Estas estructuras configuran un sistema de bloques escalonados hacia el norte (y en

menor grado hacia el noroeste), con ligeros basculamientos hacia el sur (y en menor grado al sureste) (Viggiano y Gutiérrez, 2005).

Las rocas que afloran se pueden agrupar en tres unidades: andesitas basálticas (Qpab) del Pleistoceno temprano, tobas riolíticas (Qtr) con una edad entre 1.2 y 0.9 Ma, y riolitas vítreas (Qrv) con edades entre 1.54 y 1.19 Ma, además de algunos depósitos aluviales (Qal) (Fig. 3) (Departamento de Exploración, 1989; Casarrubias et al., 1990).

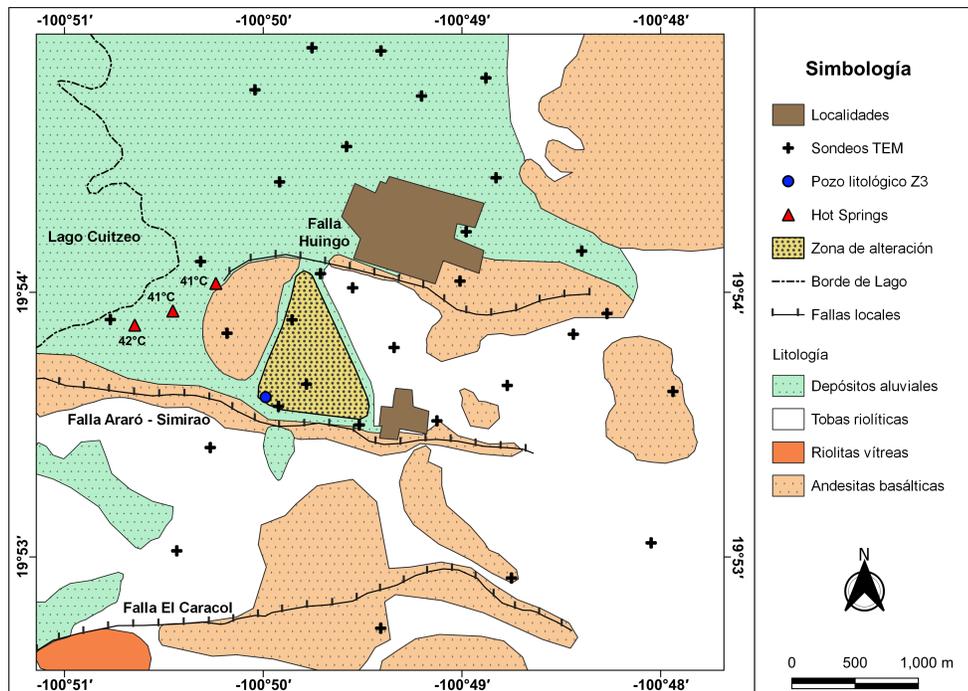


Figura 3. Unidades litológicas de la zona de estudio. Mapa creado en Qgis. Tomado de Viggiano y Gutiérrez (2005).

### 3.2.2. Estratigrafía

De acuerdo con el informe de disponibilidad de CONAGUA (2015), las unidades que afloran en la zona son:

- Rocas ígneas.** Esta unidad está constituida por tobas, brechas y lavas ignimbríticas, de composición riolítica (Mioceno Inferior). En la sierra de Mil Cumbres, suprayace a derrames andesíticos de edad Oligoceno. En la sierra de Mil Cumbres y en el camino a Tzitzio, su espesor que va de 300 a 350 m, al este de Copándaro, es del orden de 120 m. Está ampliamente distribuida en la porción sureste del área y en la ribera sur del lago de Cuitzeo.
- Derrames andesíticos.** Derrames de lavas, aglomerados y brechas de composición andesítica

(Mioceno Medio). Las lavas se presentan al NNE del poblado de Tarímbaro en ocasiones hasta con pseudoplegamientos, como en la cantera cercana al poblado de Álvaro Obregón. Su espesor es cercano a los 400 m, aflora en los macizos montañosos, en el frente de la falla que limita al valle de Morelia-Álvaro Obregón por el SE, constituyendo la elevación en donde se asienta este último poblado y en el extremo norcentral del área, en el fondo de las barrancas, alrededor del poblado Cañada del Herrero y en el frente del alto de la falla normal que limita a la planicie del Lago de Cuitzeo, por el sur.

- **Lavas, brechas y conglomerados.** Predominantemente derrames de lavas, brechas y conglomerados basales (Mioceno-Plioceno). En la porción norte el espesor es del orden de 260 m y en la barranca del arroyo Uval, de 120 m.
- **Ignimbritas y tobas riolíticas.** Ignimbritas o tobas soldadas, vidrios, derrames y tobas vítreas, cristalinas, arenosas y arcillosas, pumicíticas y de composición dacítica y riolítica (Plioceno Inferior-Medio). Se han medido espesores de cerca de 350 m. En el área del poblado de Morelos, afloran más de 150 m de tobas soldadas, se les midió un espesor máximo de 140 m, sin embargo, en los alrededores de la ciudad de Morelia, muestran que el espesor de las tobas arenosas y de las ignimbritas, aumentan del oriente de dicha ciudad hacia el poniente de la misma.
- **Depósitos lacustres y gravas, arenas y tobas.** Constituida por sedimentos o depósitos, en ambientes lacustres, de constitución arcillo-arenoso, que se gradúan vertical y horizontalmente a gravas, arenas y tobas (Plioceno Superior). Sus espesores pueden ser de hasta 80 m y llegar a ser mayores al oriente del área. Sus afloramientos se restringen hacia las porciones central y centro oriental del área, y en las inmediaciones del noreste de la ciudad de Morelia, de igual manera, al norte de ésta a unos 2 km, antes de la bifurcación hacia Álvaro Obregón y Cuitzeo.
- **Derrames basálticos y andesíticos.** Son derrames de lavas, brechas y tobas de composición basáltica, basalto-andesítica, andesita-basáltica y andesítica (Plioceno Superior). En la porción oriental, sus espesores son de un máximo de 25 m y en la occidental, pueden alcanzar hasta del orden de 400 m. Los afloramientos más amplios, conforman los aparatos volcánicos: La Trampa, El Irauco y El Picacho, así como pequeñas mesetas que coronan a los depósitos de ignimbritas y tobas riolíticas, al norte del poblado Santa Ana del Arco o a los lacustres, como al NE del poblado Francisco I. Madero.
- **Lavas, brechas y tobas basálticas.** Lavas, brechas y tobas de composición basáltica, basalto andesítico y andesíticas (Plioceno Tardío-Cuaternario Temprano). Sus espesores son variables, al

poniente de la ciudad de Morelia es de 60 m, estos espesores deben de aumentar hacia el centro de emisión del Quinceo, probablemente hasta unos 600 m tomando en cuenta su altura.

- **Lavas, escorias, brechas, piroclastos y tobas.** Derrames de lavas, escorias, brechas, aglomerados, piroclastos y lapilli (Cuaternario Medio). Debido a los grandes volúmenes de rocas volcánicas de esta unidad, los espesores deben de ser cientos de metros, si se considera que algunos de los valles u hondonadas, donde afloran rocas de esta unidad, tienen un desnivel de más de 400 m con respecto a los afloramientos contiguos, también de rocas de esta unidad. Sus afloramientos se circunscriben a la porción poniente del área y continúan hacia el poniente y sur poniente, ya que estos se consideran como pertenecientes al extremo noreste de la meseta Tarasca.
- **Gravas, arenas, limos y arcillas.** Esta unidad está constituida por limos y arcillas, depositados en ambiente lacustre; gravas, arenas y arcillas de origen residual y aluviones compuestos por conglomerados; gravas, arenas, limos y arcillas. Se les asigna una edad del Reciente, aunque los lacustres a profundidad, en la porción oriente del valle de Morelia-Álvaro Obregón, pueden rebasar esta edad, lo mismo que en el de Lagunillas y Tiripetío. Los espesores de los residuales deben ser mayores a unos 3 m; los aluviones, pueden llegar a los 10 m, en la periferia del valle Morelia-Álvaro Obregón y los lacustres es posible que tengan algunas decenas en el centro del valle y en el de Tiripetío y Lagunillas. Están distribuidos ampliamente en el área, aunque en general sus afloramientos, son de reducidas dimensiones, los residuales cubren por lo general las partes altas o laderas de las anteriores unidades, los aluviones se encuentran en las hondonadas, fondo del lago de Cuitzeo, valle Morelia-Álvaro Obregón y los lacustres, en la porción oriental del anterior valle y en el subsuelo de los otros dos.

### 3.3. Marco hidrogeológico

El acuífero Morelia-Queréndaro corresponde a un acuífero heterogéneo y anisótropo de tipo libre, con presencia de condiciones locales de confinamiento debido a la presencia de sedimentos arcillosos en la porción aledaña al lago de Cuitzeo. El acuífero se aloja en una depresión tectónica y está conformado, en su porción superior, por sedimentos clásticos de granulometría variada, así como sedimentos arcillosos que se depositaron en la parte baja de la cuenca, donde se localiza el lago de Cuitzeo; la porción inferior está constituida por rocas volcánicas que presentan permeabilidad primaria y secundaria, principalmente basaltos y tobas. El medio granular y fracturado conforman una misma unidad hidrogeológica que presenta en general permeabilidad de media a alta, y un espesor promedio de 300 a 400 m (CONAGUA, 2020).

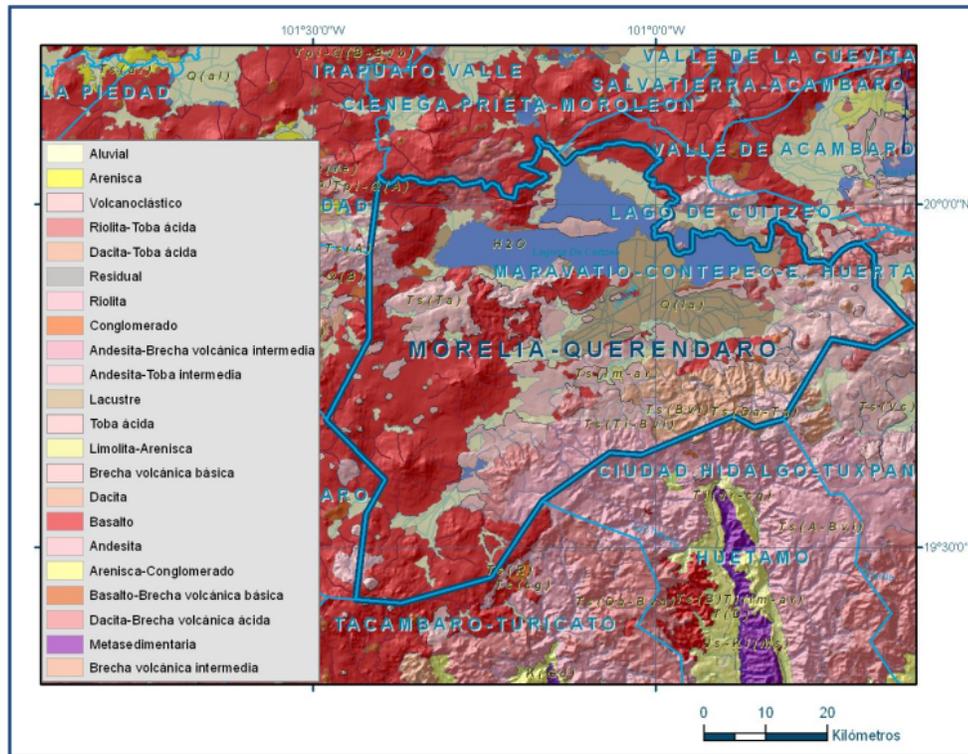


Figura 4. Geología del acuífero Morelia-Queréndaro. Tomado de CONAGUA (2020).

### 3.4. Estudios previos

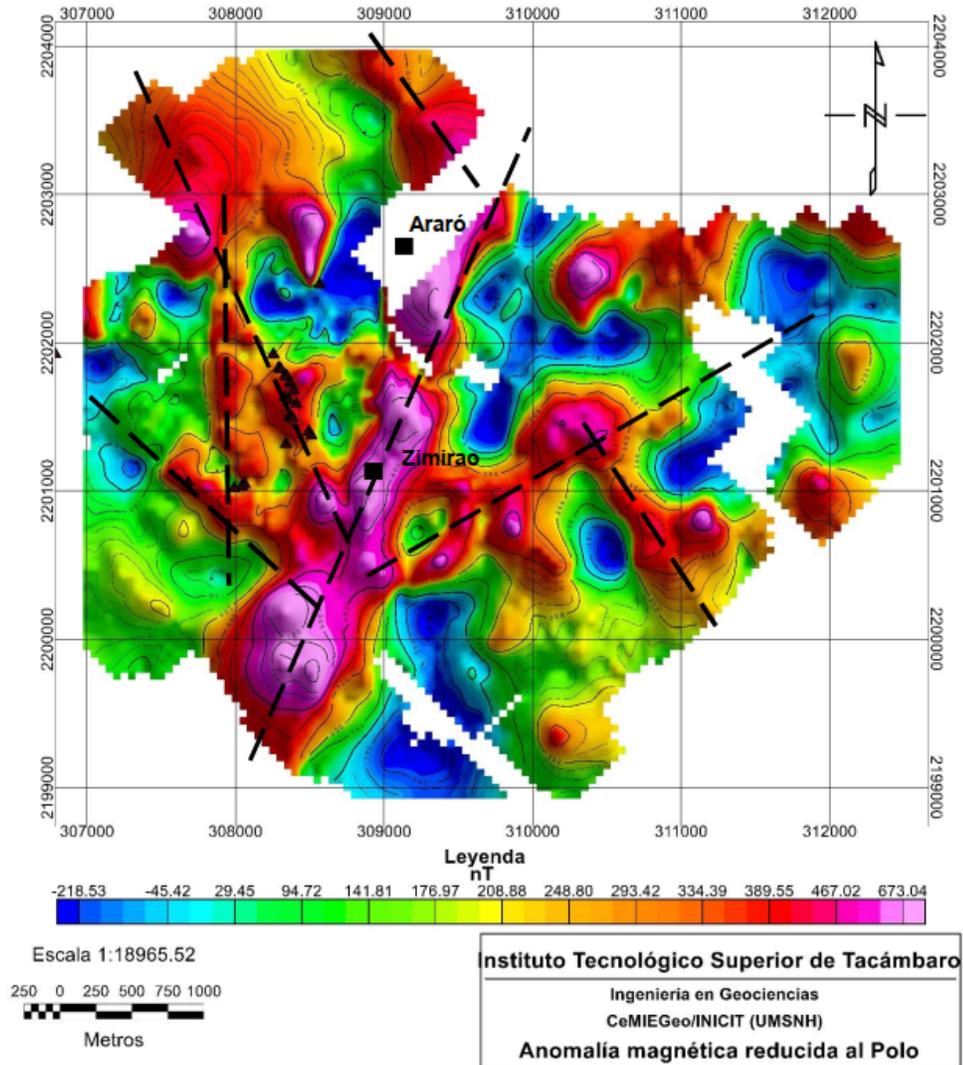
#### 3.4.1. Estudios geofísicos

Riquelme Alcantar (2000) realizó un estudio geofísico que consistió de un Sondeo Eléctrico Vertical para definir las características estructurales y estratigráficas del subsuelo, en Simirao. Con esto determinó que el área está constituida de una serie de lomas tobaceas formadas como escarpes de falla, paralelas entre sí y con echados escalonados hacia el norte, presentando basculamientos hacia el sur. Además, establece que el flujo subterráneo en esa región tiene una dirección sur-norte, hacia el lago de Cuitzeo, concluyendo que este actúa como cuenca receptora tanto superficialmente como del agua subterránea. Finalmente, concluye que el agua que integra el acuífero subterráneo en esa zona, es de naturaleza geotérmica, ya que presenta temperaturas elevadas y concentraciones altas de compuestos químicos azufrosos.

Se tiene reportado para el año 2015 algunos estudios geofísicos realizados por Gómez Cortes (2015), los cuales consistieron en la realización de perfiles magnetométricos, 16 sondeos TEM y una reinterpretación de datos gravimétricos en la zona de Araró.

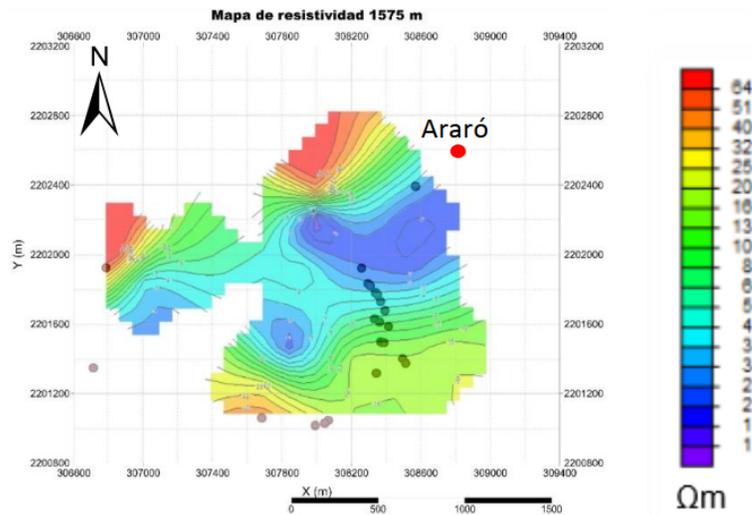
Con magnetometría visualizó un cruce de lineamientos magnéticos positivos al sur de Araró sobre la

falla Araró-Zimirao, asociándolo a la presencia de un sistema de estructuras que ha sido sepultado por eventos más recientes. Además, también observó la concordancia de las manifestaciones hidrotermales con anomalías y gradientes magnéticos positivos asociados a zonas de fractura o falla, que van desde la localidad de Simirao hasta los balnearios Huingo y los Hervideros (Fig. 5).



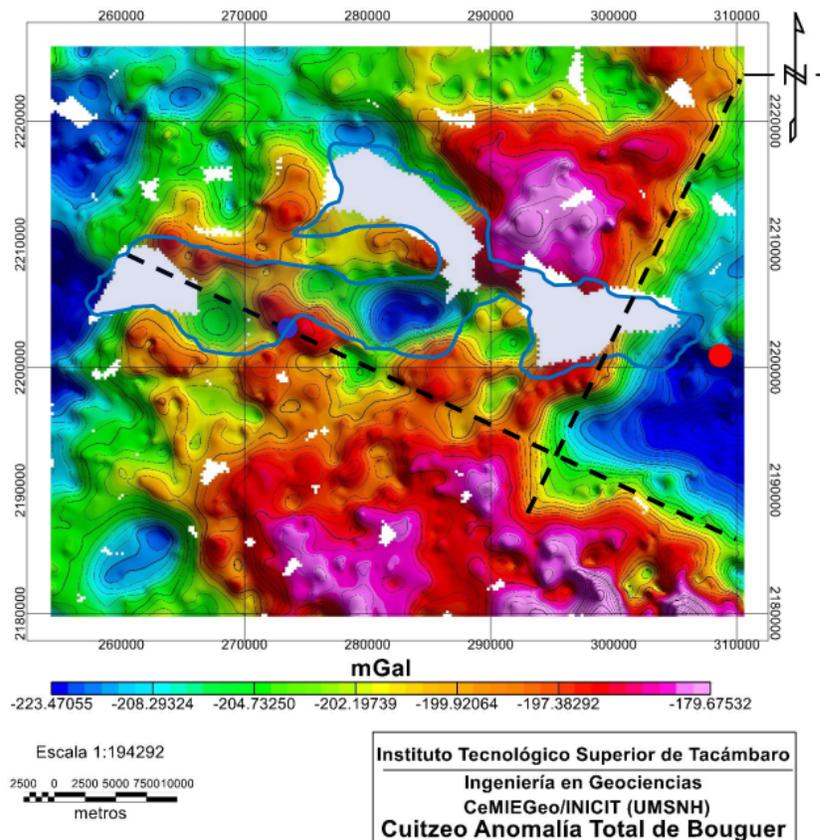
**Figura 5.** Mapa de anomalía magnética reducida al polo. Tomado de Gómez Cortes (2015).

Por otra parte, con los sondeos TEM determinó que los mínimos resistivos localizados al SSW de la localidad de Araró (Fig. 6) se asocian a la posible existencia de un medio muy saturado, el cual podría estar ligado al yacimiento geotérmico que parece estar cortado por fallas normales.



**Figura 6.** Mapa de un corte de resistividad a profundidad. Tomado de Gómez Cortes (2015).

Finalmente, con gravimetría (Fig. 7) propuso un posible cruce de tres sistemas estructurales al sur de Araró, determinando que dicho cruce podría ser el responsable del ascenso y distribución de los fluidos hidrotermales en la zona de estudio.



**Figura 7.** Mapa que muestra los valores de anomalía de Bouguer. Tomado de Gómez Cortes (2015).

Lo anterior, debido a que la actividad sísmica ligada al Sistema de Fallas Morelia-Acambay (SFMA) estaría constantemente interactuando con las estructuras sepultadas, fracturando así la capa sello y permitiendo que los fluidos circulen por las zonas de debilidad entre las rocas, resultando en manifestaciones de fluidos hidrotermales y de depósitos de sínter en superficie.

### 3.4.2. Estudios geoquímicos

Vigil Barrientos (2017) realizó un estudio para caracterizar de manera geológica y química los fluidos del sistema geotérmico de Araró. A partir de este estudio determinó que los depósitos hidrotermales superficiales en la zona están representados por sínter sílicos, compuestos de sílice de tipo opalino. Lo que sugieren temperaturas de reservorio geotérmico alrededor de los 200 °C. También, determinó que el tipo de Play geotérmico en Araró es convectivo con dominio extensional, por lo que el calor asciende a la superficie por el proceso de extensión y adelgazamiento de la corteza.

Por otra parte, a partir de la interpretación del diagrama de Piper (Fig. 8), determinó que el contenido catiónico de las aguas de los manantiales geotérmicos de Araró, tienen características salinas típicas de los campos geotérmicos de manera análoga. Además, el contenido aniónico muestra que los cloruros proporcionan indicios de salinidad en las aguas. De esta manera, deduce que la composición de las aguas geotérmicas de dichos manantiales presentan altas concentraciones de sales, evidenciando gráficamente en el campo romboidal del diagrama y clasificando las aguas como cloruro sódicas.

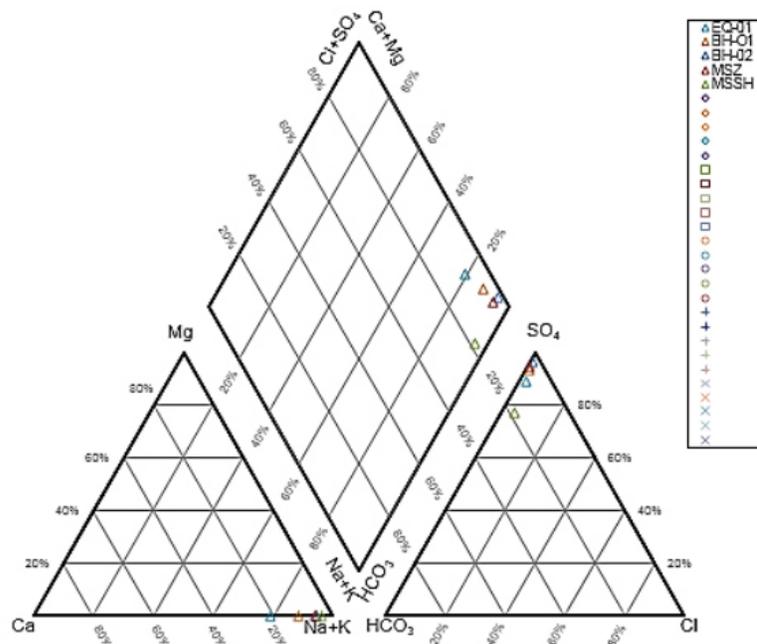


Figura 8. Diagrama de Piper de la zona de Araró. Tomado de Vigil Barrientos (2017).

### 3.5. Adquisición de datos

La adquisición de datos TEM se realizó en diciembre del 2021 y se recolectaron un total de 30 sondeos con diferentes ventanas de tiempo: 33.33, 66.66, 100, 133.33, 166.67, 200 y 233.33 ms. El arreglo empleado fue un Single loop, es decir, se utilizó un cable que en ciertos instantes de tiempo funcionaba como transmisor de la señal y mientras permanecía apagado el transmisor, el mismo cable funcionaba como receptor. El tamaño de las bobinas transmisoras fueron de 50 m x 50 m y de 100 m x 100 m, dependiendo del área del sitio, mientras que el espaciamiento entre sondeos estaba en función de la accesibilidad al terreno. Además, también se midió el ruido electromagnético ambiental en cada sondeo, con el fin de eliminar aquellos datos que alcanzaban el nivel del ruido. Lo anterior se llevó a cabo de la misma manera con el que se realiza un sondeo TEM pero sin inyectar corriente eléctrica.

En la Figura 9, se muestra la ubicación de los 30 sondeos TEM.

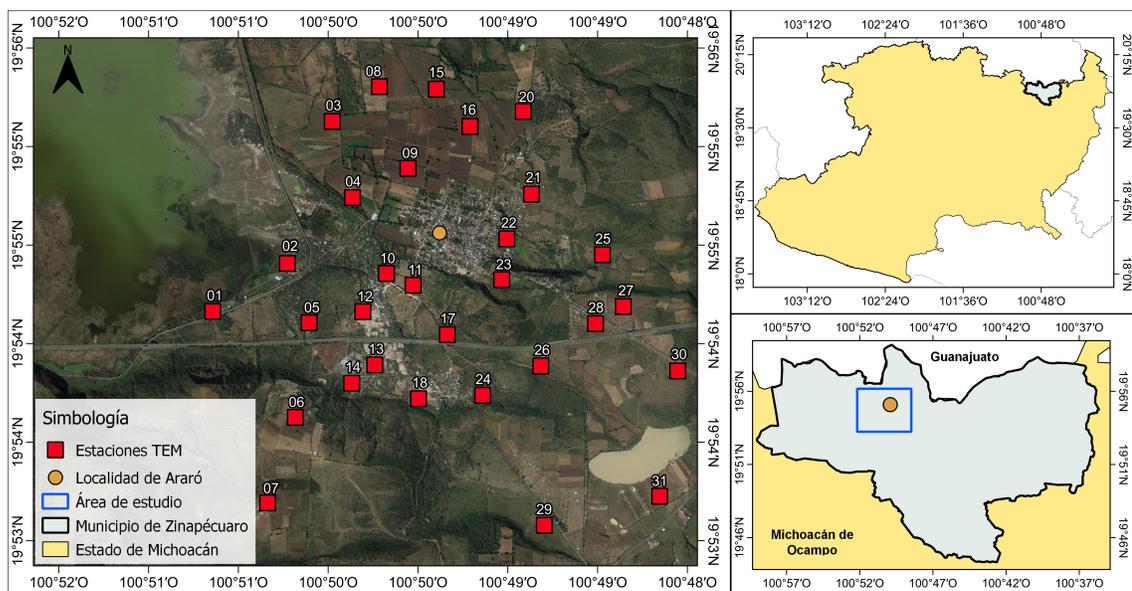
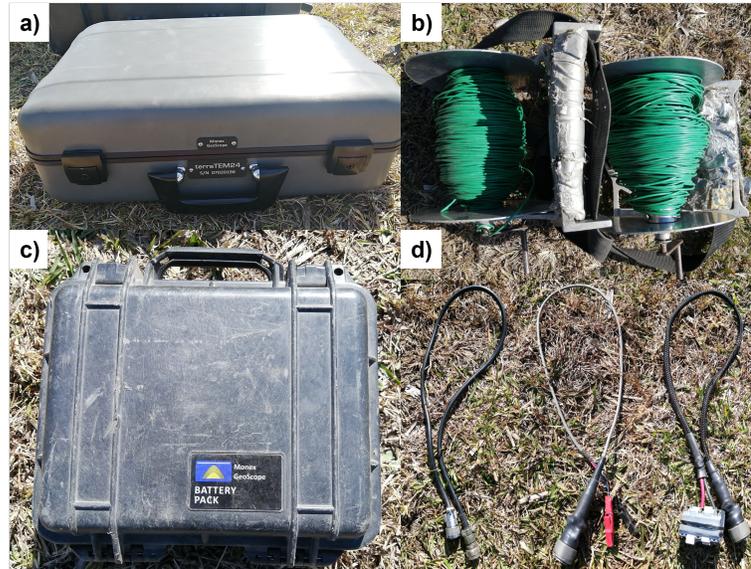


Figura 9. Ubicación de los sondeos TEM adquiridos en la zona de estudio.

#### 3.5.1. Instrumentación del TEM

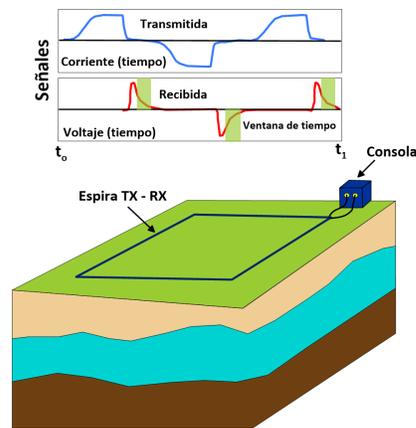
El equipo utilizado para la adquisición de los sondeos TEM fue un TerraTEM24 de la compañía Monex GeoScope, el cual fue proporcionado por el IPICYT. El equipo consta de una consola con una capacidad de salida de 50 a 120 V, una batería de 12 V, un cable receptor y transmisor que van conectados a la consola, y de carretes de cable que son utilizados para formar las bobinas cuadradas.



**Figura 10.** Equipo TerraTEM24. a) Consola receptora. b) Carretes de cable de bobina transmisora y receptora. c) Batería. d) Cable de alimentación de la consola, cable del receptor y cable del transmisor.

La adquisición de los datos consistió en formar una espira cuadrada, de 50 m x 50 m o de 100 m x 100 m, e inyectar una corriente eléctrica del orden de 7 a 14 A sobre la bobina transmisora colocada en la superficie de la Tierra. Después de cierto tiempo, esta corriente se apaga abruptamente generando corrientes inducidas denominadas Eddy, lo que produce un campo magnético secundario. La información es registrada por la bobina receptora como un decaimiento de voltaje (Fig. 11).

En cada sondeo se realizaron 5 corridas con diferentes ventanas de tiempo, con una ganancia de 1. El apilamiento de los sondeos variaba entre 64 y 128, dependiendo del ruido antropogénico. Es decir, en sitios con carreteras cercanas al sondeo o zonas más pobladas, el apilamiento era de 128 con el fin de reducir el ruido en los datos.



**Figura 11.** Funcionamiento del TEM con una configuración Single loop.

## Capítulo 4. Inversión de Datos

### 4.1. Inversión 1D

Previo a la inversión de los datos, se realizó una limpieza de estos, la cual fue mínima debido a que presentaban una calidad aceptable. Este proceso consistió en eliminar valores atípicos, u *outliers*, y depurar aquellos datos que alcanzaban el nivel de ruido ambiental registrado en cada sondeo (Fig. 12).

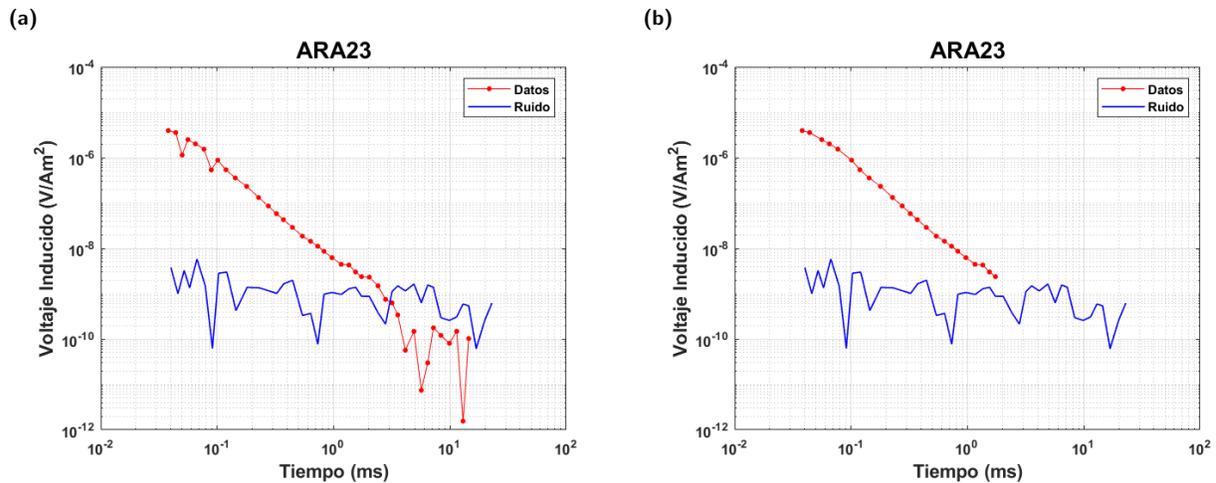


Figura 12. (a) Datos correspondientes al sitio ARA23. (b) Datos limpios.

Este procedimiento se llevó a cabo para los 30 sitios, y una vez que se depuraron los datos se procedió a realizar la inversión. Los resultados de las inversiones realizadas para cada sondeo se muestran en la siguiente sección.

#### 4.1.1. Datos TEM

Se realizó la inversión 1D de los datos adquiridos a partir de los esquemas de inversión tipo Occam y Marquardt. Primero se llevó a cabo la inversión tipo Occam, cuyos resultados fueron utilizados como modelo inicial para la inversión tipo Marquardt, realizada después.

#### 4.1.2. Resultados de la inversión tipo Occam y Marquardt

Los parámetros del modelo inicial de Occam consistieron de una resistividad de 100  $\Omega\text{m}$ , con un número de capas que variaba en algunos sondeos de 20 a 50 capas. El espesor de la primera capa era de 1 m y la profundidad de la última capa dependía del tamaño de espira transmisora utilizada en cada sondeo.

Para espiras de 50 m x 50 m las profundidades variaban de 150 a 200 m, mientras que para espiras de 100 m x 100 m, las profundidades eran de entre 250 y 300 m.

Una vez obtenidos los modelos de inversión tipo Occam se definió el modelo inicial que se utilizaría para la inversión tipo Marquardt. Los resultados de los modelos inversos de algunos sitios se muestran en la Figura 26(a-c). Las líneas verde y negra indican la primera y segunda derivada de la resistividad con respecto a la profundidad, respectivamente.

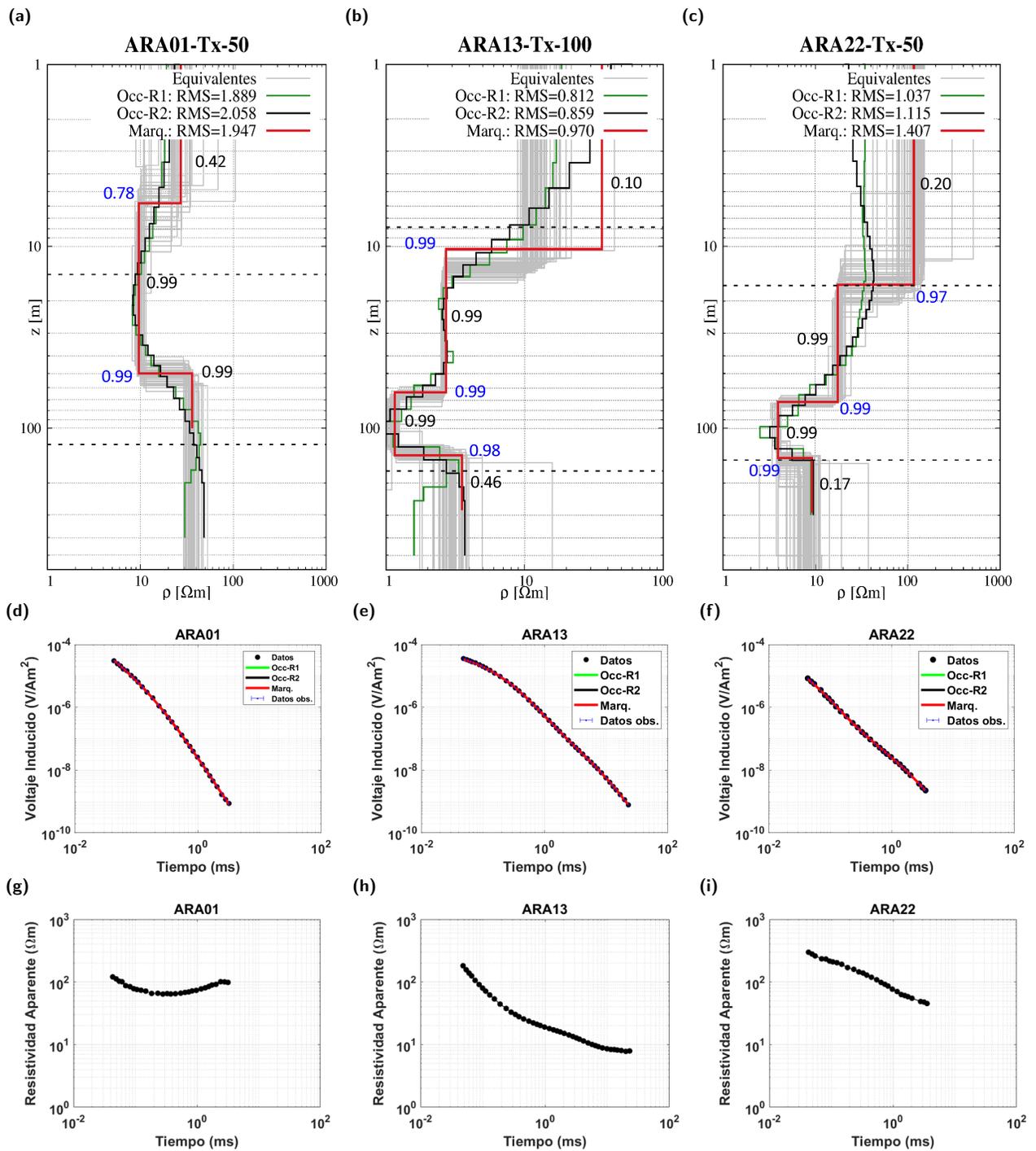
Por otro lado, la línea roja muestra el resultado de la inversión de Marquardt, mientras que las líneas grises indican los modelos equivalentes, éstas junto con los valores de importancia tanto de resistividad (números en negro) y de profundidad (números en azul) indican qué tan bien o mal resueltos se encuentran los parámetros del modelo, considerando que, si los modelos equivalentes no presentan gran variación y que los valores de importancia se encuentran cercanos a 1, los parámetros se encuentran bien resueltos (Ruiz Aguilar et al., 2018).

Asimismo, las líneas discontinuas negras indican las profundidades de investigación alcanzadas. Esto es, que a partir del promediado de resistividades mediante la fórmula de Spies (1989) y los valores de tiempos tempranos y tardíos de los datos se puede estimar la resolución tanto de los primeros metros como la profundidad de investigación máxima alcanzada a partir de la fórmula de Meju (1995).

Con lo anterior se pudo determinar que las capas superficiales no se pueden detectar debido al tamaño de espiras utilizadas, ya que las profundidades de difusión varían según el tamaño de espira transmisora y de la resistividad del subsuelo, tal como se denota en la fórmula de profundidad de difusión (Ec.17), alcanzando profundidades de investigación de entre 120 a 400 m.

Como resultado, en el sondeo ARA01 (Fig. 13a) se definieron 3 capas; la primera corresponde a una capa de  $\sim 27 \Omega\text{m}$  y aproximadamente 5 m de espesor, en la segunda capa la resistividad disminuye a  $10 \Omega\text{m}$  y alcanza una profundidad de 50 m, mientras que la resistividad de la tercera capa aumenta a  $\sim 40 \Omega\text{m}$ .

Además, se observa que los valores bajos de los parámetros de importancia tanto de resistividad como de espesor asociados a la primera capa, concuerda con la variación de los modelos equivalentes, indicando que esta primera capa no está bien resuelta, a diferencia de la segunda y tercera capa cuyos valores son muy cercanos a 1 y los modelos equivalentes no presentan mucha variación. Lo anterior puede asociarse a que esta primera capa no puede detectarse, de acuerdo a la profundidad de investigación estimada para el tiempo temprano y por los tamaños de espira.



**Figura 13.** (a-c) Modelos inversos tipo Occam R1 y R2 (verde y negro), Marquardt (rojo), modelos equivalentes (gris) y parámetros de importancia (números en negro y azul) de los sondeos ARA01, ARA13 Y ARA22. (d-f) Ajuste entre datos calculados y datos observados de los sondeos ARA01, ARA13 y ARA22. (g-i) Transformación de resistividad aparente en tiempo tardío de los sondeos ARA01, ARA13 y ARA22.

En el sondeo ARA13 (Fig. 13b), se definieron 4 capas; la primera tiene una resistividad de  $\sim 40 \Omega\text{m}$  y un espesor de 10 m, la segunda capa disminuye su resistividad a  $2 \Omega\text{m}$  alcanzando una profundidad de  $\sim 60$  m, la tercera capa disminuye ligeramente su resistividad a  $1 \Omega\text{m}$  y se extiende hasta 140 m de profundidad, mientras que la cuarta capa aumenta ligeramente su resistividad a  $3 \Omega\text{m}$ . En este caso, los

parámetros de resolución del modelo no están bien resueltos para la primera capa, ya que el valor de importancia de resistividad es mucho menor a 1 y los modelos equivalentes varían considerablemente. Los valores de importancia y los modelos equivalentes de la segunda y tercera capa indican que los parámetros del modelo se encuentran bien resueltos ya que los valores de importancia son cercanos a 1 y no hay gran variación de los equivalentes. La cuarta capa presenta un valor pequeño de importancia para la resistividad y los equivalentes varían, indicando que esta última capa no está bien resuelta.

Se definieron 4 capas para el sondeo ARA22 (Fig. 13c), presentando la primera capa una resistividad de  $\sim 120 \Omega\text{m}$  con un espesor de  $\sim 20$  m, disminuyendo la resistividad en la segunda capa a  $\sim 20 \Omega\text{m}$  y alcanzando una profundidad de 71 m, mientras que para la tercera capa su resistividad disminuye a  $4 \Omega\text{m}$  y se extiende hasta  $\sim 150$  m de profundidad, en la cuarta capa la resistividad aumenta ligeramente a  $\sim 10 \Omega\text{m}$ . Como en el sondeo anterior, de acuerdo con los valores de importancia y los modelos equivalentes de este sondeo, se observa que tanto la primera capa como la última no se encuentran bien resueltas.

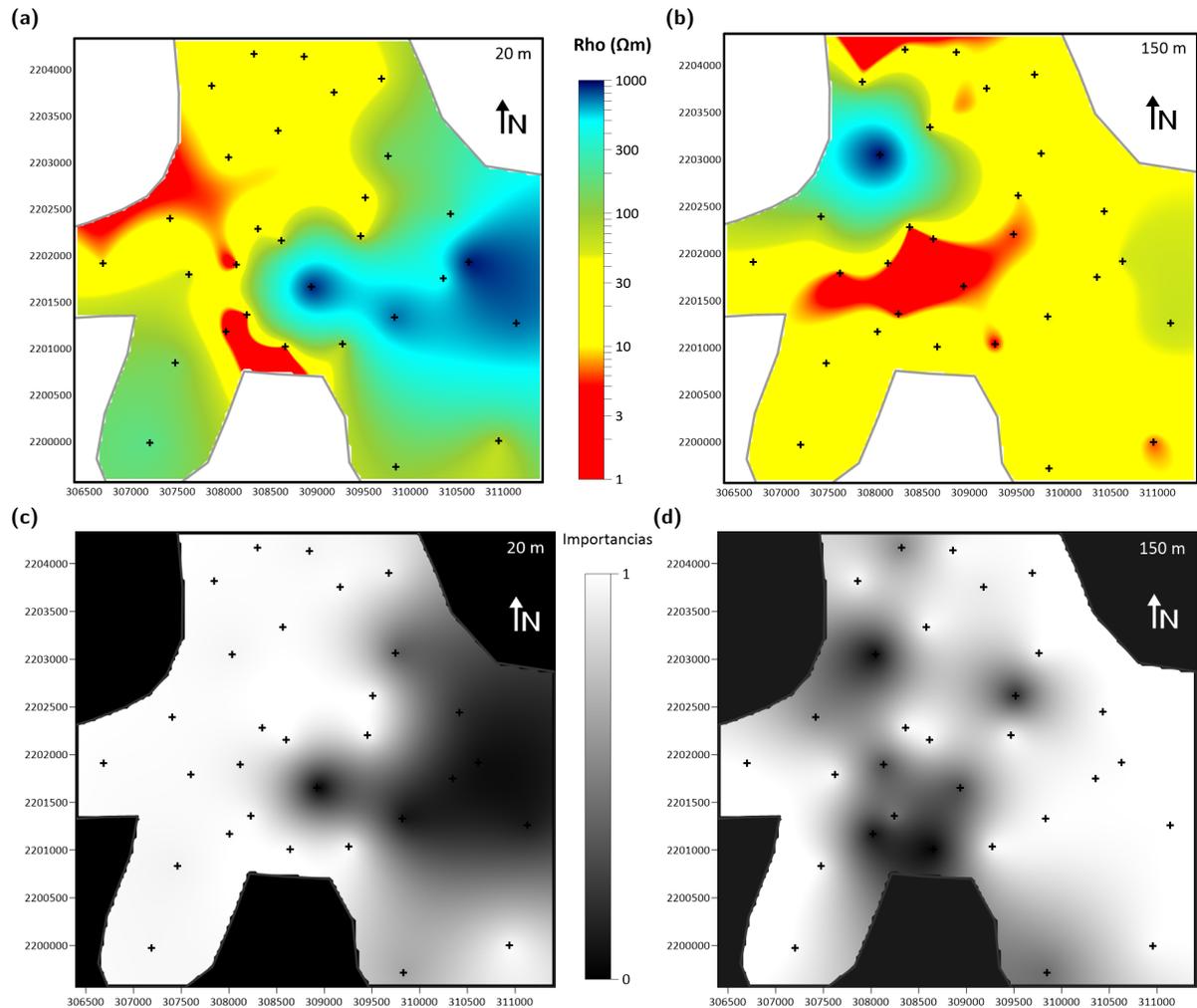
Además de los modelos de inversión, en la Figura 26(d-f) se muestra el ajuste de los datos calculados con los datos observados, así como los errores asociados a los datos observados. Se observa que los datos calculados tienen un buen ajuste sobre los datos observados, lo que indica que los modelos obtenidos son aceptables. Mientras que en 26(g-i), se observan las curvas de las transformaciones de resistividad aparente en tiempo tardío, las cuales son de ayuda para la elección de un buen modelo inicial al realizar la inversión de Marquardt. Lo anterior se ejemplifica en 26(g) con el sitio ARA01, en donde la curva de resistividad indica un modelo de 3 capas, siendo la primera capa resistiva, la segunda capa conductora y la tercer capa resistiva, como se muestra en 26(a).

Por otra parte, en la Figura 14(a-b) se muestran cortes de resistividad a profundidades de 20 y 150 m para todos los sondeos. Lo anterior se obtuvo a partir de la interpolación de tipo Krigging, de la información obtenida de los modelos de inversión de Marquardt.

En la Figura 14(a) se observan resistividades de 10 a 40 m hacia la parte Norte, mismas que se extienden al centro del corte, mientras que hacia la parte Sur y Oeste las resistividades disminuyen entre 1 y  $3 \Omega\text{m}$ , la parte Este presenta un aumento en la resistividad la cual alcanza valores cercanos a los  $1000 \Omega\text{m}$ . Por otro lado, en 14(c) se muestran los valores de importancia de las resistividades asociadas a esa profundidad de 20 m, recordando que valores cercanos a 1 indican que los parámetros, en este caso de resistividad, se encuentran bien resueltos.

En este sentido, dado que los valores de importancia son cercanos a 1, se concluye que el parámetro de resistividad se encuentra bien resuelto a excepción de algunos sitios ubicados en la parte Este del corte,

en donde los valores de importancia son bajos, esto se debe a que el método Transitorio Electromagnético no es tan sensible a capas resistivas como lo es a capas conductoras.



**Figura 14.** (a-b) Corte de resistividad de todos los sondeos a 20 y 150 m de profundidad, respectivamente. (c-d) Corte de valores de importancia de todos los sondeos a 20 y 150 m de profundidad. Las cruces indican la ubicación de cada sondeo.

En 14(b), las resistividades de 10 a 40  $\Omega m$  se extiende en casi todo el corte, mientras que un sondeo al Noroeste, la resistividad aumenta a casi 1000  $\Omega m$ , en el centro del corte las resistividades son <math>< 10 \Omega m</math>. En 14(d), las importancias con valores pequeños se asocian a aquellos sondeos que presentan valores de resistividad alta, como el sondeo situado al Noroeste o a sondeos con un tamaño de espira transmisora de 50 x 50 m, como los sondeos situados en la zona conductora al centro-sur del corte, indicando que a una profundidad de 150 m, ya no se alcanza a definir muy bien esta capa, por lo que este parámetro de resistividad no se encuentra bien resuelto.

## Capítulo 5. Discusión e interpretación de resultados

### 5.1. Interpretación de los modelos de inversión TEM

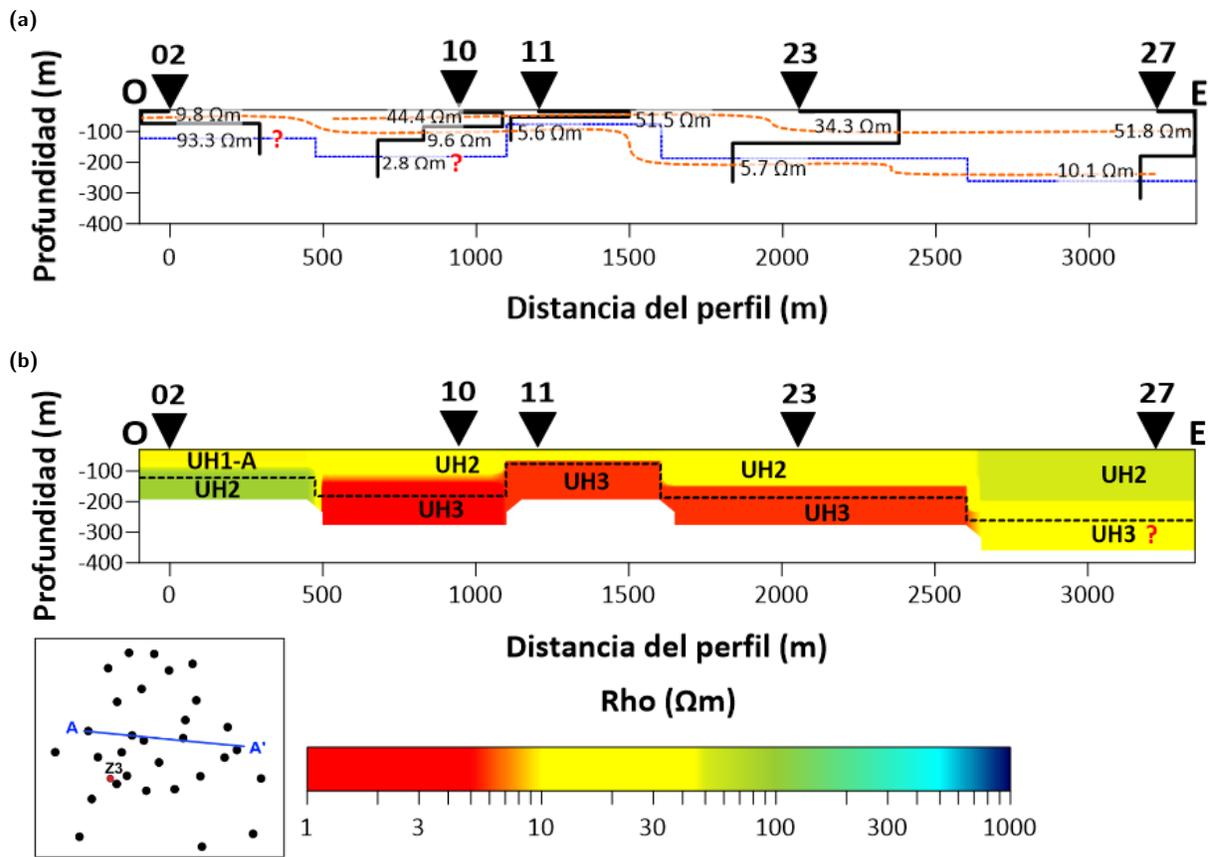
La interpretación de los sondeos TEM se basa en información geológica e hidrogeológica de la zona de estudio. Además, también se hará uso de información de un pozo litológico ubicado dentro del área de adquisición de los datos para correlacionarlo con un sondeo cercano.

De manera general, se identifican principalmente cuatro unidades geoelectricas. La unidad U1 comprende resistividades de 6 a 25  $\Omega\text{m}$ , y se relaciona con dos unidades hidrogeológicas: UH1-A y UH1. La primera unidad se asocia a sedimentos lacustres saturados, mientras que la unidad UH1 se asocia a la zona no saturada conformada por arenas y arcillas. Por otra parte, la unidad geoelectrica U2 es la capa asociada al acuífero que está compuesto por basaltos y tobas. Las resistividades de esta unidad son de 25 a 95  $\Omega\text{m}$ . La unidad geoelectrica U3 que está integrada por las unidades hidrogeológicas UH3-A y UH3, corresponden a capas con resistividades  $< 6 \Omega\text{m}$ . La unidad UH3-A se asocia al acuífero mezclado con fluidos geotérmicos y con contenido de depósitos hidrotermales, mientras que la segunda unidad se asocia a la capa arcillosa, producto de la alteración hidrotermal que podría estar actuando como un acuitardo. Finalmente, la unidad geoelectrica U4 cuya resistividad es  $> 100 \Omega\text{m}$ , se compone de las unidades hidrogeológicas UH4-A y UH4 que se asocian a rocas volcánicas. La primera unidad corresponde a tobas, riolitas y andesitas basálticas y la segunda unidad se asocia a rocas más compactas que actúan como el basamento del acuífero. Lo anterior se resume en la Tabla 1.

**Tabla 1.** Unidades geoelectricas e hidrogeológicas.

| Unidad geoelectrica | Resistividad ( $\Omega\text{m}$ ) | Unidad hidrogeológica | Descripción   |
|---------------------|-----------------------------------|-----------------------|---|
| U1                  | 6 - 25                            | UH1-A                 | Sedimentos lacustres saturados.                           |
|                     |                                   | UH1                   | Zona no saturada. Material areno-arcilloso.               |
| U2                  | 25 -95                            | UH2                   | Acuífero. Basaltos y tobas.                               |
| U3                  | $< 6$                             | UH3-A                 | Acuífero mezclado con fluidos geotérmicos.                |
|                     |                                   | UH3                   | Capa arcillosa, producto de alteración hidrotermal.       |
| U4                  | $> 100$                           | UH4-A                 | Rocas volcánicas. Tobas, riolitas y andesitas basálticas. |
|                     |                                   | UH4                   | Basamento del acuífero. Rocas volcánicas compactas.       |

En la Figura 15 se muestra el perfil A que comprenden los sondeos ARA02, ARA10, ARA11, ARA23 y ARA27. Dado que no hay gran cobertura de sondeos a lo largo del perfil y el espaciamiento entre sondeos es grande, la resolución lateral al realizar la interpolación, es baja. Debido a ello, también se suelen elaborar perfiles como el de la Figura 15(a) en donde las líneas naranjas discontinuas unen a las capas con valores de resistividades similares.



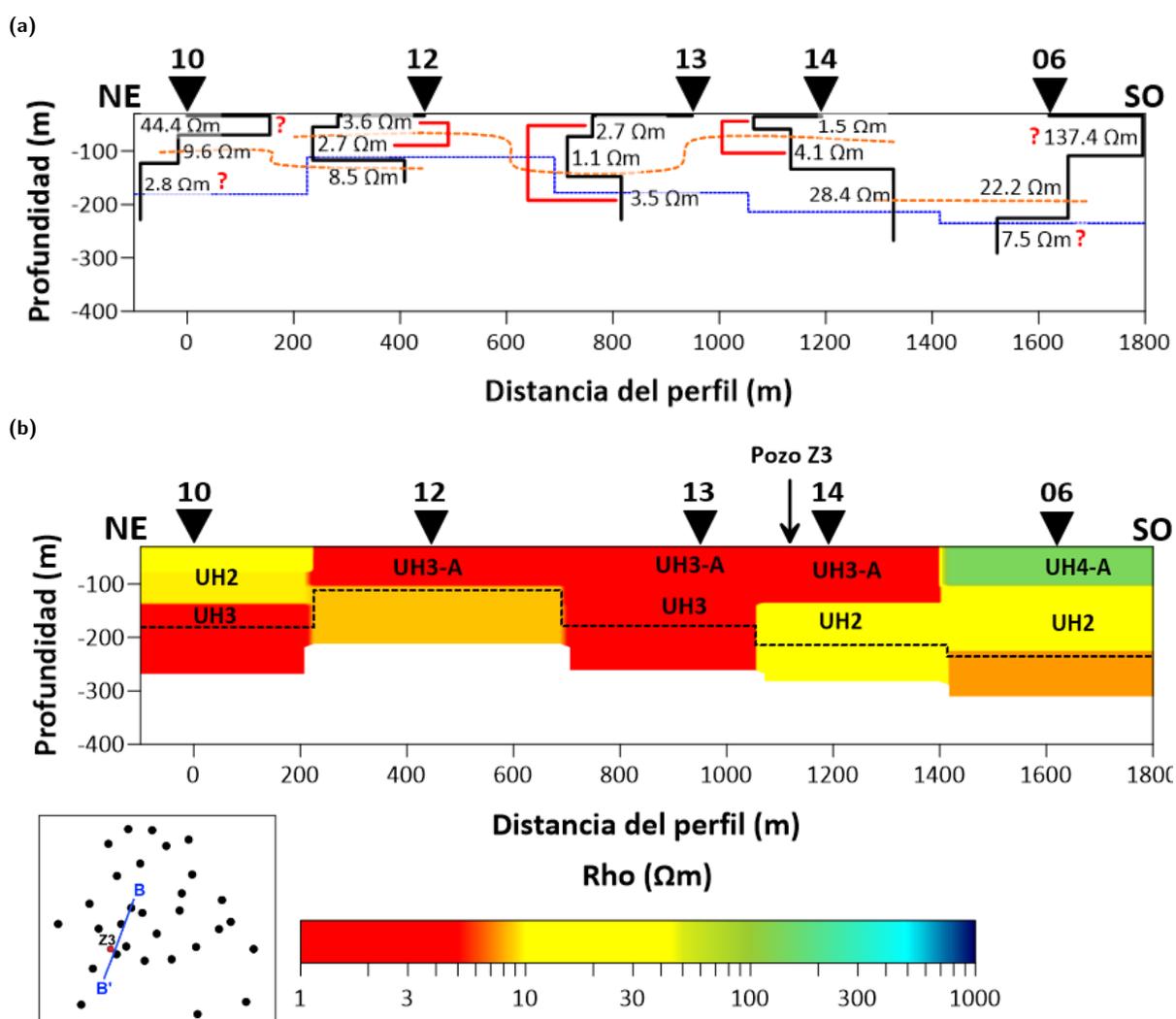
**Figura 15.** (a) Perfil 2D de los modelos inversos de los sondeos ARA02, ARA10, ARA11, ARA23 y ARA27. La línea azul discontinua representa la profundidad de investigación.(b) Pseudo-sección 2D de los modelos inversos de los sondeos ARA02, ARA10, ARA11, ARA23 y ARA27. La línea negra discontinua representa la profundidad de investigación.

El sondeo ARA02 (Fig. 15b) se encuentra en la cercanía del lago de Cuitzeo, por lo que a la primera capa, cuyo espesor es de  $\sim 80$  m, se le asignó la unidad hidrogeológica UH1-A que se asocia a sedimentos lacustres provenientes del lago, los cuales se encuentran saturados y que correspondería a la unidad semipermeable. Lo anterior puede corroborarse con lo reportado por Viggiano y Gutiérrez (2003), quienes indican que el acuífero superficial del valle de Araró se compone de fragmentos clásticos y de sedimentos lacustres, con un espesor que varía de los 100 a los 200 m. Además de que el nivel freático varía en profundidad de 0 a 25 m, aflorando en el lago de Cuitzeo. Asimismo, CONAGUA (2020) reporta que el acuífero en su parte inferior, está compuesto de rocas volcánicas como basaltos y riolitas, y hacia la zona del lago de Cuitzeo, por sedimentos arcillosos y brechas andesíticas. Dado lo anterior, a la segunda capa del sondeo 02 se le asigna la unidad hidrogeológica UH2.

Por otra parte, los sondeos ARA10, ARA11, ARA23 y ARA27 (Fig. 15b) que se encuentran más alejados del lago, presentan una primera capa con mayor resistividad, por lo que se trata de una unidad permeable asociada al acuífero y se le asigna la unidad hidrogeológica UH2. Los espesores de esta capa varían de

los 40 a 70 m para los sondeos ARA10 y ARA11, y de 120 a 170 m para los sondeos 23 y 27. Seguido de esta primer capa, se presenta un segunda capa más conductora, a la cual se le asigna la unidad UH3 que se asocia a la capa arcillosa que es producto de la alteración hidrotermal, y que a su vez podría estar actuando como un acuitardo. Lo anterior, debido a que los sondeos se encuentran en la cercanía de la zona de alteración hidrotermal, además de que atraviesa la falla Huingo sobre el perfil.

La Figura 16 muestra el perfil B que comprenden los sondeos ARA10, ARA12, ARA13, ARA14 Y ARA06. Este perfil atraviesa la zona de alteración hidrotermal con una orientación NE-SO. También, se indica la ubicación del pozo litológico Z3 reportado por Viggiano y Gutiérrez (2003), el cual se describirá más adelante.



**Figura 16.** (a) Perfil 2D de los modelos inversos de los sondeos ARA10, ARA12, ARA13, ARA14 Y ARA06. La línea azul discontinua representa la profundidad de investigación.(b) Pseudo-sección 2D de los modelos inversos de los sondeos ARA10, ARA12, ARA13, ARA14 Y ARA06. La línea negra discontinua representa la profundidad de investigación.

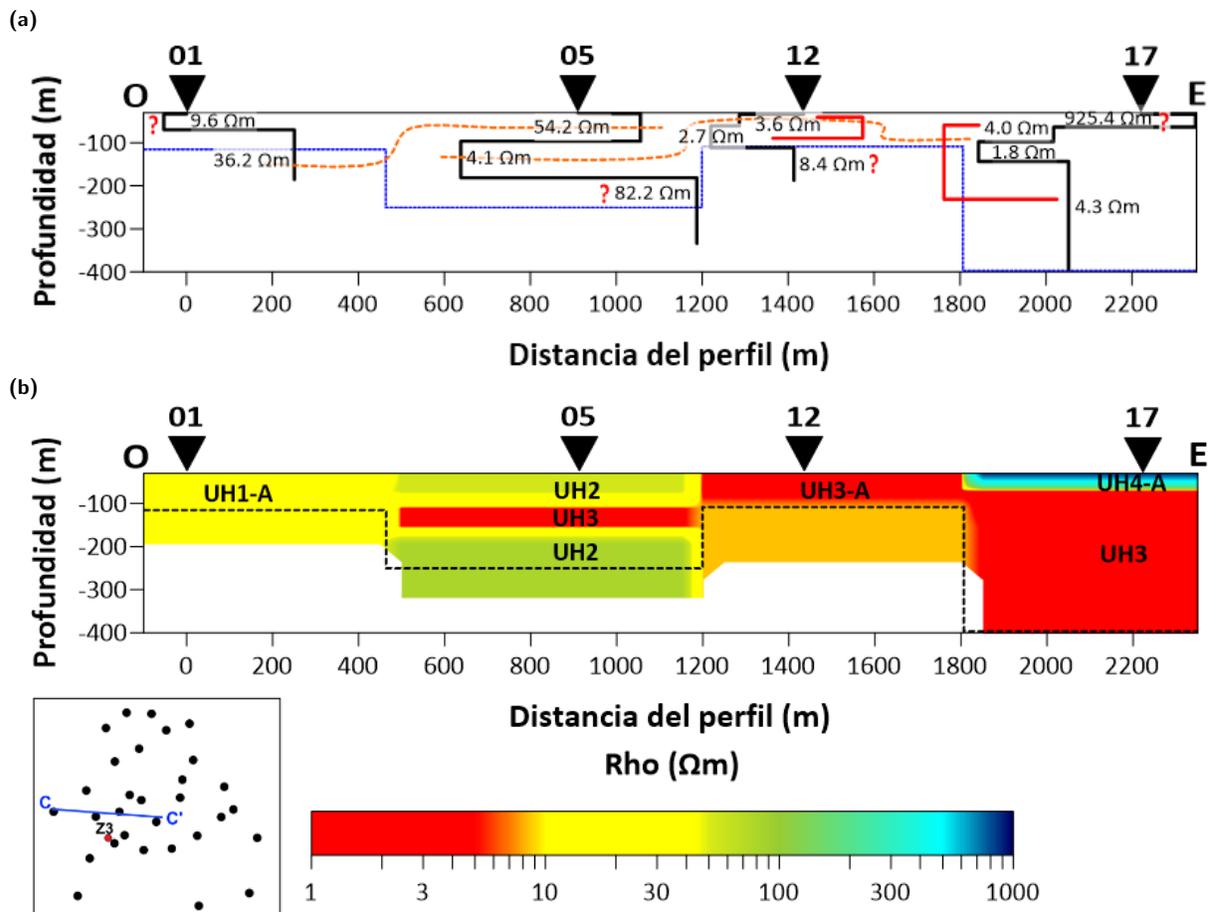
Se observa que los sondeos ARA12, ARA13 y ARA14 (Fig. 16b) que se sitúan dentro de la zona de alteración hidrotermal, presentan una unidad conductora desde los primeros metros hasta alcanzar una profundidad de 160 m, para el caso del sondeo ARA14. A esta zona conductora se le asignó la unidad hidrogeológica UH3-A que está asociada al acuífero mezclado con fluidos geotérmicos, dado que en esta zona se encuentran manifestaciones hidrotermales en forma de manantiales de agua caliente. A medida que se profundiza, las resistividades aumentan ligeramente, lo que indica la presencia del acuífero compuesto por basaltos y tobas (unidad UH2), tal como se observa en el sondeo ARA14 y ARA06. Los espesores de esta unidad son de entre 80 y 120 m, respectivamente. Además, en el sondeo 06 se observa una unidad semipermeable de mayor resistividad denominada UH4-A, la cual se asocia a rocas volcánicas fracturadas.

En la Figura 17 se muestra el perfil C que comprende los sondeos ARA01, ARA05, ARA12 y ARA17 con una orientación O-E.

Dado que el sondeo ARA01 se localiza en las inmediaciones del lago, se presenta una primera capa de baja resistividad con un espesor de  $\sim 50$  m, que se asocia a una unidad semipermeable de sedimentos lacustres saturados. Seguido de esta primera capa, se encuentra otra capa con una resistividad mayor que alcanza una profundidad de  $\sim 120$  m. Ésta se asocia a la unidad permeable que representa al acuífero.

En el sondeo ARA05, se observa que la unidad hidrogeológica UH2 que se asocia al acuífero, presenta un espesor de  $\sim 90$  m, seguido de la unidad conductora UH3 cuyo espesor es de 90 m y que se asocia a la capa arcillosa de alteración hidrotermal. Por otra parte, se logra definir el acuífero profundo situado a  $\sim 180$  m de profundidad. Y, como se mencionó anteriormente, en el sondeo ARA12 se asignó la unidad hidrogeológica UH3-A, dado que se sitúa en la zona de alteración hidrotermal.

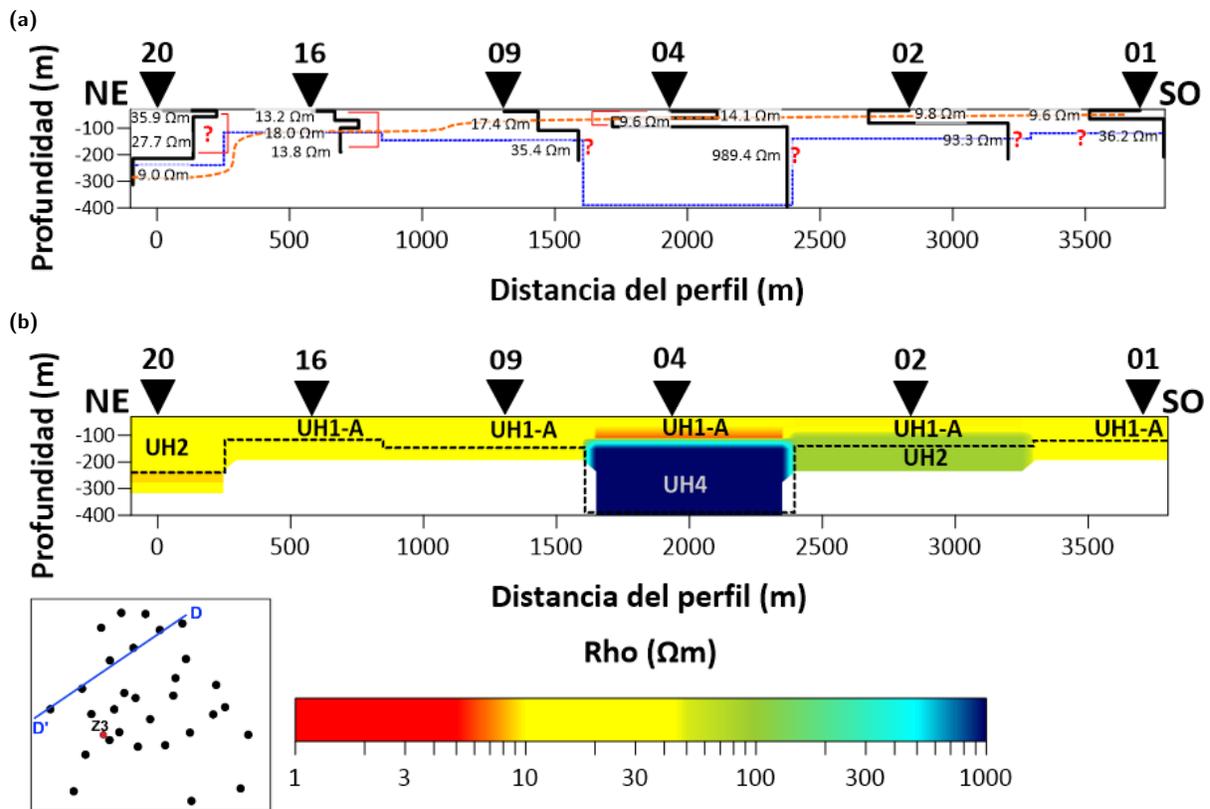
Finalmente, en el sondeo ARA17 se observa una zona de alta resistividad con un espesor de 40 m, a la que se le asigna la unidad hidrogeológica U4H-A. En la Fig. 17(a), se observa que después de la primera capa resistiva, hay 3 capas conductoras, que por sus valores similares de resistividad se asocian a una misma unidad hidrogeológica denominada UH3.



**Figura 17.** (a) Perfil 2D de los modelos inversos de los sondeos ARA01, ARA05, ARA12 y ARA17. La línea azul discontinua representa la profundidad de investigación.(b) Pseudo-sección 2D de los modelos inversos de los sondeos ARA01, ARA05, ARA12 y ARA17. La línea negra discontinua representa la profundidad de investigación.

Por otra parte, en la Figura 18, se muestra el perfil D con orientación NE-SO, que comprende los sitios ARA20, ARA16, ARA09, ARA04, ARA02 y ARA01.

Se observa que de acuerdo a las resistividades presentadas en el sondeo ARA20 se asignó la unidad hidrogeológica UH2 asociada a la capa permeable que representa al acuífero (Fig. b). Mientras que a los demás sondeos se les asigna una primera unidad UH1-A que se asocia a sedimentos lacustres que se encuentran saturados, los espesores varían de 60 a 120 m. Esto se correlaciona con la información reportada en Viggiano y Gutiérrez (2003), por lo que se determina que el acuífero somero en Araró se encuentra contenido en sedimentos lacustres. Finalmente, en el sondeo ARA04 se logra definir el basamento del acuífero a una profundidad  $\sim 100$  m, por lo que se le asigna la unidad UH4.

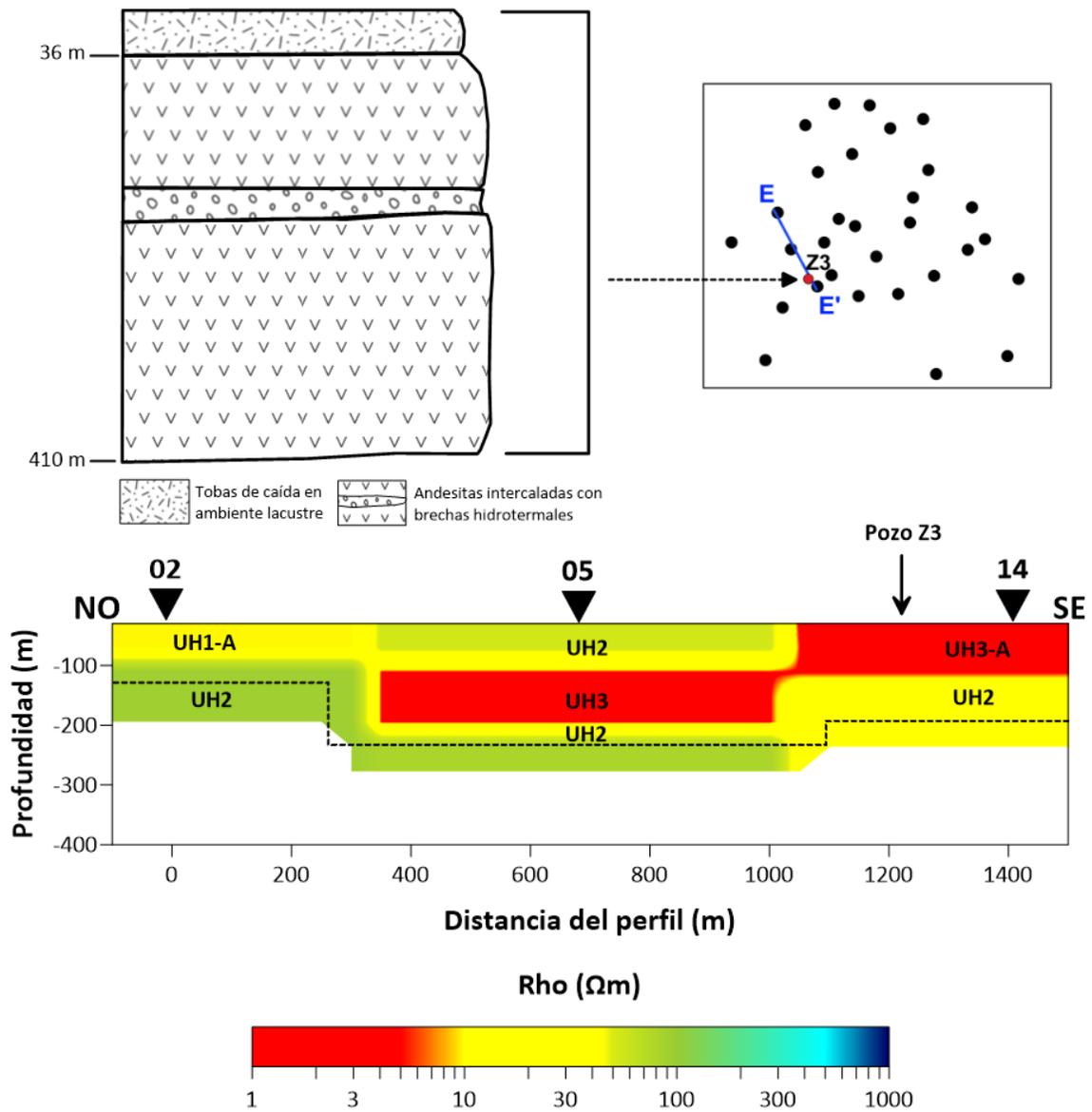


**Figura 18.** (a) Perfil 2D de los modelos inversos de los sondeos ARA20, ARA16, ARA09, ARA04, ARA02 y ARA01. La línea azul discontinua representa la profundidad de investigación. (b) Pseudo-sección 2D de los modelos inversos de los sondeos ARA20, ARA16, ARA09, ARA04, ARA02 y ARA01. La línea negra discontinua representa la profundidad de investigación.

En la Figura 19, se muestra el perfil E con orientación NO-SE. Este perfil comprende los sitios ARA02, ARA05 y ARA14. También, se indica la ubicación del pozo litológico Z3 así como la litología hasta una profundidad de 410 m.

El pozo Z3 alcanza una profundidad de 1344 m y se localiza dentro de la zona de alteración hidrotermal, y a aproximadamente 800 m al occidente de San Nicolás Simirao. Los primeros 36 m corresponden a tobas de caída depositadas en ambiente lacustre, después le sigue un paquete de 374 m de espesor de andesitas con intercalaciones de brechas hidrotermales. A los 410 m de profundidad se encontraron basaltos de augita y olivino y después aparecen de nuevo las andesitas con intercalaciones de brechas hidrotermales, alcanzando profundidades de 939 m. Seguido de este paquete, se encuentran tobas líticas y vítreas con intercalaciones de brechas hidrotermales con un espesor de 201 m. Por último, a los 1140 m se reportan andesitas porfídicas de augita.

Dada la información del pozo litológico, la capa conductora a la que se le asigna la unidad hidrogeológica UH3-A (Fig. 19), se asocia con la capa de andesitas intercaladas con brechas hidrotermales del pozo Z3.



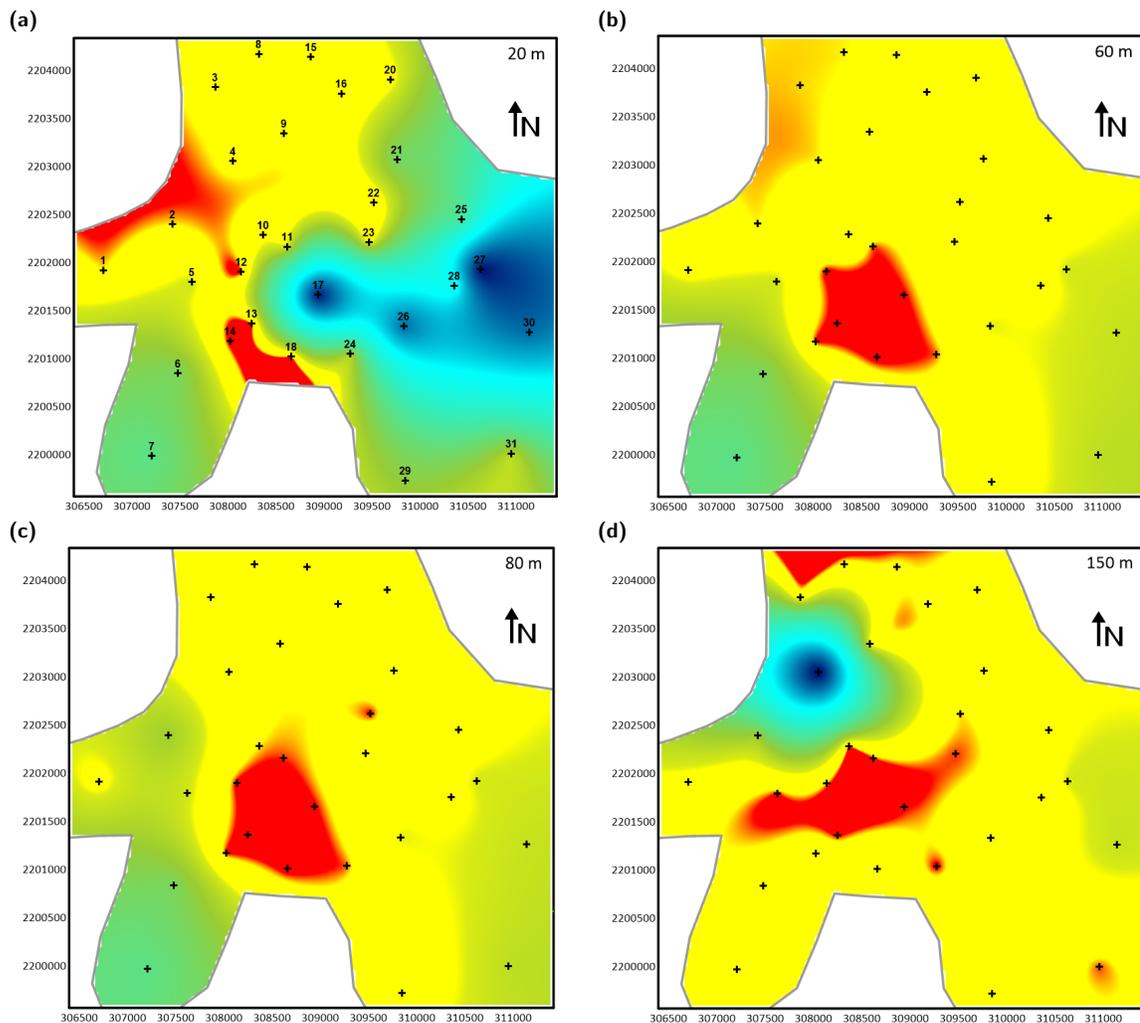
**Figura 19.** Pseudo-sección 2D de los sitios ARA02, ARA05 y ARA14. Pozo litológico reportado por Viggiano y Gutiérrez (2003).

Y, como se mencionó anteriormente, esta unidad contiene al acuífero mezclado con fluidos geotérmicos que se encuentra conformado de material alterado hidrotermalmente, cuyo espesor es de  $\sim 160$  m.

Hacia el Oeste, se observan en los primeros 20 m (Fig. 20a) resistividades de  $\sim 10 \Omega\text{m}$ , lo que se asocia a sedimentos lacustres que se encuentran saturados, debido a que estos sitios se encuentran en las cercanías del lago de Cuitzeo.

El cuerpo conductor situado en la parte Centro-Sur, con resistividades de entre 1 a 3  $\Omega\text{m}$ , se asocia a que estos sitios se encuentran dentro de la zona de alteración hidrotermal, lo que indica la presencia de un acuífero mezclado con material alterado hidrotermalmente.

Por otra parte, en la Figura 20 se observan diferentes cortes de resistividad a profundidades de 20, 60, 80 y 150 m.



**Figura 20.** (a-d) Cortes de resistividad de todos los sondeos TEM a profundidades de 20, 60, 80 y 150 m.

Hacia la parte Este del corte, se tiene una zona muy resistiva, cercana a los  $1000 \Omega\text{m}$ , que se asocia a rocas volcánicas como tobas riolíticas y andesitas basálticas, cuyas unidades afloran en esta zona según lo reportado por Viggiano y Gutiérrez (2003). Los valores de resistividades de  $25$  a  $95 \Omega\text{m}$  se asocian a la unidad permeable del acuífero que se encuentra contenido sobre basaltos y tobas o por sedimentos lacustres, como la representada en la parte Centro-Norte del corte.

A los 60, 80 y 150 m de profundidad (Fig. b-d), se mantiene el conductor situado en la parte Centro-Sur de los cortes. Esto se asocia a la zona de alteración ya que los sondeos de la parte conductora se encuentran dentro o cercanos a esta zona. Por su parte, estas bajas resistividades se asocian a una mezcla del acuífero con los fluidos geotérmicos que ascienden a través de las fallas locales. Y, a medida que se

profundiza, la zona conductora se asocia a la capa arcillosa que es producto de la alteración hidrotermal. Otro factor que se podría correlacionar con estas bajas resistividades es debido a la salinidad del agua, ya que los manantiales de agua caliente situados en esta zona, presentan altas concentraciones de sales, puesto que el agua caliente tiende a disolver los minerales de las rocas. En este sentido, se podría inferir que el acuífero en ésta área de alteración podría tratarse de un acuífero de agua salada.

## 5.2. Integración de resultados

En julio y diciembre del año 2021, se realizó un muestreo de aguas en pozos y norias situados en el área de estudio. Por lo que se realizó una integración de esta información con los resultados de resistividad obtenidos de la inversión, a una profundidad de 40 m.

A continuación, se muestra la representación de la información de algunos parámetros fisico-químicos medidos, como son los Sólidos Disueltos Totales (SDT), Conductividad Eléctrica (CE) y Temperatura.

En la Figura 21 se observa el mapa de resistividad y los valores de SDT. Para ello, se basó en el Criterio Ecológico de Calidad del Agua CE-CCA-001/89, publicado por la SEMARNAT (2008), el cual indica los niveles máximos permitidos de ciertos parámetros con fines de riego agrícola (Tabla 2).

**Tabla 2.** Criterios de calidad del agua: Niveles máximos permitidos.

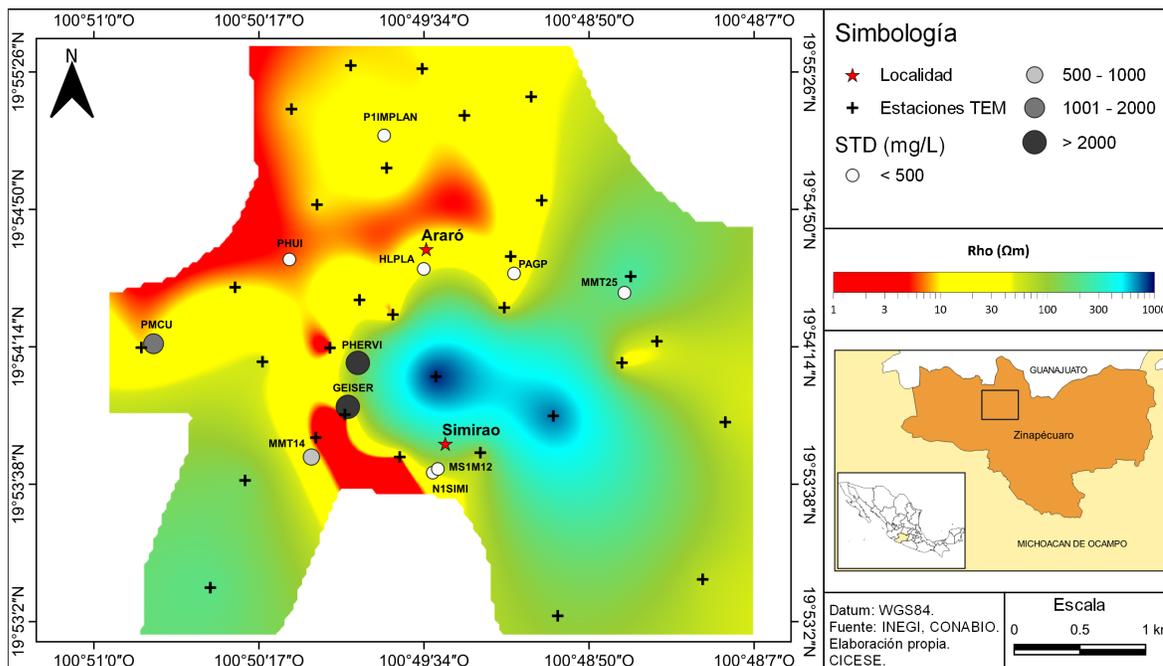
| Valores de SDT (mg/L) | Descripción   |
|-----------------------|---|
| 500                   | Sin efectos nocivos en ningún cultivo               |
| 500 - 1000            | Cultivos sensibles                                  |
| 1000 - 2000           | Cosechas con manejo especial                        |
| 2000 - 5000           | Cultivos de plantas tolerantes en suelos permeables |

En este caso, sólo se presenta el valor de SDT y como se indica en el mapa, las muestras situadas al Sur del corte, presentan los valores más altos mientras que las muestras de los pozos hacia el Norte del corte, presentan valores que son  $< 500$  mg/L, indicando que el agua que se utilice en sitios cercanos a estos pozos y norias, no van a afectar a los diferentes cultivos.

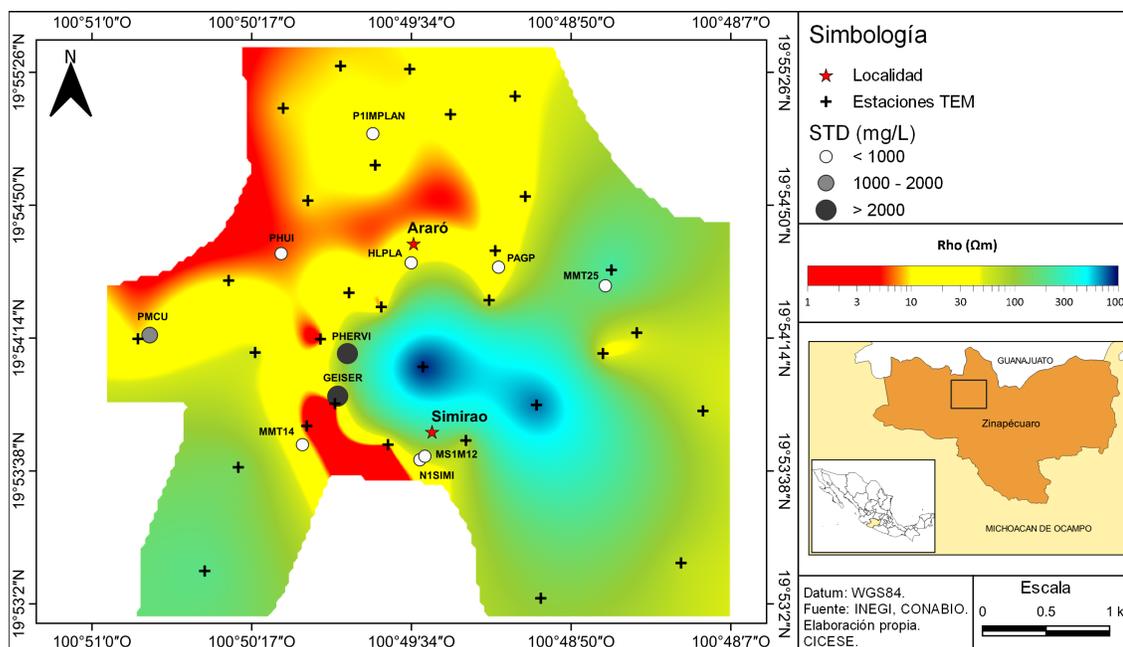
Además, los SDT también permiten evaluar la salinización de las aguas subterráneas. De acuerdo con CONAGUA (2019), debido a la concentración de SDT, las aguas subterráneas se clasifican en dulces ( $< 1000$  mg/L), ligeramente salobres (1000 – 2000 mg/L), salobres (2000 – 10000 mg/L) y salinas ( $> 10000$  mg/L).

En el mapa de la Figura 22 se observa que las muestras de los pozos GEISER y PHERVI se clasifican como salobres porque presentan valores de SDT  $> 2000$  mg/L. Lo anterior se corrobora por lo propuesto

por Vigil Barrientos (2017), quien determinó que las aguas de ciertos manantiales geotérmicos cercanos a estos puntos, presentaban altas concentraciones de sales.



**Figura 21.** Mapa de resistividad a 40 m de profundidad. Se representan también los valores de STD de los pozos y norias muestreados, de acuerdo al Criterio Ecológico de Calidad del Agua (SEMARNAT, 2008).



**Figura 22.** Mapa de resistividad a 40 m de profundidad. Se representan también los valores de STD de los pozos y norias muestreados, de acuerdo a la clasificación de aguas subterráneas (CONAGUA, 2019).

Por otra parte, el agua posee una CE debido al contenido de iones que la componen, los cuales provienen de sales disueltas y materiales inorgánicos (Sengupta, 2017). Por lo anterior, es posible estimar la salinidad

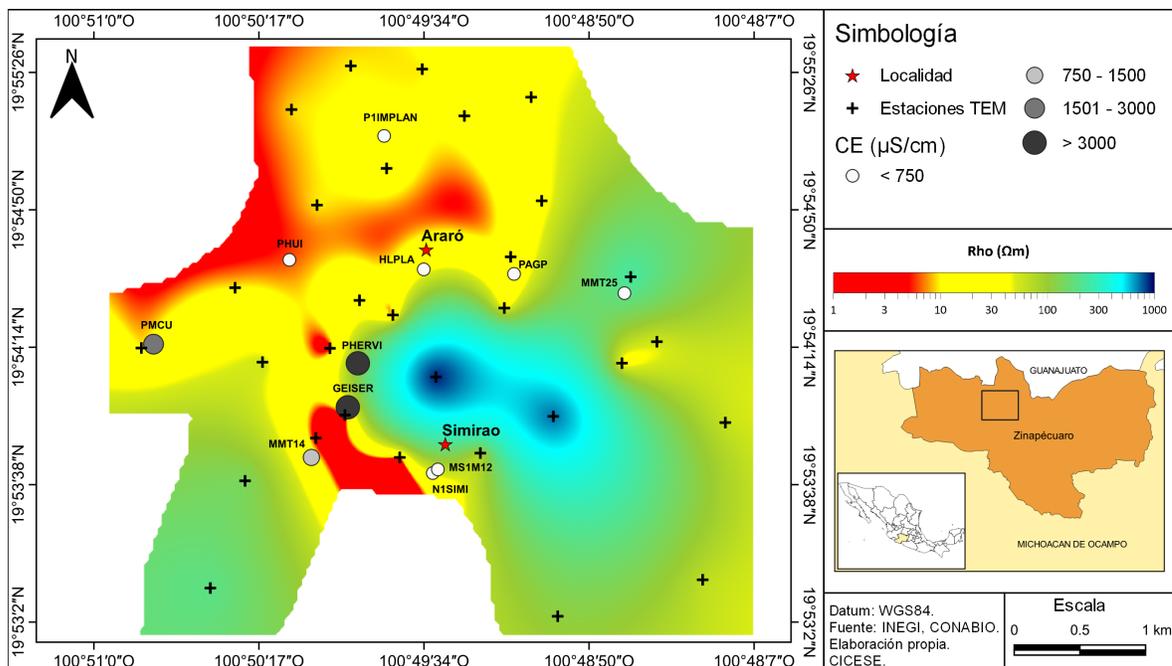
de las aguas con fines de riego agrícola debido a la relación de CE y la concentración total de sales.

En este sentido, Richards en 1954 desarrolló un sistema para alertar del peligro de salinización o sodificación del suelo a partir de ciertos parámetros medidos en el agua. En la Tabla 3 se presenta una modificación de la clasificación propuesta inicialmente por Richards (1954). En la Figura 23 se observa el mapa de resistividad a 40 m de profundidad y los valores de CE.

**Tabla 3.** Modificación de la clasificación propuesta por el comité de Consultores de la Universidad de California para Dirección de Calidad del agua en 1972 (Olías et al., 2005).

| CE ( $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) | Riesgo de Salinidad |
|--------------------------------|---------------------|
| < 750                          | Bajo                |
| 750 - 1500                     | Medio               |
| 1500 - 3000                    | Alto                |
| > 3000                         | Muy Alto            |

En el mapa (Fig. 23) se observa que el riesgo de salinidad en los pozos PHERVI y GEISER es muy alto, pues los valores de CE son  $> 3000 \mu/\text{cm}$ . Lo anterior se puede relacionar con los valores bajos de resistividad ( $\sim 3\Omega\text{m}$ ) de los sondeos TEM que se sitúan en las cercanías de ambos pozos y con la clasificación propuesta por CONAGUA (2019) para los SDT.



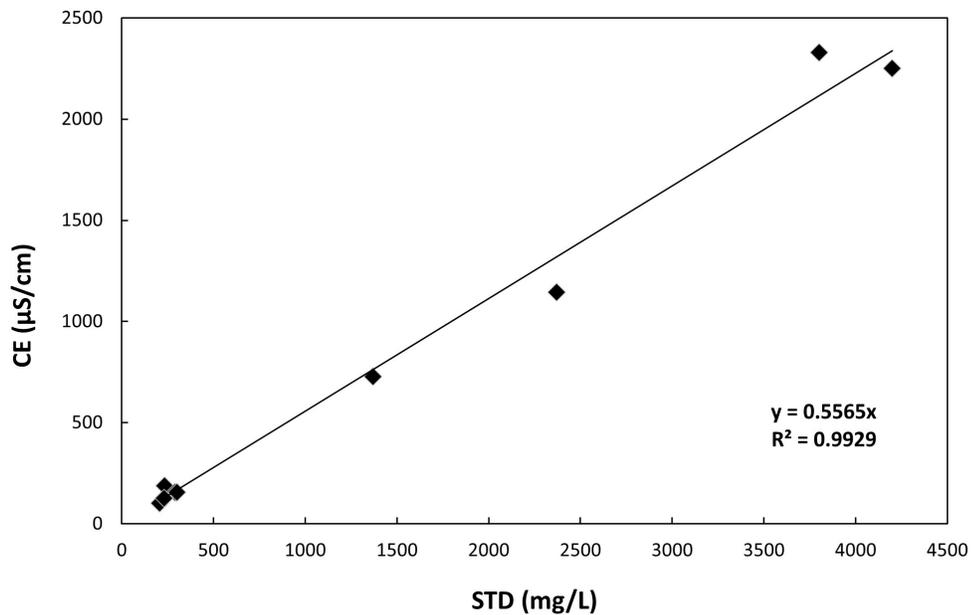
**Figura 23.** Mapa de resistividad a 40 m de profundidad. Se representan también los valores de CE de los pozos y norias muestreados, de acuerdo a la clasificación de riesgo de salinidad del agua (Olías et al., 2005).

Lo anterior también se puede ejemplificar con la muestra del pozo MMT25, en donde se observa un riesgo de salinidad bajo ya que la CE medida es de  $\sim 200 \mu\text{S}/\text{cm}$ . Esto se relaciona con el alto valor de

resistividad del sondeo TEM situado en su cercanía ( $\sim 250 \Omega\text{m}$ ).

De acuerdo con Kovda et al. (1973) existe una relación entre los STD y la CE. Esto se da mediante una relación funcional  $mg/L = af(CE)$  cuyo valor de coeficiente  $a$  puede variar en un intervalo de 0.5, 0.8, 1.1 y 1.2. Por otra parte, Richards (1954) menciona que el valor de esta relación debe ser de  $\sim 0.640$ . Esto va a depender de los diferentes tipos de composiciones salinas en las aguas naturales como las freáticas, salinas, y las aguas de los lagos de las zonas más bajas de distintas cuencas endorréicas (Camacho et al., 2020).

En la Figura 24 se muestra que el valor del coeficiente  $a$  es de 0.5565, cuyo valor se encuentra dentro de lo reportado por Kovda et al. (1973).

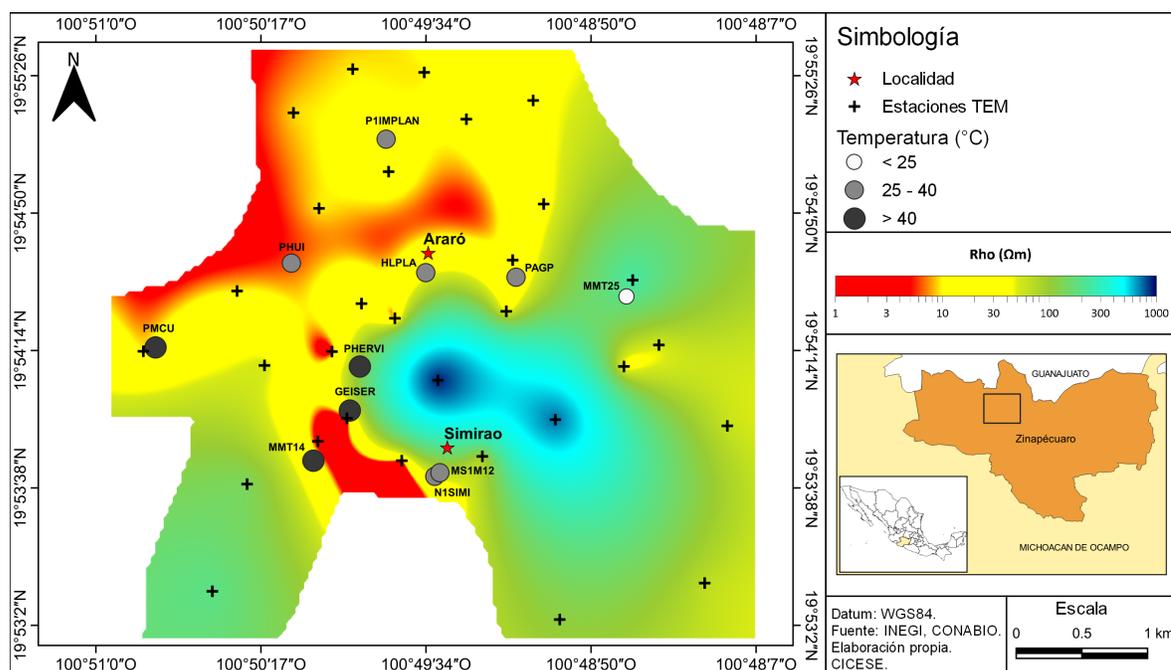


**Figura 24.** Relación STD - CE de las muestras de agua de los pozos y norias.

En la Figura 25, se muestran los valores de temperatura y de acuerdo con la NOM-001-SEMARNAT-1996, la temperatura máxima permitida para el uso de riego agrícola es de 40 °C.

En este mapa, así como en el mapa de los SDT y CE (Fig. 21 y 23) se puede observar una relación entre la CE, los STD y la temperatura. Esto es que, en las muestras que presentan mayor temperatura, los valores de CE y SDT también son mayores, tal es el caso de la muestra del pozo PHERVI cuya temperatura es de 80 °C y, el valor de CE es  $> 3000 \mu\text{S}/\text{cm}$ , mientras que los SDT presentan valores de 2330 mg/L. Esta relación se debe a que las altas temperaturas favorecen el desgaste de las rocas, lo que provoca un aporte de una mayor cantidad de sales disueltas en el agua (Gómez Cruz, 2020).

Por otra parte, se observa que la muestra PAGP presenta una temperatura de  $\sim 35\text{ }^{\circ}\text{C}$ , mientras que los valores de CE y SDT son de  $230\text{ }\mu\text{S}/\text{cm}$  y  $125\text{ mg}/\text{L}$ , respectivamente. Siendo la resistividad del sitio cercano a este pozo de  $\sim 20\text{ }\Omega\text{m}$ .



**Figura 25.** Mapa de resistividad a 40 m de profundidad. Se representa también los valores de Temperatura de los pozos y norias muestreados, de acuerdo a la NOM-001-SEMARNAT-1996.

## Capítulo 6. Conclusiones

---

En este trabajo de tesis se utilizó el esquema de inversión 1D de Marquardt y Occam para obtener los diferentes modelos inversos de TEM. Además, se correlacionaron los resultados obtenidos de resistividad con los resultados de los parámetros físico-químicos de las muestras de agua de pozos y norias, obtenidos en el área de estudio. Las conclusiones se presentan a continuación.

Se identificaron siete unidades hidrogeológicas: La unidad UH1 ( $6 - 25 \Omega\text{m}$ ) se asoció a la zona no saturada, compuesta de arenas y arcillas. La unidad UH1-A ( $6 - 25 \Omega\text{m}$ ) representa una unidad semipermeable asociada a sedimentos lacustres saturados. La unidad UH2 ( $25 - 95 \Omega\text{m}$ ) se asoció a la unidad permeable que representa al acuífero conformado de basaltos y tobas. La unidad UH3-A ( $< 6 \Omega\text{m}$ ) se asocia al acuífero mezclado con fluidos geotérmicos. La unidad UH3 ( $< 6 \Omega\text{m}$ ) es la asociada a la capa arcillosa, producto de la alteración hidrotermal. La unidad UH4-A, se asocia a rocas volcánicas como tobas, riolitas y andesitas basálticas. Finalmente, la unidad UH4 ( $> 100 \Omega\text{m}$ ), se asocia a rocas volcánicas compactas que actúa como basamento del acuífero.

Se determinó que las bajas resistividades en los primeros metros de los sitios que se encuentran ubicados en las cercanías del lago de Cuitzeo, se deben a material areno-arcilloso proveniente del lago. Y, a medida que se profundiza, se logra definir el acuífero contenido en sedimentos lacustres. El acuífero en los sondeos cercanos al lago tienen un espesor de entre 60 y 120 m.

Además, se determinó que los valores bajos de resistividad de los sitios que se encuentran dentro, o en la cercanía de la zona de alteración hidrotermal, se asocian a la presencia de material alterado hidrotermalmente, que corresponden a arcillas, así como de andesitas intercaladas con brechas hidrotermales, para el caso de aquellos sondeos cercanos al pozo Z3. También, los valores de baja resistividad se asocian al acuífero que se encuentra mezclado por fluidos geotermales. Este ascenso de fluidos se da a través de las fallas locales, como la falla Huingo y la Falla Araró-Simirao. El espesor del acuífero en esta zona de alteración, es de entre 60 a 160 m.

Por otra parte, las resistividades muy pequeñas ( $\sim 1 \Omega\text{m}$  o menores), podrían asociarse a presencia de agua salada, ya que Viggiano y Gutiérrez (2003) así como Vigil Barrientos (2017) reportan altas concentraciones de sales en el agua proveniente de los manantiales de agua caliente que se sitúan en la zona de alteración. Lo anterior, también se correlaciona con los valores de los parámetros físico-químicos de los pozos GÉISER y PHERVI, que se sitúan cerca de los sondeos ARA13 y ARA12, los cuales presentan valores bajos de resistividad.

Asimismo, se observó que en la mayoría de los sitios, el acuífero se presenta entre los primeros 5 a 25 m de profundidad, alcanzando espesores de entre 60 y 180 m, lo que concuerda por lo reportado por Viggiano y Gutiérrez (2003) quienes indican espesores de entre 100 y 200 m. Hacia el Este de la zona de estudio, el acuífero se logra definir a una profundidad de 50 m, esto sugiere que en esta zona ha habido una sobreexplotación del acuífero, por lo que el nivel freático ha descendido. Lo anterior también puede apreciarse en algunos sondeos situados en Araró y Simirao, en donde el acuífero se define hasta los 40 m de profundidad.

Debido al alcance del método empleado, no se logró definir en toda la zona el basamento del acuífero. Esto sólo se pudo observar en el sondeo ARA04, situado en la parte Noroeste del corte de resistividad, a 100 m de profundidad. Por lo que se sugiere que el basamento se encuentra a una mayor profundidad (> 300 m) a la alcanzada con los tamaños de espiras empleadas.

Finalmente, los resultados entre los valores de resistividad y los valores de SDT, CE y temperatura muestran una relación. Esto es, que las zonas en donde se presentan valores bajos de resistividad, se observa un alto valor de SDT, CE y temperatura. Lo anterior, para las muestras extraídas de pozos que se ubican en la cercanía de las manifestaciones hidrotermales. Esto podría indicar que las bajas conductividades en la zona de alteración hidrotermal podría deberse tanto al material alterado o a la concentración de sales en el agua, así como a la temperatura elevada.

## Literatura citada

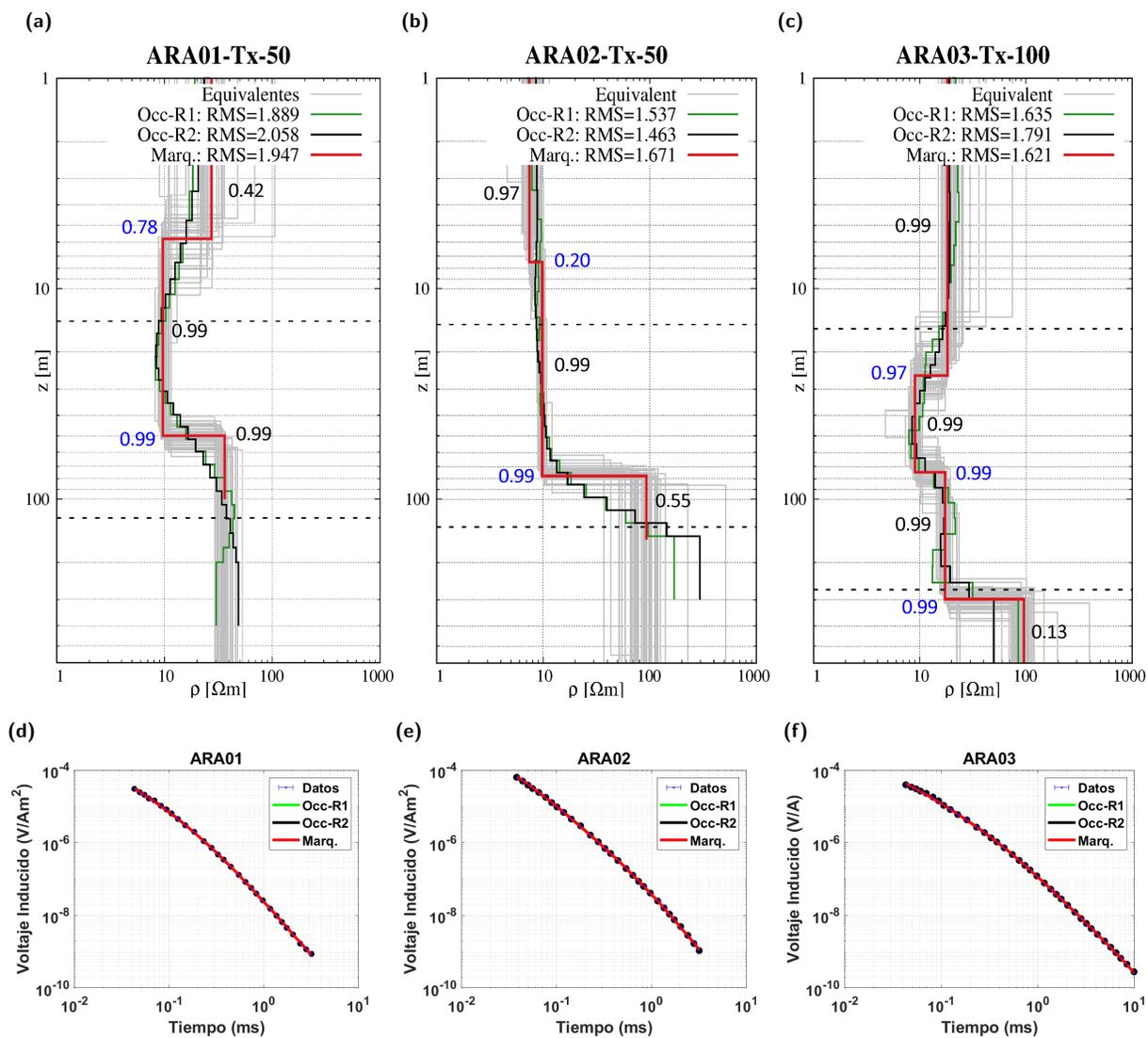
- Camacho Ballesteros, A., Ortega Escobar, H. M., et al.. 2020. Indicadores de calidad físico-química de las aguas residuales del estado de Oaxaca, México. *Terra Latinoamericana*, 38(2), pp. 361–375. doi: 10.28940/terra.v38i2.610.
- Casarrubias, U., Izunza, G., y Contreras, V.. 1990. Estudio geológico de detalle en la zona geotérmica de Araró - Zimarao, Michoacán. CFE Internal Report No. 01-90. Unpublished.
- Cassiani, G., Binley, A., y Ferré, T.. 2006. Unsaturated zone processes. En: *Applied Hydrogeophysics*. Springer.
- CONAGUA. 2006. El Agua en México. Consultado el 21 de julio de 2022. de <http://www.conagua.gob.mx/conagua07/publicaciones/publicaciones/el-agua-en-mexico.pdf>.
- CONAGUA. 2015. Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Morelia-Queréndaro (1602), Estado de Michoacán. Unpublished.
- CONAGUA. 2019. Estadística del agua en México. Consultado el 13 de abril de 2022. de [https://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM\\_2019.pdf](https://sina.conagua.gob.mx/publicaciones/EAM_2019.pdf).
- CONAGUA. 2020. Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Morelia-Queréndaro (1602), Estado de Michoacán. Consultado el 04 de abril de 2022. de [https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos\\_Acuiferos\\_18/michoacan/DR\\_1602.pdf](https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/michoacan/DR_1602.pdf).
- Constable, S., Parker, R., y Constable, C.. 1987. Occam's inversion: a practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. *Geophysics*, 52(3), pp. 289–300. doi: 10.1190/1.1442303.
- Departamento de Exploración. 1989. Propuesta para la perforación exploratoria en la zona geotérmica de Araró, Mich. CFE Internal Report No. 10-89. Unpublished.
- García, E.. 2021. Inversión de datos audiomagnetoteléuricos para exploración hidrogeológica en el Valle de Ojos Negros, B.C.. Tesis de maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada.
- Gómez Cortes, J.. 2015. Prospección magnetométrica del campo geotérmico de Araró, Zinapécuaro Michoacán. Tesis de licenciatura, Instituto Tecnológico de Tacámbaro.
- Gómez Cruz, K.. 2020. Estudio de la hidrogeoquímica y calidad del agua subterránea en la cuenca del lago de Cuitzeo. Tesis de Maestría, Universidad Michoacana de San Nicolás de Hidalgo.
- Hiriart Le Bert, G.. 2011. Evaluación de la energía geotérmica en México. Informe para el Banco Interamericano de Desarrollo y la Comisión Reguladora de Energía, p. 167.
- Knight, R., Smith, R., et al.. 2018. Mapping aquifer systems with airborne electromagnetics in the Central Valley of California. *Groundwater*, 56(6), pp. 893–908. doi: 10.1111/gwat.12656.
- Kovda, V., Hagan, R., y van den Berg, C.. 1973. Irrigation, drainage and salinity: an international source book. Hutchinson, FAO, UNESCO.
- Levenberg, K.. 1944. A method for the solution of certain non-linear problems in least squares. *Quarterly of applied mathematics*, 2(2), pp. 164–168.
- Lines, L. y Treitel, S.. 1984. A review of least-squares inversion and its application to geophysical problems. *Geophysical prospecting*, 32(2), pp. 159–186. doi: 10.1111/j.1365-2478.1984.tb00726.x.

- Marquardt, D.. 1963. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *Journal of the Society for Industrial and Applied Mathematics*, 11(2), pp. 431–441.
- McNeill, J.. 1990. 7. use of electromagnetic methods for groundwater studies. En: *Geotechnical and Environmental Geophysics: Volume I, Review and Tutorial*. Society of Exploration Geophysicists.
- Meju, A.. 1995. Simple effective resistivity-depth transformations for infield or real-time data processing. *Computers geosciences*, 21(8), pp. 985–992. doi: 10.1016/0098-3004(95)00035-7.
- Menke, W.. 2018. *Geophysical data analysis: Discrete inverse theory*. Academic press.
- Olías, M., Cerón, J., y Fernández, I.. 2005. Sobre la utilización de la clasificación de las aguas de riego del US Laboratory Salinity (USLS). *Geogaceta*, 37(3).
- Pérez, D.. 2014. *Nuevas estrategias para la inversión Sparse de datos sísmicos prestack*. Tesis de doctorado, Universidad Nacional de La Plata.
- Richards, L.. 1954. *Diagnosis and improvement of saline and alkali soils*, Vol. 78. LWW.
- Riquelme Alcantar, R.. 2000. *Estudio Geohidrológico-Geofísico*. Simirao. Municipio de Zinapécuaro. Estado de Michoacán. Unpublished.
- Ruiz Aguilar, D. Tezkan, B. y Arango Galván, C.. 2018. Exploration of the aquifer of San Felipe geothermal area (Mexico) by spatially constrained inversion of transient electromagnetic data. *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*, 23(2), pp. 197–209. doi: 10.2113/JEEG23.2.197.
- Scholl, S.. 2005. *The influence of multidimensional structures on the interpretation of LOTEM data with one-dimensional models and the application to data from Israel*. Tesis de doctorado, Universität Zu Köln.
- SEMARNAT. 2008. *Compendio de Estadísticas Ambientales 2008*. Consultado el 15 de julio de 2022. de [https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe\\_2008\\_ing/compendio\\_2008/03\\_agua.html](https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe_2008_ing/compendio_2008/03_agua.html).
- Sengupta, P.. 2017. *Industrial Water Resource Management: Challenges and Opportunities for Corporate Water Stewardship*.
- Spies, B.. 1989. Depth of investigation in electromagnetic sounding methods. *Geophysics*, 54(7), pp. 872–888. doi: 10.1190/1.1442716.
- Spies, B. y Eggers, D.. 1986. The use and misuse of apparent resistivity in electromagnetic methods. *Geophysics*, 51(7), pp. 1462–1471. doi: 10.1190/1.1442194.
- Spies, B. y Frischknecht, F.. 1991. Electromagnetic sounding. *Electromagnetic methods in applied geophysics*, 2(A), pp. 285–426. doi: 10.1190/1.9781560802686.ch5.
- Suwai, J.. 2009. Basic hydrogeology in geothermal systems. En: *Expanded Abstracts: Short Course IV on Exploration for Geothermal Resources*.
- Viggiano Guerra, J. y Gutiérrez Negrín, L.. 2003. Régimen de flujo hidrotermal en la zona geotérmica de Araró, Michoacán, México. *Ingeniería hidráulica en México*, 18(1), pp. 39–53.
- Viggiano Guerra, J. y Gutiérrez Negrín, L.. 2005. The geothermal system of Araró, Mexico, as an independent system of los Azufres. *Proceedings World Geothermal Congress*, pp. 24–29.
- Vigil Barrientos, A. J.. 2017. *Caracterización geológica y geoquímica de fluidos en el Sistema Geotérmico Araró, Michoacán, México*. Tesis de maestría, Universidad Autónoma de Nuevo León.

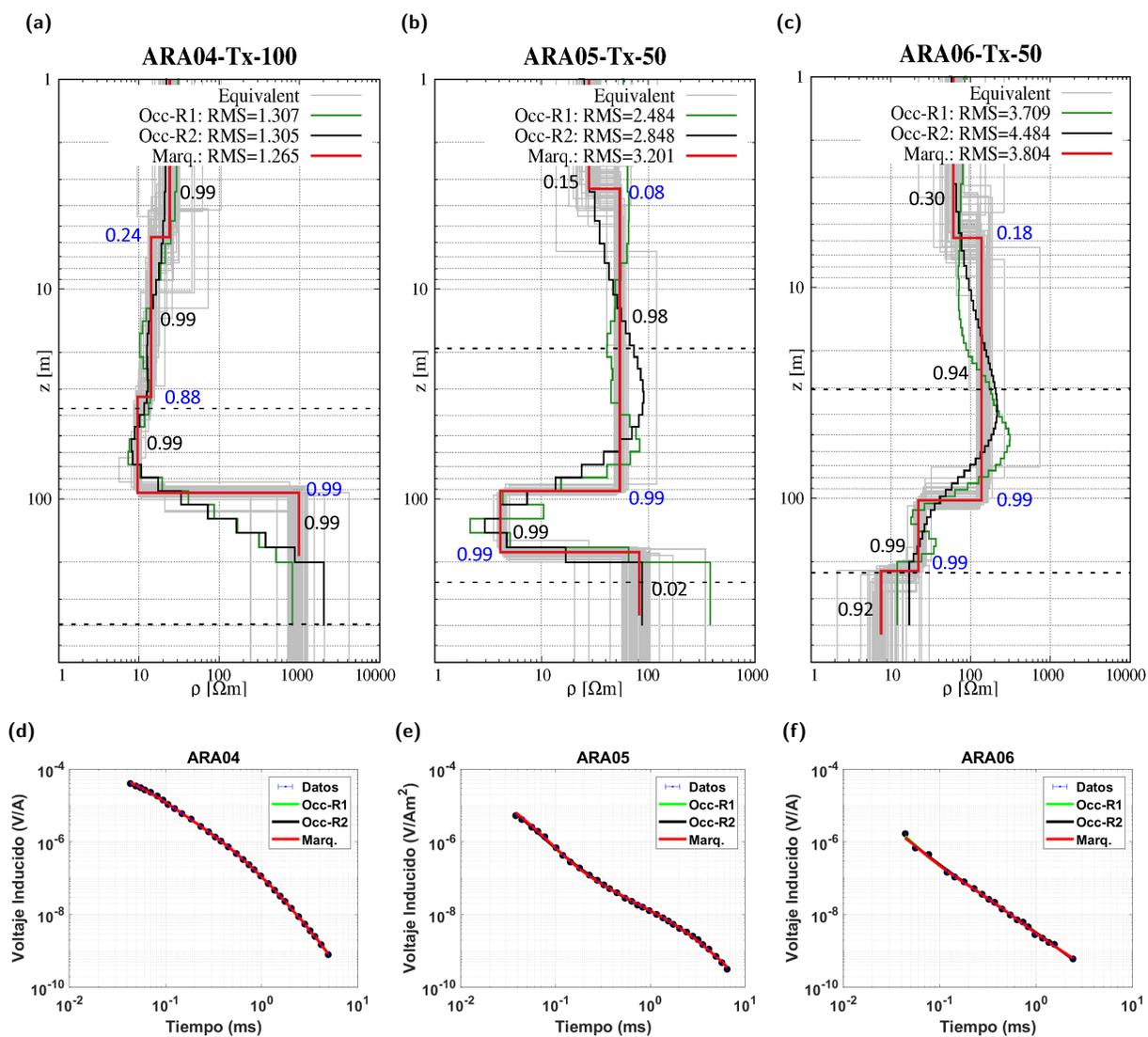
Ward, S. y Hohmann, G.. 1988. 4. electromagnetic Theory for Geophysical Applications. En: Electromagnetic Methods in Applied Geophysics: Volume I, Theory..Society of Exploration Geophysicists, pp. 130–311.

## Anexo

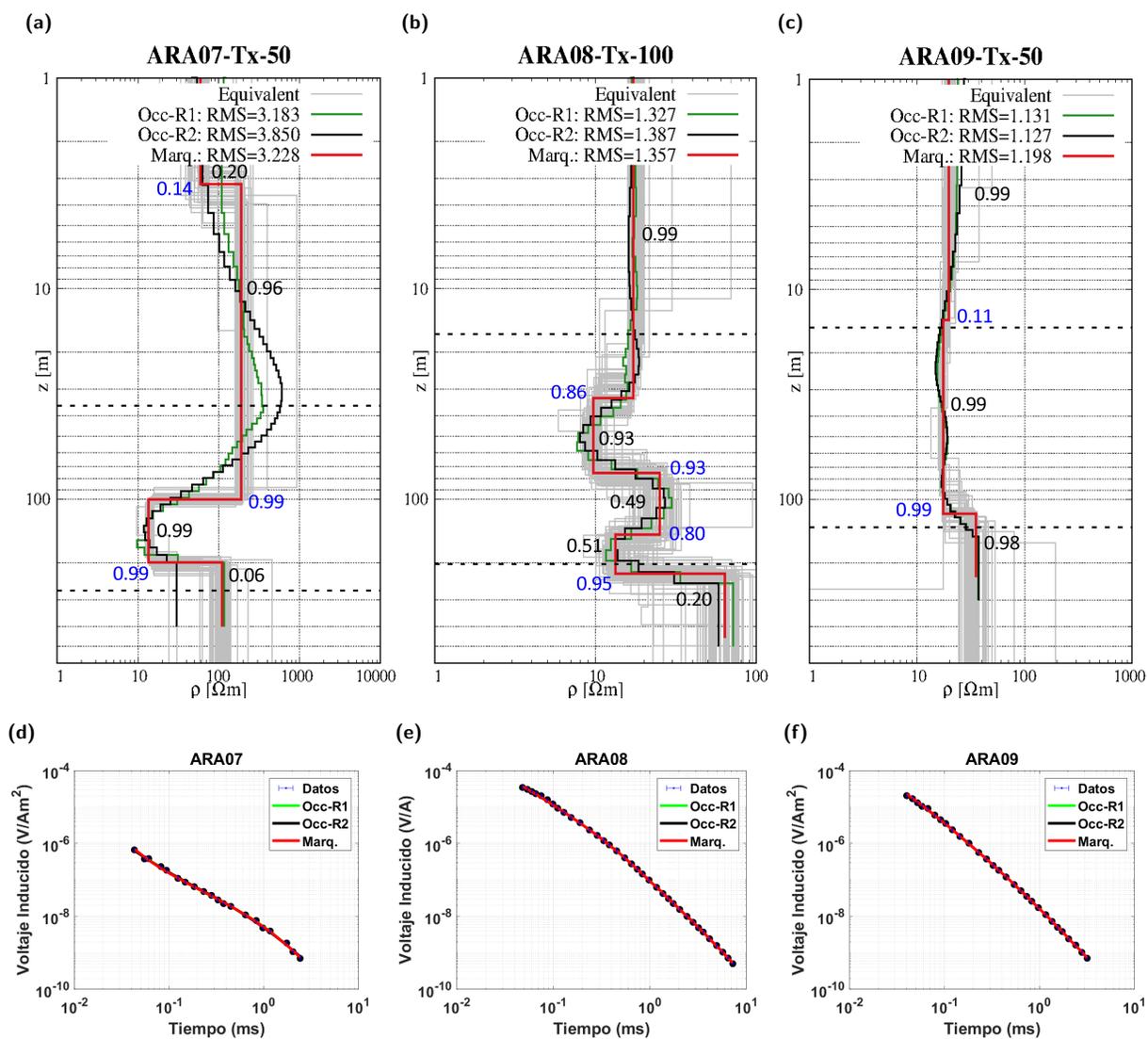
En esta sección se mostrarán los modelos de inversión 1D de TEM para todas las estaciones, así como los ajustes de los datos observados y los datos calculados de cada modelo obtenido.



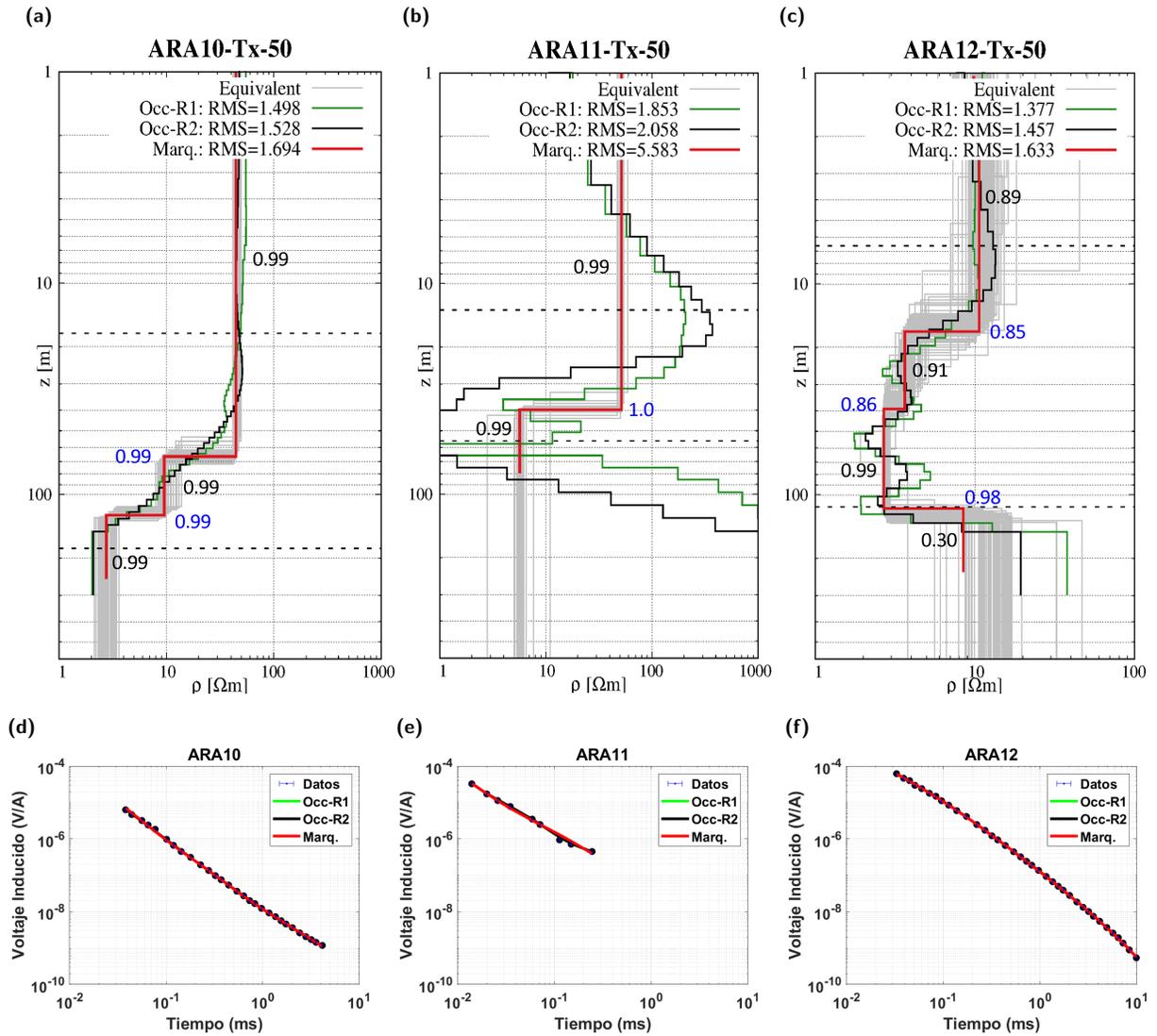
**Figura 26.** (a-c) Modelos inversos tipo Occam R1 y R2 (verde y negro), Marquardt (rojo), modelos equivalentes (gris) y parámetros de importancia (números en negro y azul) de los sondeos ARA01, ARA02 y ARA03. (d-f) Ajuste entre datos calculados y datos observados de los sondeos ARA01, ARA02 y ARA03.



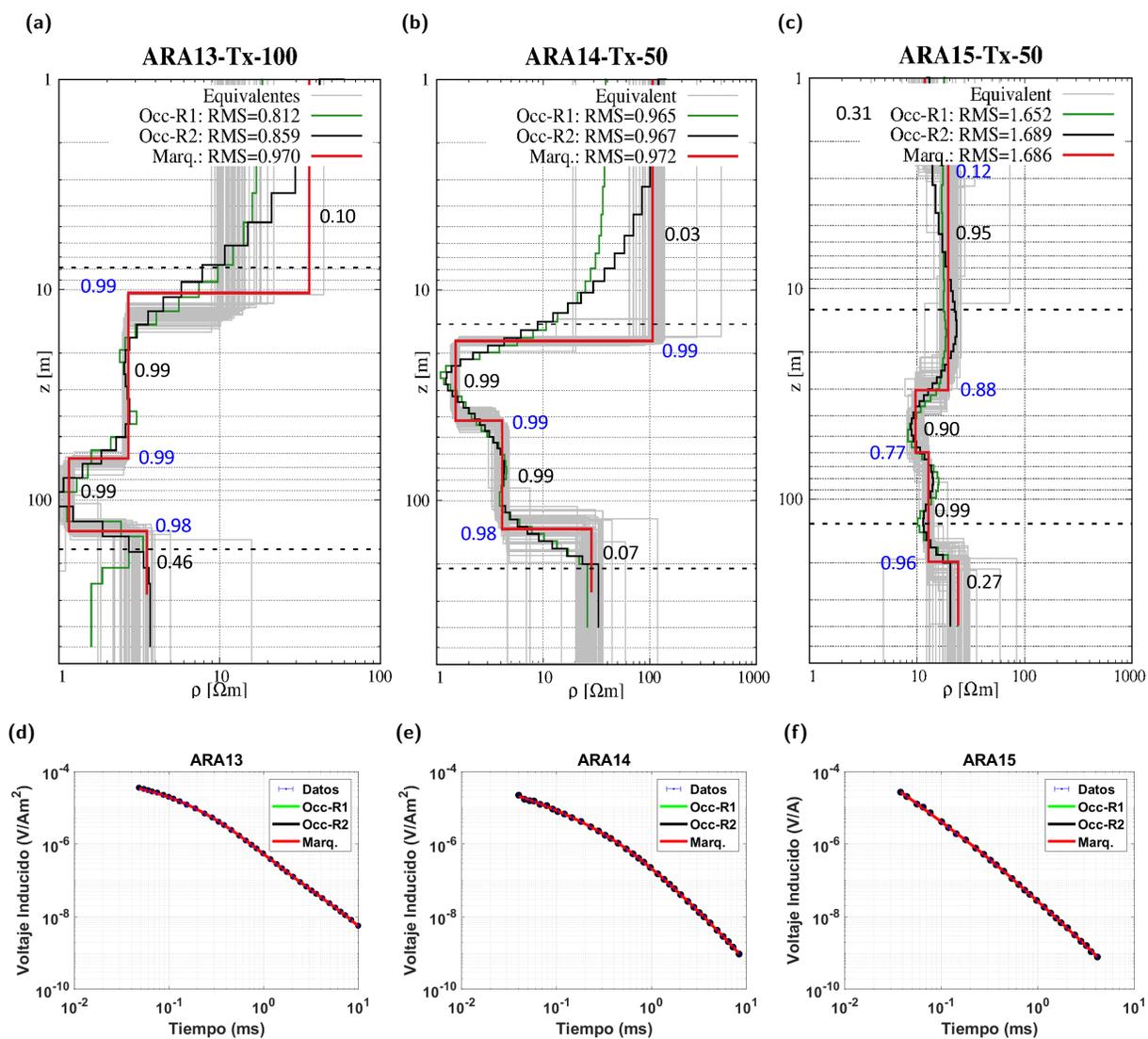
**Figura 27.** (a-c) Modelos inversos tipo Occam R1 y R2 (verde y negro), Marquardt (rojo), modelos equivalentes (gris) y parámetros de importancia (números en negro y azul) de los sondeos ARA04, ARA05 y ARA06. (d-f) Ajuste entre datos calculados y datos observados de los sondeos ARA04, ARA05 y ARA06.



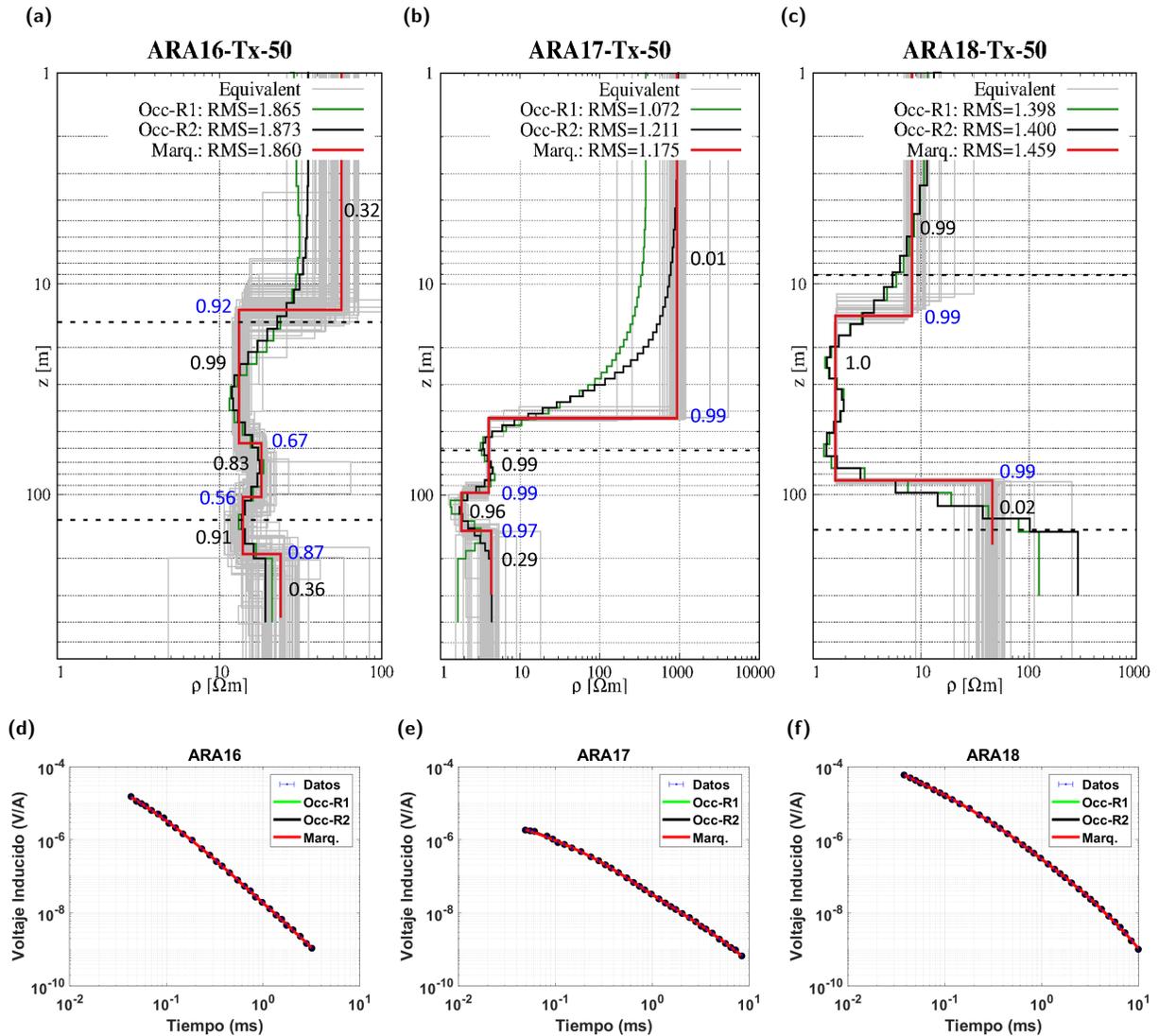
**Figura 28.** (a-c) Modelos inversos tipo Occam R1 y R2 (verde y negro), Marquardt (rojo), modelos equivalentes (gris) y parámetros de importancia (números en negro y azul) de los sondeos ARA07, ARA08 y ARA09. (d-f) Ajuste entre datos calculados y datos observados de los sondeos ARA07, ARA08 y ARA09.



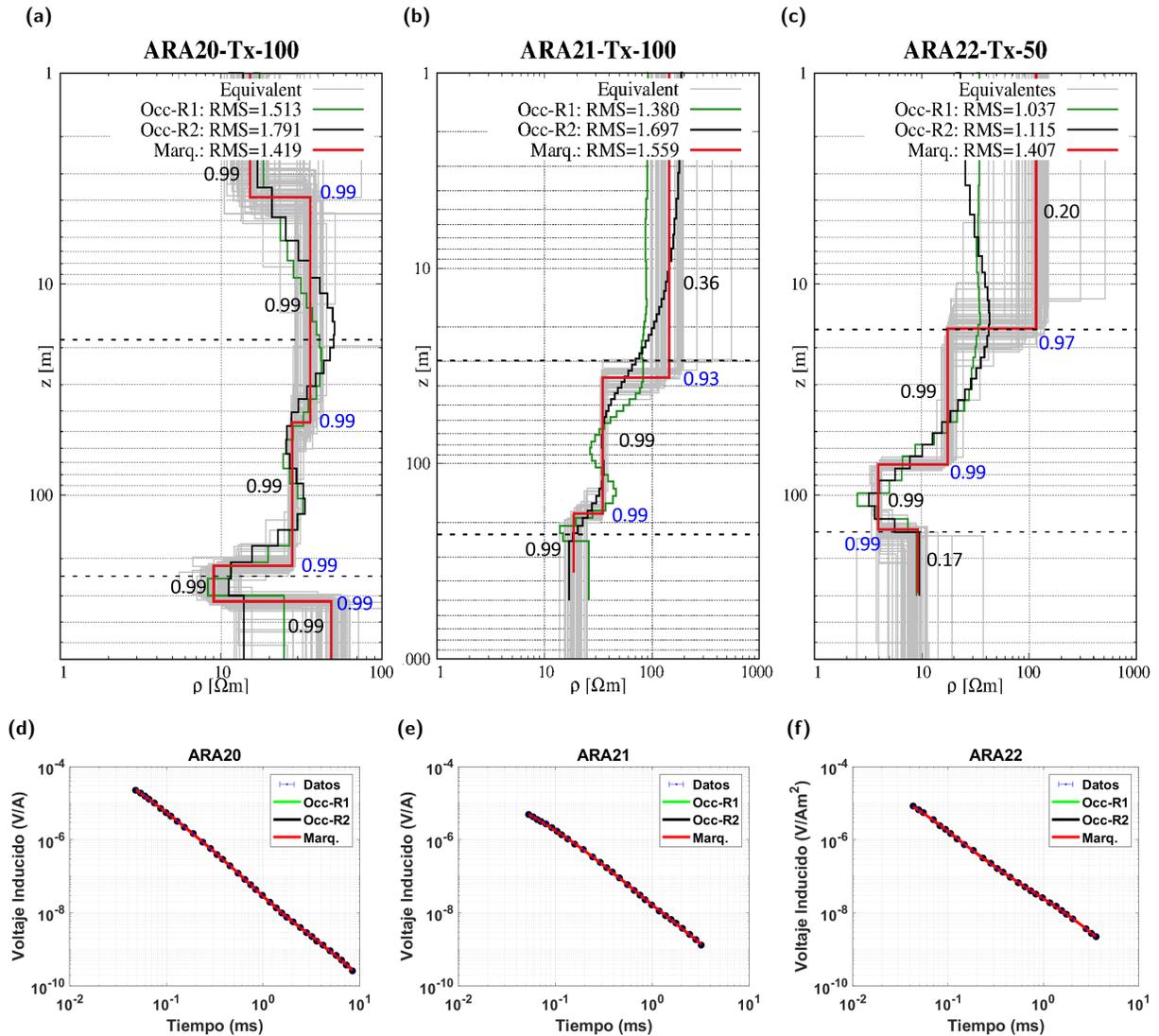
**Figura 29.** (a-c) Modelos inversos tipo Occam R1 y R2 (verde y negro), Marquardt (rojo), modelos equivalentes (gris) y parámetros de importancia (números en negro y azul) de los sondeos ARA10, ARA11 y ARA12. (d-f) Ajuste entre datos calculados y datos observados de los sondeos ARA10, ARA11 y ARA12.



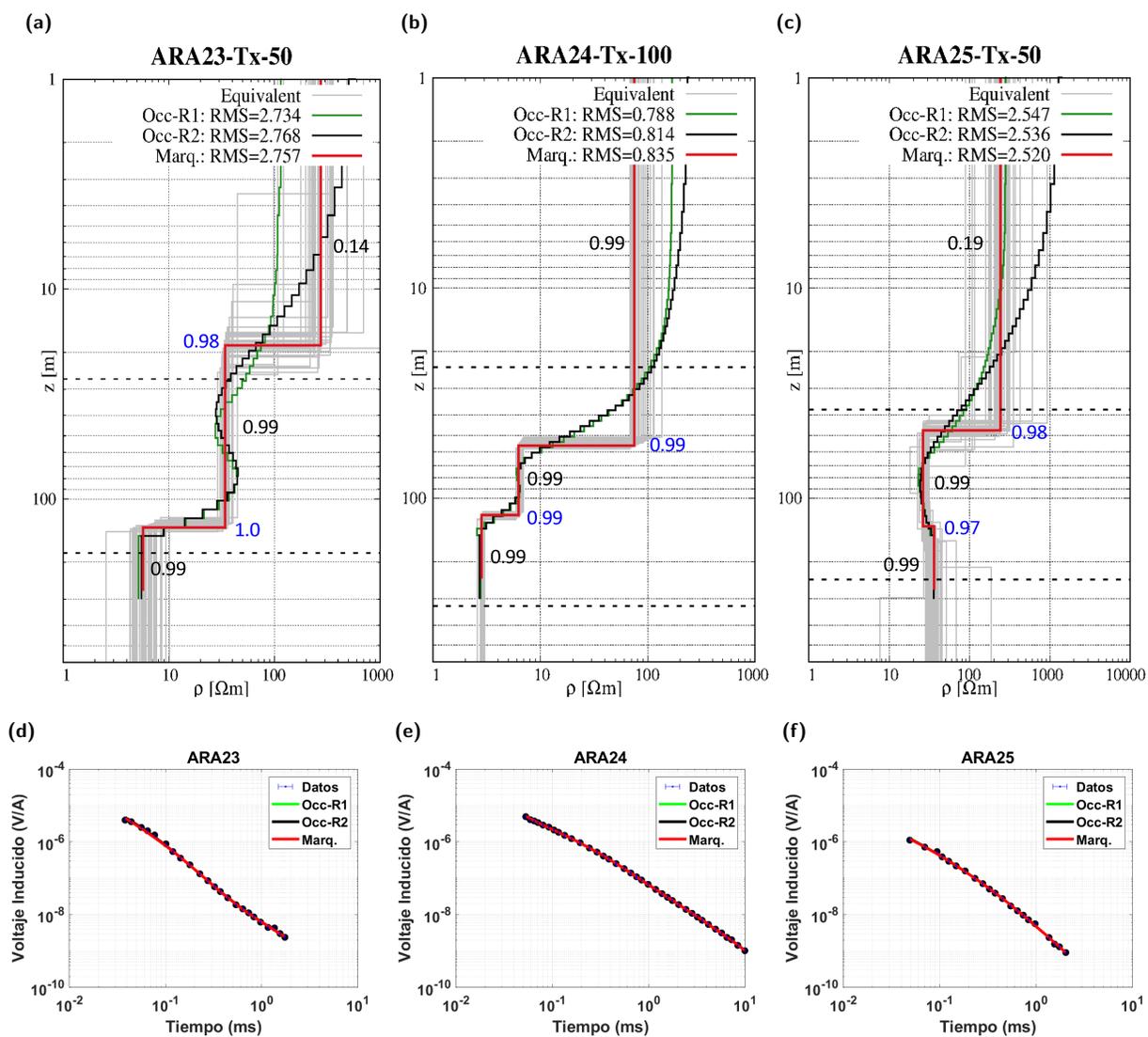
**Figura 30.** (a-c) Modelos inversos tipo Occam R1 y R2 (verde y negro), Marquardt (rojo), modelos equivalentes (gris) y parámetros de importancia (números en negro y azul) de los sondeos ARA13, ARA14 y ARA15. (d-f) Ajuste entre datos calculados y datos observados de los sondeos ARA13, ARA14 y ARA15.



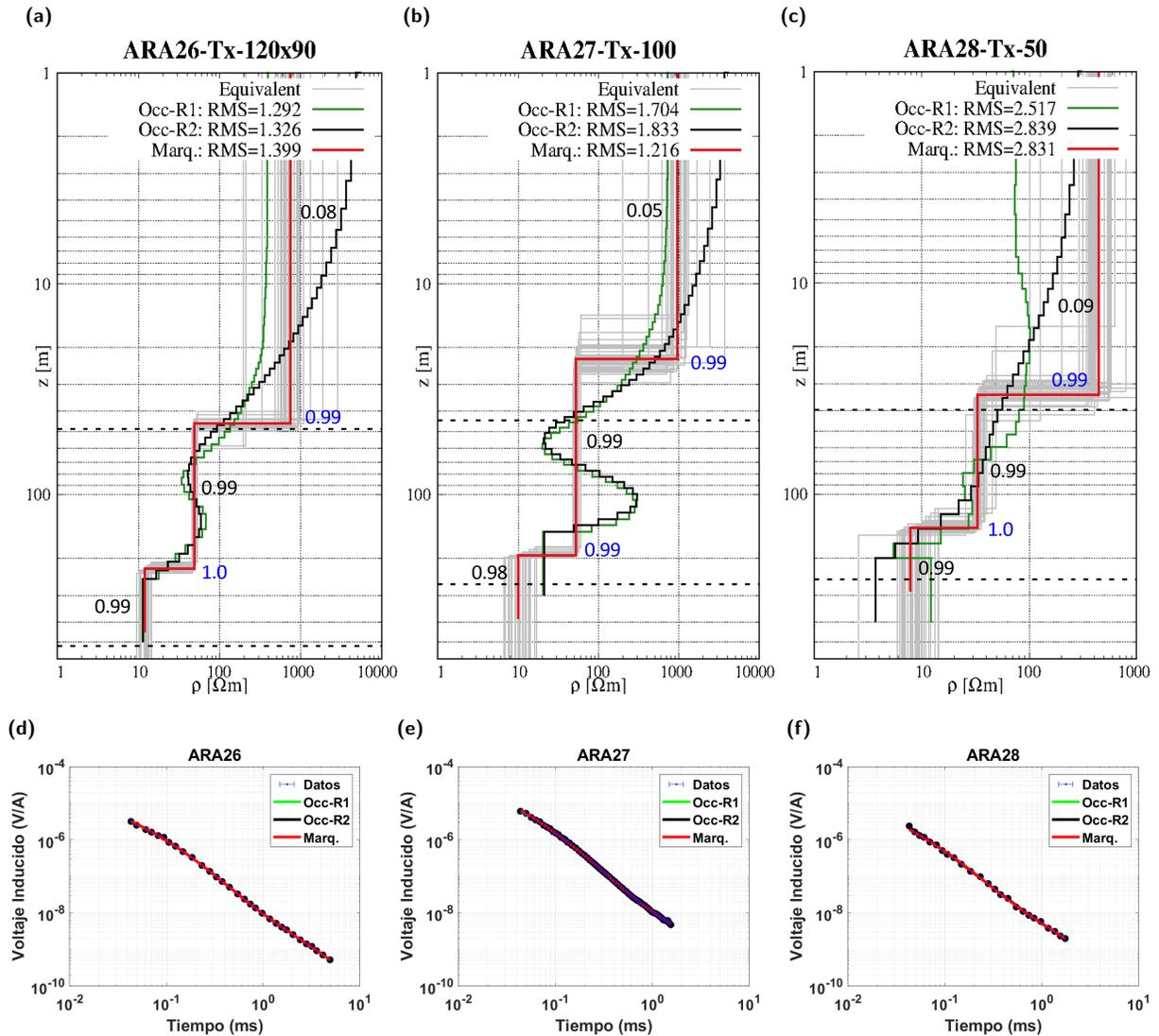
**Figura 31.** (a-c) Modelos inversos tipo Occam R1 y R2 (verde y negro), Marquardt (rojo), modelos equivalentes (gris) y parámetros de importancia (números en negro y azul) de los sondeos ARA16, ARA17 y ARA18. (d-f) Ajuste entre datos calculados y datos observados de los sondeos ARA16, ARA17 y ARA18.



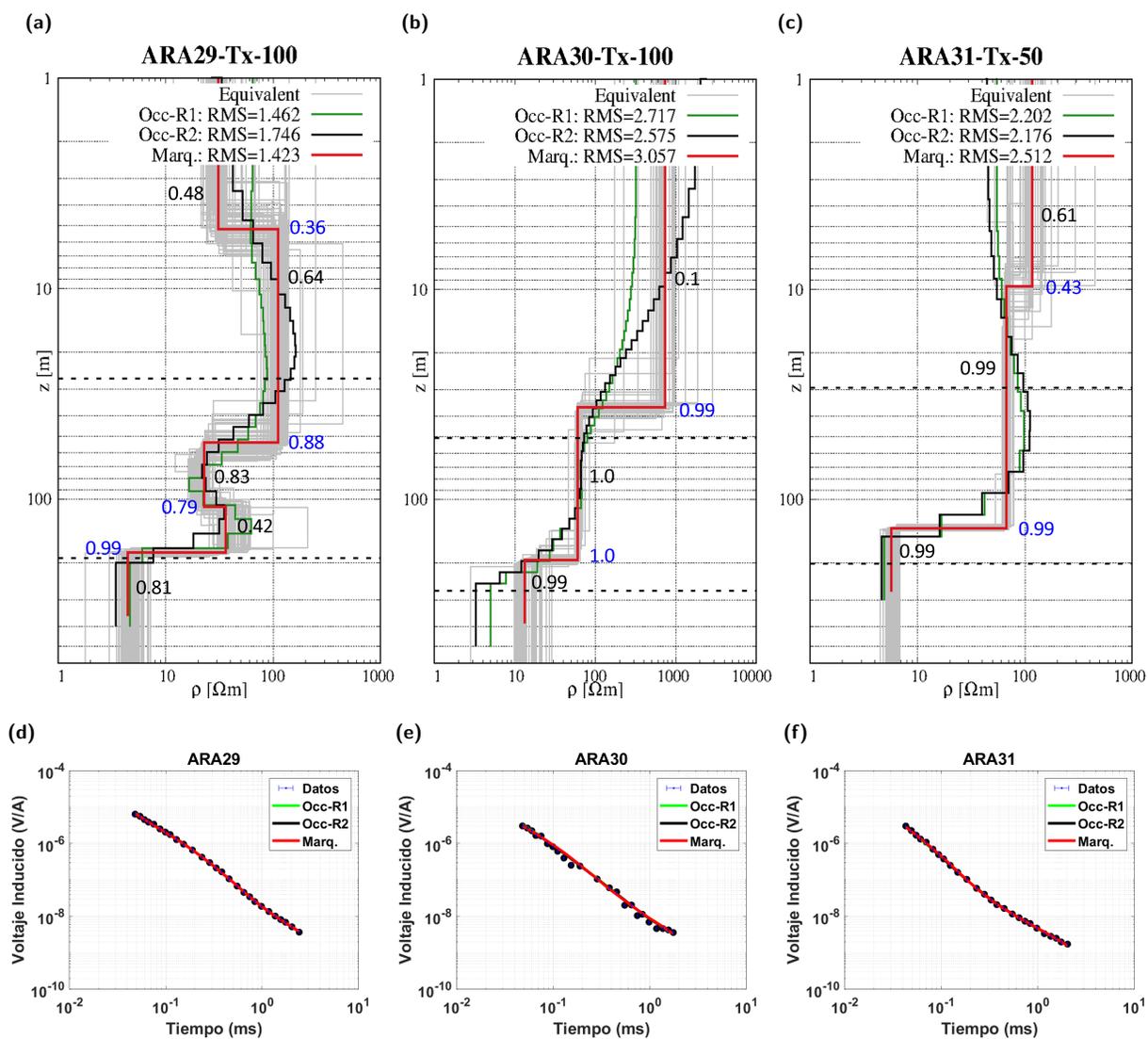
**Figura 32.** (a-c) Modelos inversos tipo Occam R1 y R2 (verde y negro), Marquardt (rojo), modelos equivalentes (gris) y parámetros de importancia (números en negro y azul) de los sondeos ARA20, ARA21 y ARA22. (d-f) Ajuste entre datos calculados y datos observados de los sondeos ARA20, ARA21 y ARA22.



**Figura 33.** (a-c) Modelos inversos tipo Occam R1 y R2 (verde y negro), Marquardt (rojo), modelos equivalentes (gris) y parámetros de importancia (números en negro y azul) de los sondeos ARA23, ARA24 y ARA25. (d-f) Ajuste entre datos calculados y datos observados de los sondeos ARA23, ARA24 y ARA25.



**Figura 34.** (a-c) Modelos inversos tipo Occam R1 y R2 (verde y negro), Marquardt (rojo), modelos equivalentes (gris) y parámetros de importancia (números en negro y azul) de los sondeos ARA26, ARA27 y ARA28. (d-f) Ajuste entre datos calculados y datos observados de los sondeos ARA26, ARA27 y ARA28.



**Figura 35.** (a-c) Modelos inversos tipo Occam R1 y R2 (verde y negro), Marquardt (rojo), modelos equivalentes (gris) y parámetros de importancia (números en negro y azul) de los sondeos ARA29, ARA30 y ARA31. (d-e) Ajuste entre datos calculados y datos observados de los sondeos ARA29, ARA30 y ARA31.

**Tabla 4.** Información obtenida de la inversión 1D de marquardt, y de las coordenadas de los 30 sondeos TEM.

| TEM | Capa | Resistividad<br>( $\Omega\text{m}$ ) | Espesor<br>(m) | Profundidad<br>(m) | Coordenadas |         |
|-----|------|--------------------------------------|----------------|--------------------|-------------|---------|
|     |      |                                      |                |                    | X           | Y       |
| 1   | 1    | 27.26                                | 5.80           | 5.80               | 306699      | 2201912 |
|     | 2    | 9.67                                 | 44.14          | 49.95              |             |         |
|     | 3    | 36.28                                | -              | -                  |             |         |
| 2   | 1    | 7.46                                 | 7.49           | 7.49               | 307418      | 2202390 |
|     | 2    | 9.82                                 | 70.14          | 77.63              |             |         |
|     | 3    | 93.33                                | -              | -                  |             |         |
| 3   | 1    | 18.23                                | 25.89          | 25.89              | 307863      | 2203821 |
|     | 2    | 9.05                                 | 48.68          | 74.57              |             |         |
|     | 3    | 17.28                                | 224.06         | 298.63             |             |         |
|     | 4    | 95.70                                | -              | -                  |             |         |
| 4   | 1    | 24.23                                | 5.66           | 5.66               | 308049      | 2203049 |
|     | 2    | 14.16                                | 26.91          | 32.57              |             |         |
|     | 3    | 9.64                                 | 60.89          | 93.46              |             |         |
|     | 4    | 989.46                               | -              | -                  |             |         |
| 5   | 1    | 27.93                                | 3.32           | 3.32               | 307620      | 2201788 |
|     | 2    | 54.22                                | 88.40          | 91.72              |             |         |
|     | 3    | 4.14                                 | 87.31          | 179.04             |             |         |
|     | 4    | 82.21                                | -              | -                  |             |         |
| 6   | 1    | 60.59                                | 5.81           | 5.81               | 307477      | 2200833 |
|     | 2    | 137.43                               | 96.49          | 102.30             |             |         |
|     | 3    | 22.14                                | 119.75         | 222.04             |             |         |
|     | 4    | 7.57                                 | -              | -                  |             |         |
| 7   | 1    | 58.77                                | 3.19           | 3.19               | 307203      | 2199972 |
|     | 2    | 190.14                               | 97.23          | 100.42             |             |         |
|     | 3    | 13.56                                | 99.62          | 200.04             |             |         |
|     | 4    | 109.88                               | -              | -                  |             |         |
| 8   | 1    | 17.13                                | 33.13          | 33.13              | 308318      | 2204168 |
|     | 2    | 9.71                                 | 41.63          | 74.77              |             |         |
|     | 3    | 24.95                                | 72.39          | 147.15             |             |         |
|     | 4    | 13.26                                | 79.16          | 226.32             |             |         |
|     | 5    | 63.44                                | -              | -                  |             |         |

Continuación en la siguiente página.

| TEM | Capa | Resistividad<br>( $\Omega$ m) | Espesor<br>(m) | Profundidad<br>(m) | Coordenadas |         |
|-----|------|-------------------------------|----------------|--------------------|-------------|---------|
|     |      |                               |                |                    | X           | Y       |
| 9   | 1    | 19.60                         | 13.95          | 13.95              | 308582      | 220339  |
|     | 2    | 17.40                         | 102.33         | 116.29             |             |         |
|     | 3    | 35.41                         | -              | -                  |             |         |
| 10  | 1    | 44.43                         | 66.13          | 66.13              | 308364      | 2202278 |
|     | 2    | 9.58                          | 59.20          | 125.33             |             |         |
|     | 3    | 2.76                          | -              | -                  |             |         |
| 11  | 1    | 51.54                         | 39.73          | 39.73              | 308617      | 2202157 |
|     | 2    | 17.40                         | 102.33         | 116.29             |             |         |
|     | 3    | 5.69                          | -              | -                  |             |         |
| 12  | 1    | 9.83                          | 2.07           | 2.07               | 308135      | 2201894 |
|     | 2    | 10.65                         | 14.75          | 16.83              |             |         |
|     | 3    | 3.65                          | 22.38          | 38.21              |             |         |
|     | 4    | 2.70                          | 76.69          | 115.90             |             |         |
|     | 5    | 8.46                          | -              | -                  |             |         |
| 13  | 1    | 36.17                         | 10.36          | 10.36              | 308243      | 2201355 |
|     | 2    | 2.71                          | 53.04          | 63.39              |             |         |
|     | 3    | 1.16                          | 77.58          | 140.97             |             |         |
|     | 4    | 3.74                          | -              | -                  |             |         |
| 14  | 1    | 106.43                        | 17.47          | 17.47              | 308020      | 2201172 |
|     | 2    | 1.52                          | 24.23          | 41.70              |             |         |
|     | 3    | 4.12                          | 94.71          | 136.41             |             |         |
|     | 4    | 28.44                         | -              | -                  |             |         |
| 15  | 1    | 11.70                         | 2.29           | 2.29               | 308862      | 2204136 |
|     | 2    | 19.40                         | 28.00          | 30.29              |             |         |
|     | 3    | 9.63                          | 29.67          | 59.95              |             |         |
|     | 4    | 12.77                         | 137.63         | 197.59             |             |         |
|     | 5    | 24.03                         | -              | -                  |             |         |
| 16  | 1    | 56.27                         | 13.26          | 13.26              | 309179      | 2203755 |
|     | 2    | 13.19                         | 43.69          | 56.95              |             |         |
|     | 3    | 18.03                         | 45.37          | 102.32             |             |         |
|     | 4    | 13.83                         | 88.83          | 191.14             |             |         |
|     | 5    | 23.82                         | -              | -                  |             |         |

Continuación en la siguiente página.

| TEM | Capa | Resistividad<br>( $\Omega\text{m}$ ) | Espesor<br>(m) | Profundidad<br>(m) | Coordenadas |         |
|-----|------|--------------------------------------|----------------|--------------------|-------------|---------|
|     |      |                                      |                |                    | X           | Y       |
| 17  | 1    | 925.49                               | 43.26          | 43.26              | 308939      | 2201654 |
|     | 2    | 4.02                                 | 54.23          | 97.49              |             |         |
|     | 3    | 1.83                                 | 50.16          | 147.65             |             |         |
|     | 4    | 4.33                                 | -              | -                  |             |         |
| 18  | 1    | 8.20                                 | 14.14          | 14.14              | 308657      | 2201009 |
|     | 2    | 1.60                                 | 71.63          | 85.77              |             |         |
|     | 3    | 45.82                                | -              | -                  |             |         |
| 20  | 1    | 15.13                                | 3.88           | 3.88               | 309689      | 2203901 |
|     | 2    | 35.95                                | 41.36          | 45.24              |             |         |
|     | 3    | 27.70                                | 171.08         | 216.32             |             |         |
|     | 4    | 9.01                                 | 102.99         | 319.31             |             |         |
|     | 5    | 48.40                                | -              | -                  |             |         |
| 21  | 1    | 145.50                               | 36.40          | 36.40              | 309760      | 2203065 |
|     | 2    | 34.81                                | 143.36         | 179.76             |             |         |
|     | 3    | 18.81                                | -              | -                  |             |         |
| 22  | 1    | 116.59                               | 16.26          | 16.26              | 309519      | 2202616 |
|     | 2    | 17.45                                | 55.48          | 71.74              |             |         |
|     | 3    | 3.95                                 | 74.10          | 145.83             |             |         |
|     | 4    | 9.23                                 | -              | -                  |             |         |
| 23  | 1    | 275.22                               | 18.53          | 18.53              | 309466      | 2202204 |
|     | 2    | 34.26                                | 118.08         | 136.61             |             |         |
|     | 3    | 5.70                                 | -              | -                  |             |         |
| 24  | 1    | 74.87                                | 56.08          | 56.08              | 309271      | 2201037 |
|     | 2    | 6.27                                 | 64.04          | 120.12             |             |         |
|     | 3    | 2.83                                 | -              | -                  |             |         |
| 25  | 1    | 239.67                               | 47.55          | 47.55              | 310431      | 2202445 |
|     | 2    | 26.05                                | 87.93          | 135.47             |             |         |
|     | 3    | 36.13                                | -              | -                  |             |         |
| 26  | 1    | 741.09                               | 45.86          | 45.86              | 309830      | 2201327 |
|     | 2    | 48.49                                | 177.59         | 223.45             |             |         |
|     | 3    | 11.90                                | -              | -                  |             |         |

Continuación en la siguiente página.

| TEM | Capa | Resistividad<br>( $\Omega\text{m}$ ) | Espesor<br>(m) | Profundidad<br>(m) | Coordenadas |         |
|-----|------|--------------------------------------|----------------|--------------------|-------------|---------|
|     |      |                                      |                |                    | X           | Y       |
| 27  | 1    | 956.45                               | 22.65          | 22.65              | 310625      | 2201920 |
|     | 2    | 51.84                                | 171.09         | 193.74             |             |         |
|     | 3    | 10.05                                | -              | -                  |             |         |
| 28  | 1    | 444.98                               | 33.82          | 33.82              | 310357      | 2201750 |
|     | 2    | 33.03                                | 110.03         | 143.85             |             |         |
|     | 3    | 7.84                                 | -              | -                  |             |         |
| 29  | 1    | 30.76                                | 5.22           | 5.22               | 309846      | 2199716 |
|     | 2    | 110.67                               | 48.67          | 53.89              |             |         |
|     | 3    | 22.61                                | 54.29          | 108.18             |             |         |
|     | 4    | 36.41                                | 70.23          | 178.41             |             |         |
|     | 5    | 4.42                                 | -              | -                  |             |         |
| 30  | 1    | 738.86                               | 36.35          | 36.35              | 311139      | 2201263 |
|     | 2    | 60.42                                | 156.79         | 193.14             |             |         |
|     | 3    | 13.29                                | -              | -                  |             |         |
| 31  | 1    | 117.33                               | 9.65           | 9.65               | 310953      | 2199998 |
|     | 2    | 67.42                                | 126.88         | 136.54             |             |         |
|     | 3    | 5.72                                 | -              | -                  |             |         |