

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, Baja California).

La investigación fue financiada por el CONAHCYT (Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías).

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 de Autor.

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



---

**Maestría en Ciencias  
en Ciencias de la Tierra**

---

**Modelos de resistividad eléctrica en la Zona de Falla de San  
Miguel, en el norte de Baja California**

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

Presenta:

**Julia Isabel Ventura Marroquín**

Ensenada, Baja California, México  
2025

Tesis defendida por  
**Julia Isabel Ventura Marroquín**

y aprobada por el siguiente Comité

**Dr. José Manuel Romo Jones**  
Director de tesis

**Dr. Carlos Francisco Flores Luna**

**Dr. Luis Munguía Orozco**

**Dr. Modesto Ortiz Figueroa**



**Dr. Diego Ruíz Aguilar**  
Coordinador del Posgrado en Ciencias de la Tierra

**Dra. Ana Denise Re Araujo**  
Directora de Estudios de Posgrado

Resumen de la tesis que presenta **Julia Isabel Ventura Marroquín** como requisito parcial para la obtención del grado de Maestro en Ciencias en Ciencias de la Tierra con orientación en Geofísica Aplicada

### **Modelos de resistividad eléctrica en la Zona de Falla de San Miguel, en el norte de Baja California**

Resumen aprobado por:

Dr. José Manuel Romo Jones  
**Director de tesis**

La conductividad eléctrica de las rocas en zonas de fallas activas está influenciada por la presencia de fluidos y la concentración de minerales arcillosos, factores que suelen generar áreas de debilidad mecánica, facilitando la liberación de esfuerzos y la ocurrencia de sismos. Dada esta relación, resulta relevante estudiar la conductividad eléctrica en una zona sísmica activa como la Falla San Miguel, ubicada en el Valle de Ojos Negros, Baja California. Esta falla es una de las más activas de la región, con alta actividad microsísmica y eventos sísmicos significativos, además de su cercanía a la ciudad de Ensenada. Este estudio se enfocó en investigar la relación entre la conductividad eléctrica y la sismicidad en la Falla San Miguel mediante la inversión de tres perfiles de datos magnetoteléuticos en 2D y 3D, usando los programas MARE2DEM y ModEM. Se utilizaron datos sísmicos de la Red Sísmica del Noroeste de México (RESNOM), CICESE, abarcando el periodo de 2010 a 2020. Los modelos de resistividad obtenidos muestran zonas conductoras ( $\sim 0.5 - 10 \Omega \cdot m$ ) a una profundidad de 10 km, asociadas a rocas meta-sedimentarias con presencia de fluidos, y una zona resistiva ( $\sim 10\ 000 \Omega \cdot m$ ) en los primeros 8 km, asociada a rocas granitoides del Cinturón Batolítico Peninsular. La sismicidad se concentra entre los 5 y 10 km de profundidad, ubicándose por encima de las zonas conductoras, en el límite entre áreas resistivas y conductoras. Estos resultados sugieren que la migración de fluidos hacia zonas menos permeables podría incrementar la presión de poro, favoreciendo así la actividad microsísmica en la región.

**Palabras clave:** Falla San Miguel, Valle Ojos Negros, Actividad sísmica, Conductividad eléctrica, Fallas activas.

Abstract of the thesis presented by **Julia Isabel Ventura Marroquin** as a partial requirement to obtain the Master of Science degree in Earth Sciences with orientation in Applied Geophysics

### **Electrical resistivity models in the San Miguel Fault Zone, northern Baja California**

Abstract approved by:

PhD. José Manuel Romo Jones  
**Thesis Director**

The electrical conductivity of rocks in active fault zones is influenced by the presence of fluids and the concentration of clay minerals, these factors often create mechanically weak areas, facilitating stress release and the occurrence of earthquakes. Given this relationship, it is relevant to study electrical conductivity in a seismically active area like the San Miguel Fault, located in the Ojos Negros Valley, Baja California. This fault is one of the most active in the region, with high microseismic activity and significant seismic events, as well as its proximity to the city of Ensenada. This study investigate the relationship between electrical conductivity and seismicity in the San Miguel Fault through the inversion of three magnetotelluric data profiles in 2D and 3D, using the MARE2DEM and ModEM programs. Seismic data from the Northwest Mexico Seismic Network (RESNOM) at CICESE, covering the period from 2010 to 2020, was also used. The resistivity models obtained reveal conductive zones ( $\sim 0.5 - 10 \Omega \cdot m$ ) at a depth of 10 km, associated with meta-sedimentary rocks containing fluids, and a resistive zone ( $\sim 10,000 \Omega \cdot m$ ) in the upper 8 km, associated with granitoid rocks of the Peninsular Batholith. Seismicity is concentrated between 5 and 10 km depth, located above the conductive zones, at the boundary between resistive and conductive areas. These results suggest that fluid migration into less permeable zones could increase pore pressure, thereby promoting microseismic activity in the region.

**Keywords:** San Miguel Fault, Ojos Negros Valley, Seismic activity, Electrical conductivity, Active faults.

## **Dedicatoria**

**A mi familia, especialmente a mi mamá, Isabel, a mi fallecido padre, Apolinar, a mi hermano, Julio Gabriel, y a mi primo, Sebastián, por su amor y apoyo incondicional. También, a todas las personas que me han inspirado y/o enseñado a lo largo de mi vida, les agradezco por ser una guía y una fuente constante de motivación.**

## Agradecimientos

Al Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California (CICESE), por brindarme la oportunidad de realizar un posgrado y desarrollarme académicamente.

Al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (CONAHCyT) por brindarme el apoyo económico para realizar mis estudios de maestría.

A mi director de tesis, el Dr. José Manuel Romo Jones, por aceptarme como su estudiante, compartir su conocimiento, guiarme y tener siempre la puerta abierta para ofrecerme parte de su valioso tiempo. Agradezco profundamente el tiempo y la dedicación brindada a este trabajo, así como su disposición para ayudar a sus estudiantes, su paciencia al resolver mis dudas y su motivación para impulsar mi desarrollo académico.

A los miembros de mi comité de tesis, Dr. Carlos Francisco Flores Luna, Dr. Luis Munguía Orozco y Dr. Modesto Ortiz Figueroa, por haber aceptado formar parte de este trabajo y por sus valiosas contribuciones para el enriquecimiento de mi tesis.

A mi novio, Arceo Ernesto, por su amor, apoyo incondicional y por estar siempre a mi lado en cada paso de la maestría. Gracias por tu paciencia, por motivarme siempre, darme muchas alegrías y por creer en mí.

A mis queridas amigas Sughey y Loli, con quienes compartí muchos momentos y anécdotas divertidas a lo largo de la maestría. También a mis amigos Cristian, Raúl y José, y por supuesto, a mis buenas amigas Iris y Natalie. Mi agradecimiento también para Thalía, quien me brindó su ayuda en varias ocasiones para resolver dudas sobre mi trabajo.

A mi familia por apoyarme en todo momento.

# Tabla de contenido

	Página
Resumen en español.....	ii
Resumen en inglés.....	iii
Dedicatoria .....	iv
Agradecimientos.....	v
Lista de figuras.....	ix
Lista de tablas .....	xv
<b>Capítulo 1. Introducción.....</b>	<b>1</b>
1.1 Antecedentes .....	2
1.2 Justificación .....	3
1.3 Hipótesis.....	3
1.4 Objetivos .....	3
1.4.1 Objetivo general .....	3
1.4.2 Objetivos específicos.....	4
<b>Capítulo 2. Zona de estudio.....</b>	<b>5</b>
2.1 Marco Geológico .....	6
2.1.1 Geología estructural.....	6
2.1.2 Geología superficial.....	8
2.2 Marco Sismo-Tectónico.....	10
<b>Capítulo 3. Fundamentos teóricos .....</b>	<b>13</b>
3.1 Método Magnetotelúrico.....	13

3.2	Ecuaciones de Maxwell .....	14
3.3	Ecuación de onda .....	16
3.3.1	Campos armónicos .....	17
3.4	Aproximación Cuasiestática .....	18
3.5	Skin Depth .....	19
3.6	Tensor de Impedancias .....	20
3.6.1	Resistividad aparente .....	20
3.6.2	Dimensionalidad Geoeléctrica .....	21
3.6.2.1	Medio Unidimensional (1D) .....	21
3.6.2.2	Medio Bidimensional (2D).....	21
3.6.2.3	Medio Tridimensional (3D).....	23
3.7	Invariantes $\rho \pm$ .....	23
<b>Capítulo 4. Metodología.....</b>		<b>26</b>
4.1	Datos observados.....	26
4.2	Inversión 2D .....	27
4.2.1	Perfil 1 .....	29
4.2.1.1	Prueba de Sensibilidad .....	33
4.2.2	Perfil 2 .....	35
4.2.2.1	Prueba de Sensibilidad .....	37
4.3	Inversión 3D .....	38
4.3.1	Modelo Ojos Negros.....	40
4.3.2	Modelo San Miguel .....	46
4.3.2.1	Prueba de Sensibilidad .....	51
<b>Capítulo 5. Resultados y Discusión.....</b>		<b>53</b>

5.1 Modelos 2D .....	53
5.2 Modelos 3D .....	56
5.3 Integración de eventos sísmicos .....	63
5.3.1 Datos de sismicidad.....	63
5.3.2 Integración de sismicidad en modelos 2D .....	64
5.3.3 Integración de sismicidad en modelos 3D .....	66
5.4 Relación entre la sismicidad y la conductividad eléctrica .....	70
<b>Capítulo 6. Conclusiones .....</b>	<b>72</b>
<b>Literatura citada .....</b>	<b>73</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>77</b>

## Lista de figuras

Figura	Página
1. Mapa de la zona de estudio. El rectángulo negro delimita el área de interés. Los cuadros verdes representan los sitios magnetotelúricos (MT) del perfil 1, los cuadros amarillos corresponden al perfil 2, y los cuadros naranjas al perfil 3. Las líneas rojas indican las fallas geológicas conocidas, mientras que las líneas punteadas marcan las fallas geológicas inferidas. ....	5
2. Mapa de las provincias tectónicas de Baja California y sus principales rasgos estructurales. Las fallas principales (líneas rojas) separan los tres dominios estructurales: la Provincia Extensional del Golfo (PEG), la Provincia Transpeninsular de Deslizamiento (PTD) y la Provincia Central Estable (PCE). El movimiento relativo entre las placas Pacífico y Norteamericana está indicado por las flechas. El borde de la placa tiene una orientación NW-SE a lo largo del Golfo de California. Los sitios MT correspondientes a los tres perfiles de datos procesados se representan con cuadros amarillos y se ubican en la PTD, al norte de la Falla Agua Blanca. ....	7
3. Geología superficial del área de estudio. Los colores del mapa indican los diferentes tipos de roca. Los cuadros en negro marcan los sitios MT correspondientes a los tres perfiles de datos procesados en el presente trabajo. Las líneas negras continuas representan fallas geológicas conocidas mientras que las líneas punteadas las fallas inferidas. ....	9
4. Distribución de la sismicidad en el área de estudio, mostrando los sitios MT y los principales rasgos estructurales. Las líneas rojas representan fallas geológicas, mientras que las líneas punteadas corresponden a fallas inferidas. Los sismos históricos están señalados con estrellas rojas (Allen et al., 1965; Doser, 1992; González-Escobar, 1987) y los sitios MT se indican con cuadros negros. ....	11
5. Dimensionalidad de medios 1D, 2D y 3D. ....	22
6. Medio 2D donde la dirección de la estructura está orientada respecto al eje $x$ . En el modo TE el campo eléctrico está a lo largo de la estructura, mientras en el modo TM el campo eléctrico cruza la interfaz. ....	23
7. Curvas depuradas de resistividad aparente y fase para los sitios On01 y On10 del perfil 1. Los círculos representan los datos de cada sondeo; la componente $Z_{xy}$ se muestra en azul, la componente $Z_{yx}$ en rojo, y los datos eliminados aparecen en gris. Las barras de error se representan con líneas continuas verticales. ....	26
8. Curvas depuradas de resistividad aparente y fase para los sitios sm03 y sm12 del perfil 2, y los sitios sm15 y sm21 del perfil 3. Los círculos representan los datos de cada sondeo; la componente $Z_{xy}$ se muestra en azul, la componente $Z_{yx}$ en rojo, y los datos eliminados aparecen en gris. Las barras de error se representan con líneas continuas verticales. ....	27
9. Flujo típico de trabajo del código MARE2DEM. Modificada de Key (2016). ....	28
10. Discretización del perfil 1 (Ojos Negros). En la región C los datos tendrán mayor influencia, por tal motivo los triángulos son más pequeños. Por otra parte en la región B el tamaño de los triángulos aumenta y en la región C aumenta el tamaño de los triángulos hacia los extremos. ....	29

11. Curva L del perfil 1 (Ojos Negros), obtenida de los diferentes valores de rugosidad frente a los valores de RMS de los modelos de inversión 2D. .... 31
12. Comparación entre las resistividades aparentes y las fases observadas con las calculadas para los sitios On15, On14, On02 y On03 del perfil 1. Los puntos representan los datos medidos, mientras que las líneas muestran las respuestas calculadas a partir del modelo 2D..... 32
13. Modelo 2D del perfil 1 (Ojos Negros) con orientación SW-NE. Los valores de resistividad ( $\rho$ ) se representan en escala logarítmica, donde los colores cálidos indican resistividades bajas y los colores fríos corresponden a resistividades más altas. Los sitios MT se identifican mediante triángulos de color blanco..... 33
14. Modelo modificado del perfil 1 donde el cuerpo conductor ha sido sustituido por uno resistivo con un valor asignado de  $2,000 \Omega \cdot m$ . .... 34
15. Comparación entre las resistividades aparentes y las fases observadas con las calculadas a partir del modelo modificado (Figura 14) para los sitios On01 y On03 del perfil 1. Los puntos representan los datos medidos, mientras que las líneas corresponden a las respuestas calculadas a partir del modelo modificado. .... 34
16. Curva L del perfil 2 (San Miguel), obtenida de los diferentes valores de rugosidad frente a los valores de RMS de los modelos de inversión 2D. .... 35
17. Comparación entre las resistividades aparentes y las fases observadas con las calculadas para los sitios sm13 y sm21 del perfil 2. Los puntos representan los datos medidos, mientras que las líneas muestran las respuestas calculadas a partir del modelo 2D. .... 36
18. Modelo 2D del perfil 2 (San Miguel) con orientación SW-NE. Se utiliza una escala logarítmica para representar los valores de resistividad ( $\rho$ ). Los sitios MT están representados con triángulos de color blanco..... 36
19. Modelo modificado del perfil 2 donde el cuerpo conductor ha sido sustituido por uno resistivo con un valor asignado de  $2,000 \Omega \cdot m$ . .... 37
20. Comparación entre las resistividades aparentes y las fases observadas con las calculadas a partir del modelado modificado para los sitios sm13 y sm16 del perfil 2. Los puntos representan los datos medidos, mientras que las líneas corresponden a las respuestas calculadas a partir del modelo modificado. .... 38
21. Flujo sencillo de trabajo del código ModEM..... 39
22. Flujo de trabajo del código en Matlab para poder generar los archivos de datos (.dat) correspondientes a los tres perfiles de datos magnetotelúricos (MT). .... 41
23. Distribución de los sitios MT del perfil 1 y representación de las capas requeridas para representar la topografía en el modelo. .... 41
24. Discretización del modelo 3D del perfil 1 (Ojos Negros). (a) Visualización en 3D del modelo con  $34 \times 58 \times 58$  celdas en las direcciones **X**, **Y** y **Z**. (b) Vista en planta (2D) que muestra la ubicación de los sitios MT, representados por círculos blancos. En la zona de interés, las celdas tienen dimensiones de  $1500 \times 1500m$ . .... 42

25. Flujo de trabajo del código en Matlab para la generación de los archivos de covarianza (.cov) correspondientes a los tres perfiles de datos magnetotelúricos (MT). ..... 43
26. Curvas de resistividad aparente y fase del tensor completo de impedancias para los sitios On05 y On07. Los círculos corresponden a los datos observados en campo, mientras que las líneas continuas muestran los valores estimados a partir de la inversión..... 44
27. Curvas de ajustes del tipper para los sitios On05 y On07. Los círculos corresponden a los datos observados en campo, mientras que las líneas continuas muestran los valores estimados a partir de la inversión. .... 45
28. Modelo 3D del perfil 1 (Ojos Negros) con orientación SW-NE. Los valores de resistividad ( $\rho$ ) se representan en una escala logarítmica donde los colores cálidos indican resistividades bajas y los colores fríos resistividades altas. Los sitios MT se muestran con triángulos negros. .... 45
29. Discretización del modelo 3D del perfil 2 y 3 (San Miguel). (a) Visualización en 3D del modelo con  $50 \times 60 \times 58$  celdas en las direcciones **X**, **Y** y **Z**. (b) Vista en planta (2D) que muestra la ubicación de los sitios MT, representados por círculos blancos. En la zona de interés, las celdas tienen dimensiones de  $1200 \times 1200$  m. .... 47
30. (a) Curvas de resistividad aparente y fase del tensor completo de impedancias para los sitios sm13 y sm14 del perfil 2. (b) Curvas de ajustes del tipper para los sitios sm13 y sm14. Los círculos corresponden a los datos observados en campo, mientras que las líneas continuas muestran los valores estimados a partir de la inversión. .... 48
31. (a) Curvas de resistividad aparente y fase del tensor completo de impedancias para los sitios sm08 y sm06 del perfil 3. (b) Curvas de ajustes del tipper para los sitios sm08 y sm06. Los círculos corresponden a los datos observados en campo, mientras que las líneas continuas muestran los valores estimados a partir de la inversión. .... 49
32. Modelos 3D de los perfiles 2 y 3 de San Miguel, con orientaciones SW-NE y NW-SE, respectivamente. Los valores de resistividad ( $\rho$ ) se representan mediante una escala logarítmica. Los sitios MT se muestran como triángulos negros. .... 50
33. Modelo modificado de San Miguel. Se presentan los perfiles 2 y 3, donde el cuerpo conductor, ubicado entre 2500 m y 7000 m de profundidad, fue modificado a un cuerpo resistivo con una resistividad de  $1000 \Omega \cdot m$ . .... 51
34. Vista en planta de la modificación del modelo San Miguel, mostrando el cambio del cuerpo conductor ubicado entre 2500 m y 7000 m de profundidad a un cuerpo resistivo con  $1000 \Omega \cdot m$ . Las modificaciones se visualizan a profundidades de  $\sim 3$  km y 7 km, señaladas con un círculo blanco. .... 52
35. Resultado de la inversión del modelo San Miguel, presentado en vista en planta a diferentes profundidades ( $\sim 3$  km y 7 km). .... 52
36. Interpretación del modelo 2D del perfil 1 (Ojos Negros) con orientación SW-NE. Se identificaron zonas de diversas resistividades, las cuales fueron etiquetadas con letras del abecedario en orden alfabético. Las fallas a lo largo del perfil están señaladas con flechas negras. .... 53

37. Interpretación del modelo 2D del perfil 2 (San Miguel) con orientación SW-NE. Se identificaron zonas de diversas resistividades, las cuales fueron etiquetadas con letras del abecedario en orden alfabético. Las fallas a lo largo del perfil están señaladas con flechas negras. .... 55
38. Interpretación del modelo 3D del perfil 1 (Ojos Negros). (a) Vista en planta a profundidades de 8 km y 11 km. (b) Sección del perfil 1 de Ojos Negros en profundidad, con orientación SW-NE. Se identificaron zonas con diversas resistividades, etiquetadas alfabéticamente. Las fallas a lo largo del perfil están indicadas con flechas negras, y las líneas negras señalan la zona de cizalla inferida asociada a la Falla San Miguel. .... 57
39. Cortes de secciones del modelo 3D de Ojos Negros. (a) Secciones en la dirección X, espaciadas cada 10 km. (b) Secciones en la dirección Y, espaciadas cada 10 km. (c) Superposición de los cortes en las direcciones X y Y, con una profundidad máxima de 40 km. .... 58
40. Vista en planta del modelo San Miguel a profundidades de 8 km y 11 km. Se identificaron zonas de diversas resistividades, etiquetadas con letras del abecedario en orden alfabético. .... 59
41. Interpretación de los perfiles 2 y 3 de extraídos del modelo 3D de San Miguel, con orientaciones SW-NE y NW-SE, respectivamente. Se identificaron zonas con diversas resistividades, etiquetadas alfabéticamente. Las fallas a lo largo del perfil están indicadas con flechas negras..... 60
42. Cortes de secciones del modelo 3D de San Miguel. (a) Secciones en la dirección X, espaciadas cada 10 km. (b) Secciones en la dirección Y, espaciadas cada 10 km. (c) Superposición de los cortes en las direcciones X y Y, con una profundidad máxima de 40 km. .... 62
43. Sismos depurados. (a) Mapa de distribución de sismos con los tres perfiles MT. (b) Distribución de sismos en función de su profundidad. Los colores de los sismos representan su magnitud. .... 64
44. Integración de datos sísmicos en el modelo 2D del perfil 1 (Ojos Negros), con orientación SW-NE. Los sismos se indican con cirulos blancos. Las fallas a lo largo del perfil se señalan con flechas negras..... 65
45. Integración de datos sísmicos en el modelo 2D del perfil 2 (San Miguel), con orientación SW-NE. Los sismos se indican con cirulos blancos. Las fallas a lo largo del perfil se señalan con flechas negras..... 65
46. Integración de la sismicidad en el modelo 3D del perfil 1 (Ojos Negros). (a) Vista en planta a profundidades de 8 km y 15 km, donde se muestra la sismicidad integrada en el dominio del modelo. Las áreas de sismos incluidas en la sección a profundidad del perfil ( **$\pm 5$  km**) están delimitadas por cuadros con líneas punteadas negras. (b) Sección en profundidad del perfil 1 de Ojos Negros, con orientación SW-NE, con la sismicidad integrada. Se incluye además un gráfico de barras que muestra la cantidad de sismos en intervalos de 2500 m de distancia a lo largo del perfil. Las fallas están indicadas con flechas negras. .... 67
47. Integración de la sismicidad en el modelo 3D del perfil 2 (San Miguel). (a) Vista en planta a profundidades de 7 km y 11 km, donde se muestra la sismicidad integrada en el dominio del modelo. Las áreas de sismos incluidas en la sección a profundidad del perfil ( **$\pm 5$  km**) están delimitadas por cuadros con líneas punteadas negras. (b) Sección en profundidad del perfil 2 de San Miguel, con orientación SW-NE, con la sismicidad integrada. Se incluye además un

- gráfico de barras que muestra la cantidad de sismos en intervalos de 2500 m de distancia a lo largo del perfil. Las fallas están indicadas con flechas negras. .... 68
48. Integración de la sismicidad en el modelo 3D del perfil 3 (San Miguel). (a) Vista en planta a profundidades de 7 km y 11 km, donde se muestra la sismicidad integrada en el dominio del modelo. Las áreas de sismos incluidas en la sección a profundidad del perfil ( $\pm 5$  km) están delimitadas por cuadros con líneas punteadas negras. (b) Sección en profundidad del perfil 3 de San Miguel, con orientación NW-SE, con la sismicidad integrada. Se incluye además un gráfico de barras que muestra la cantidad de sismos en intervalos de 2500 m de distancia a lo largo del perfil. .... 69
49. Ajuste de los datos de inversión 2D para los sitios On01 a On09 del perfil 1. Los círculos representan los datos observados, mientras que las líneas continuas muestran los datos calculados mediante el proceso de inversión. .... 77
50. Ajuste de los datos de inversión 2D para los sitios On10 a On17 del perfil 1. Los círculos representan los datos observados, mientras que las líneas continuas muestran los datos calculados mediante el proceso de inversión. .... 78
51. Ajuste de los datos de inversión 2D para todos los sitios del perfil 2. Los círculos representan los datos observados, mientras que las líneas continuas muestran los datos calculados mediante el proceso de inversión. .... 79
52. Ajuste de los datos de inversión 3D para los sitios On01 a On09 del perfil 1. Los círculos representan los datos observados, mientras que las líneas continuas muestran los datos calculados mediante el proceso de inversión. .... 80
53. Ajuste de los datos de inversión 3D para los sitios On01 a On09 del perfil 1. Los círculos representan los datos observados, mientras que las líneas continuas muestran los datos calculados mediante el proceso de inversión. .... 81
54. Curvas de ajustes del tipper para los sitios On01 a On09 del perfil 1. Los círculos corresponden a los datos observados en campo, mientras que las líneas continuas muestran los valores estimados a partir de la inversión. .... 82
55. Curvas de ajustes del tipper para los sitios On10 a On17 del perfil 1. Los círculos corresponden a los datos observados en campo, mientras que las líneas continuas muestran los valores estimados a partir de la inversión. .... 83
56. Ajuste de los datos de inversión 3D para los sitios sm03 a sm12 del perfil 3. Los círculos representan los datos observados, mientras que las líneas continuas muestran los datos calculados mediante el proceso de inversión. .... 84
57. Curvas de ajustes del tipper para los sitios sm01 a sm12 del perfil 3. Los círculos corresponden a los datos observados en campo, mientras que las líneas continuas muestran los valores estimados a partir de la inversión. .... 85
58. Ajuste de los datos de inversión 3D para los sitios sm13 a sm23 del perfil 2. Los círculos representan los datos observados, mientras que las líneas continuas muestran los datos calculados mediante el proceso de inversión. .... 86

59. Curvas de ajustes del tipper para los sitios sm13 a sm23 del perfil 2. Los círculos corresponden a los datos observados en campo, mientras que las líneas continuas muestran los valores estimados a partir de la inversión.....	87
60. Seudosecciones de las componentes XX y XY del modelo 3D del perfil 1 (Ojos Negros). .....	88
61. Seudosecciones de las componentes YY y YX del modelo 3D del perfil 1 (Ojos Negros). .....	89
62. RMS normalizado por sitio del perfil 1 (Ojos Negros) del modelo 3D, detallado para cada componente.....	90
63. Seudosecciones de las componentes XX y XY del modelo 3D del perfil 2 (San Miguel). .....	91
64. Seudosecciones de las componentes YY y YX del modelo 3D del perfil 2 (San Miguel). .....	92
65. RMS normalizado por sitio del perfil 2 (San Miguel) del modelo 3D, detallado para cada componente.....	93
66. Seudosecciones de las componentes XX y XY del modelo 3D del perfil 3 (San Miguel). .....	94
67. Seudosecciones de las componentes YY y YX del modelo 3D del perfil 2 (San Miguel). .....	95
68. RMS normalizado por sitio del perfil 3 (San Miguel) del modelo 3D, detallado para cada componente.....	96

## Lista de tablas

Tabla	Página
1. Número de iteraciones y valor de RMS inicial y final obtenidos en cada esquema de inversión para el perfil 1 (Ojos Negros). .....	44
2. Número de iteraciones y valor de RMS inicial y final obtenidos en cada esquema de inversión para el perfil 2 y 3 (San Miguel). .....	47

## Capítulo 1. Introducción

---

En zonas de fallas activas es común que la conductividad eléctrica de las rocas se vea influenciada por la presencia de fluidos y por la concentración de minerales arcillosos. Por otra parte, la presencia de fluidos juega un papel fundamental en el proceso de fractura de las rocas de la corteza. La asociación entre zonas conductoras y áreas de debilidad mecánica en la corteza, junto con el análisis de otras propiedades físicas y su contribución en los procesos de ruptura, se ha convertido en un tema de gran interés, debido a sus implicaciones en la predicción de sismos (Oliver, 2004; Aizawa et al., 2017).

En este caso, nos proponemos investigar la distribución de la conductividad eléctrica en la zona de Falla de San Miguel, la cual es una estructura geológica discontinua, formada por diferentes segmentos, se localiza en el Valle de Ojos Negros, 100 km ESE de la ciudad de Ensenada, Baja California.

Tectónicamente la zona de estudio se caracteriza por una elevada actividad microsísmica, pero también ha generado sismos con magnitudes importantes ( $M \geq 6$ ). En 1956 se produjo la ruptura de un sector de 20 km en la superficie del Sistema San Miguel Vallecitos, la cual causó una secuencia de cuatro sismos con magnitudes de 6.8, 6.4 y 6.3 (Doser, 1992; Rebolgar & Reichle, 1987; Reyes et al., 1975). Por esta razón, resulta altamente relevante investigar la distribución de la conductividad eléctrica en esta zona y establecer correlaciones con la generación de sismos.

Para poder determinar la distribución de resistividades en la zona de estudio, se utilizaron modelos de inversión 2D y 3D de 3 perfiles de datos magnetoteléuricos. El procesado de los datos se llevó a cabo con dos códigos diferentes. En el caso del modelado 2D se utilizó el programa MARE2DEM, el cual fue desarrollado por Key (2016), mientras que para el caso del modelado 3D se empleó el código ModEM implementado por Kelbert et al. (2014). En cuanto a la sismicidad de la zona, se utilizó un conjunto de datos sísmicos obtenidos de la base de datos de la Red Sismológica del Noroeste de México (RESNOM), del CICESE, que abarcan desde 2010 hasta 2020.

Finalmente, en este trabajo se describe la sismicidad de la zona y se discute la relación que ésta pueda tener con la distribución de resistividad obtenida con los modelos generados. Estos resultados nos permiten tener un mayor entendimiento de los procesos físicos y geológicos que están involucrados en la sismicidad de la zona.

## 1.1 Antecedentes

Existen diversos estudios que han explorado la relación entre la sismicidad en zonas de fallas y la resistividad eléctrica, basados en modelos 2D o 3D de resistividad en perfiles de datos magnetotelúricos (MT) o algún otro método electromagnético (Aizawa et al., 2017; Begum, 2017; Kováčiková et al., 2019). En áreas de fallamiento activo, la presencia de fluidos en zonas fracturadas y la concentración de minerales arcillosos pueden incrementar significativamente la conductividad eléctrica de las rocas de la corteza. Estos estudios, que correlacionan la sismicidad con la resistividad de las rocas, destacan la presencia de zonas conductoras en sus modelos de resistividad, las cuales suelen asociarse con la presencia de fluidos. Además, observan que la mayoría de los eventos sísmicos ocurren en el límite entre zonas conductoras y resistivas.

En la zona de estudio, la estructura principal de interés es la Falla San Miguel, la cual es conocida como una de las fallas más activas en la región y con un historial de eventos sísmicos significativos, lo cual ha atraído la atención de numerosos sismólogos (Shor & Roberts, 1958; Reyes et al., 1975; Johnson et al., 1976; Brune et al., 1979; Doser, 1992; Hirabayashi et al., 1996).

En cuanto a estudios específicos sobre la correlación entre sismicidad y distribución de resistividades en la zona de estudio, existen dos trabajos principales. El primero, fue realizado por Oliver (2004) el cual generó modelos 2D a partir de dos perfiles en un sector de la Falla de San Miguel, empleando tres métodos: impedancias de rumbo fijo, transformación Serie-Paralelo (Romo et al, 2005) y el modo pseudo TE-TM (Oliver, 2004). Con los modelos obtenidos, Oliver (2004) correlacionó la conductividad de la falla con la actividad sísmica observada en la zona.

El segundo estudio, de Antonio-Carpio et al. (2011), realizó una inversión 2D de un perfil MT en el Valle de Ojos Negros, el cual atraviesa tanto la Falla San Miguel como la Falla Ojos Negros. La inversión la realizó utilizando las respuestas invariantes en serie y paralelo, así como las convencionales TE y TM de Groom-Bailey (1989). Al igual que Oliver (2004), Antonio-Carpio et al. (2011) también encontró una relación entre la conductividad y la sismicidad local en la zona de estudio.

En esta tesis se emplearon los datos de los perfiles MT de Oliver (2004) y Antonio-Carpio et al. (2011) para realizar modelos 2D y 3D. Para la inversión en 2D de cada perfil, se usaron las funciones de respuesta rho +/- propuestas por Gómez-Treviño et al. (2014), y para la inversión 3D se utilizaron las cuatro componentes del tensor de impedancia.

## 1.2 Justificación

La Falla San Miguel ha sido objeto de diversos estudios, los cuales indican que es una falla relativamente joven y muestra una alta actividad microsísmica. Además, su ubicación cercana a la ciudad de Ensenada, Baja California, la convierte en un área de interés geofísico. En el pasado, en 1956, la falla experimentó cuatro eventos sísmicos de magnitud considerable (6.8, 6.4, 6.3 y 6.1). Estas observaciones nos motivan a investigar esta zona con el objetivo de analizar la correlación entre la resistividad eléctrica y la actividad sísmica. Mediante este estudio, buscamos obtener una mejor comprensión de los procesos geofísicos en la zona de la Falla de San Miguel.

## 1.3 Hipótesis

La resistividad de las rocas está controlada principalmente por su contenido de fluidos, a mayor contenido de fluidos, menor es su resistividad eléctrica. Se postula que las rocas con mayor resistividad, con poco o nulo contenido de fluidos en sus poros, son más frágiles y pueden romperse más fácilmente que rocas con un alto contenido de fluidos, más plásticas y más susceptibles de deformarse sin romperse. Por otro lado, se ha observado que la influencia de los fluidos en zonas de ruptura activas es un factor importante en la generación de sismos, ya que estos fluidos pueden actuar como lubricante, facilitando el deslizamiento de las rocas a lo largo de la falla y aumentando la actividad sísmica (Kováčiková et al., 2019; Aizawa et al., 2017; De Barros et al., 2021).

## 1.4 Objetivos

### 1.4.1 Objetivo general

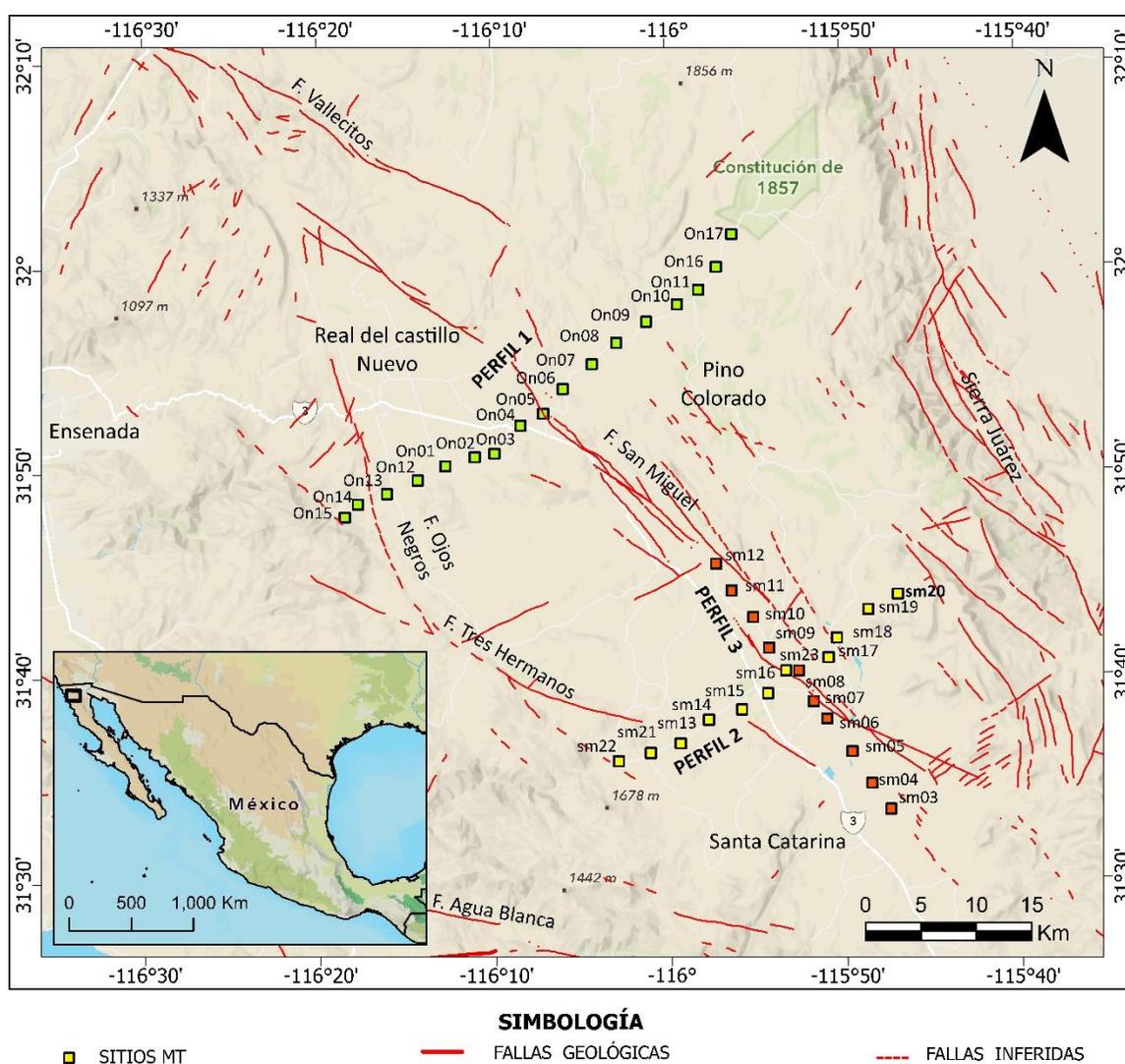
Analizar la relación entre la conductividad eléctrica del subsuelo y la actividad sísmica en la zona de Falla de San Miguel, para conocer si existe una correlación significativa entre ambos procesos. Se cuenta con dos conjuntos de datos magnetoteléuricos consistentes en 21 y 17 sitios MT observados por Oliver (2004) y Antonio-Carpio et al. (2011), respectivamente. Los datos se encuentran distribuidos en tres perfiles en la zona de estudio (Figura 1). En este trabajo usaremos funciones de respuesta invariantes para la inversión 3D de ambos conjuntos.

### 1.4.2 Objetivos específicos

- Analizar las bases de datos existentes para depurar la información y prepararla para su uso en los procesos de inversión.
- Generar modelos geoelectricos 2D y 3D, a partir de los datos magnetotelúricos que fueron obtenidos por Oliver (2004) y Antonio-Carpio et al. (2011).
- Determinar la distribución de eventos sísmicos y compararla con la distribución de resistividad del subsuelo, para analizar cuál es la relación que existe entre la conductividad eléctrica y la sismicidad de la zona.

## Capítulo 2. Zona de estudio

En este trabajo nos enfocaremos en el área delimitada por el rectángulo negro en la Figura 1, que abarca desde los 31°30' S hasta los 32°10' N de latitud y desde los 115°40' E hasta los 116°30' W de longitud, en Baja California, México. El área de estudio está delimitada al norte (N) por la Falla Vallecitos, al sur (S) por la Falla Agua blanca, al oeste (W) por la ciudad de Ensenada y al este (E) por la Sierra Juárez. Esta región comprende diversos rasgos estructurales de interés, como lo son la Falla de Ojos Negros, la Falla Tres Hermanos y la Falla San Miguel, siendo esta última la estructura de mayor interés en el presente estudio.



**Figura 1.** Mapa de la zona de estudio. El rectángulo negro delimita el área de interés. Los cuadros verdes representan los sitios magnetotelúricos (MT) del perfil 1, los cuadros amarillos corresponden al perfil 2, y los cuadros naranjas al perfil 3. Las líneas rojas indican las fallas geológicas conocidas, mientras que las líneas punteadas marcan las fallas geológicas inferidas.

## 2.1 Marco Geológico

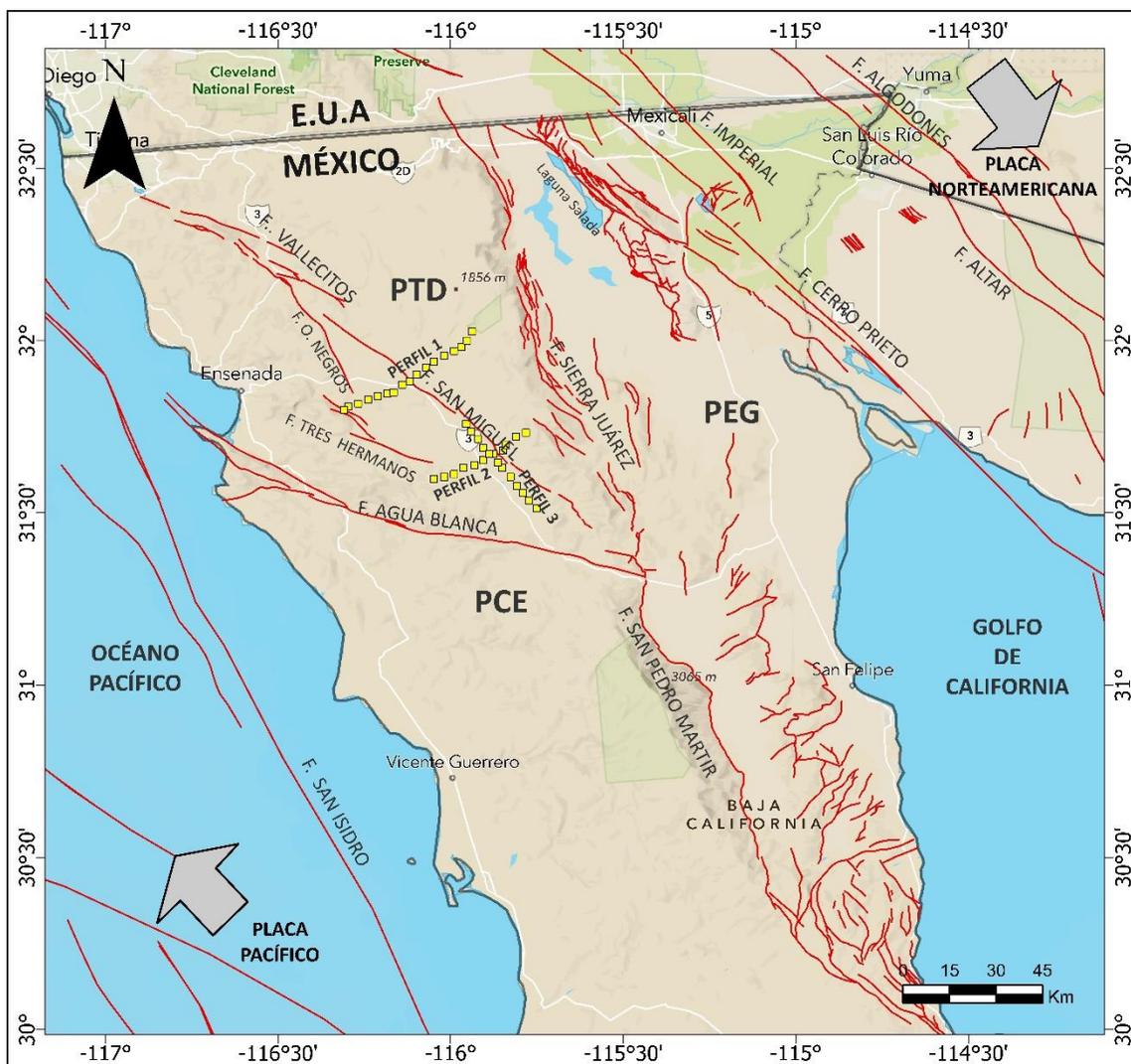
### 2.1.1 Geología estructural

Las características estructurales y morfológicas del margen continental de Baja California Norte son producto de una combinación de procesos tectónicos que inician desde el Mesozoico con el movimiento de subducción de la placa Farallón y se continúa hasta el presente, bajo el régimen tectónico impuesto por el Sistema de San Andrés- Golfo de California (Wong et al., 1987).

Según Oliver (2004), la configuración de este margen continental está constituido básicamente por un conjunto de sistemas de fallas de rumbo, generado hace aproximadamente 12 Ma por la interacción de dos grandes placas: la de Norteamérica y la del Pacífico. Estructuralmente, Baja California Norte es una zona compleja, donde cada sistema de falla se caracteriza por una falla principal y una serie de fallas menores (fallas normales) asociadas a ésta, lo cual sugiere un régimen tectónico tensional.

Con base en los rasgos estructurales que presenta la región norte de Baja California, Gastil et al. (1975) la divide en tres provincias: Borde Continental a lo largo de la costa del Pacífico, la Cordillera Peninsular, que constituye la parte central de la península, y la Depresión del Golfo de California, a lo largo de la costa oriental de la península. Por otro lado, al considerar la historia de la deformación y actividad tectónica, la península de Baja California se divide en tres dominios estructurales (Figura 2): la Provincia Extensional del Golfo (PEG), situada al este de las fallas Sierra Juárez y San Pedro Mártir; la Provincia Transpeninsular de Deslizamiento (PTD), ubicada al norte de la falla Agua Blanca y al oeste de la falla Sierra Juárez; y la Península Central Estable (PCE), localizada al sur de la falla Agua Blanca y al oeste de la PEG. (Antonio-Carpio et al., 2011).

La zona de estudio se encuentra al norte de la Falla Agua Blanca, en la Provincia Transpeninsular de Deslizamiento, una región caracterizada por fallas de rumbo lateral derecho. Entre las estructuras de interés en el área se destacan las fallas San Miguel, Tres Hermanos y Ojos Negros. Estas fallas forman parte del sistema de fallas San Miguel-Vallecitos, un sistema sísmicamente muy activo. Este sistema forma un arreglo escalonado de tipo lateral derecho entre las fallas Calabazas, Vallecitos y San Miguel (Cruz-Castillo, 2002). Según lo reportado por Cid-Villegas et al. (2017), estas fallas tienen una velocidad de desplazamiento de aproximadamente 1mm/año y su orientación es NW – SE.



**Figura 2.** Mapa de las provincias tectónicas de Baja California y sus principales rasgos estructurales. Las fallas principales (líneas rojas) separan los tres dominios estructurales: la Provincia Extensional del Golfo (PEG), la Provincia Transpeninsular de Deslizamiento (PTD) y la Provincia Central Estable (PCE). El movimiento relativo entre las placas Pacífico y Norteamericana está indicado por las flechas. El borde de la placa tiene una orientación NW-SE a lo largo del Golfo de California. Los sitios MT correspondientes a los tres perfiles de datos procesados se representan con cuadros amarillos y se ubican en la PTD, al norte de la Falla Agua Blanca.

La Falla San Miguel es una estructura de desplazamiento lateral derecho y rumbo  $N60^{\circ}W$  que se extiende desde el sur de San Miguel hasta el oriente del Valle San Rafael. Es una estructura geológica activa, de unos 100 km de longitud, la parte superficial de la Falla San Miguel no es un trazo continuo, sino que esta formada por varios segmentos de alrededor de 20 km de longitud cada uno, sin aparente conexión entre ellos, al menos en superficie (Oliver, 2004). El inicio de la actividad de esta falla se sitúa en el Mioceno medio. Hirabayashi et al. (1996) menciona que tiene una tasa de deslizamiento geológico máxima de 0.55 mm/año y una tasa de deslizamiento geodésico de  $1.2 \pm 0.6$  mm/año y se le considera una de las más activas en la región (Dixon et al., 2002).

Por otra parte, la Falla Tres Hermanos, es una falla dextral, se encuentra muy cerca del Valle San Miguel, por lo que se considera parte del sistema de fallas San Miguel-Vallecitos (Suárez-Vidal et al., 1991). Aunque es paralela al sistema San Miguel-Vallecitos, la velocidad de desplazamiento de esta falla es desconocida. Entre la zona de las fallas Tres Hermanos y San Miguel, se ubica la Falla Ojos Negros, donde se ha registrado una gran actividad microsísmica (Cruz-Castillo, 2002).

### 2.1.2 Geología superficial

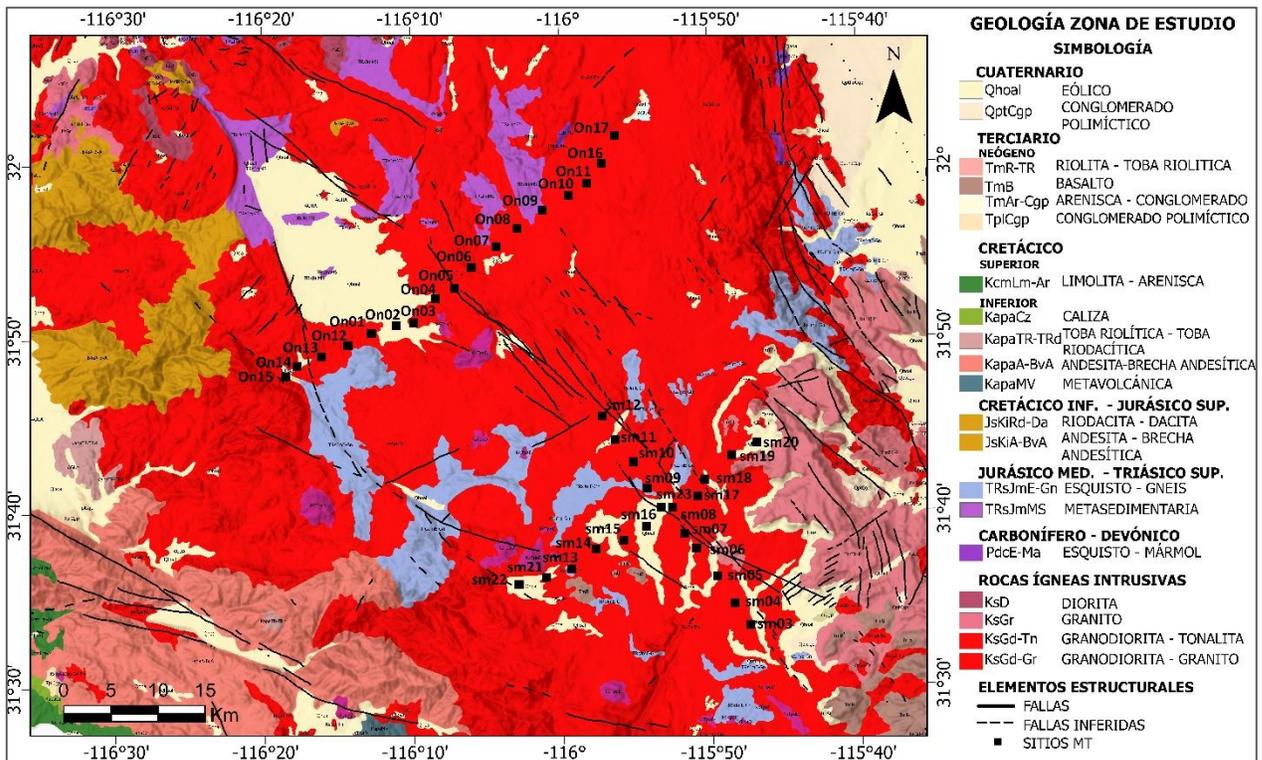
La península de Baja California según Gastil et al. (1975) está compuesta por rocas que pertenecen a dos periodos geológicos: el Mesozoico medio y el Cenozoico medio. Durante el Mesozoico, que comprende desde el Jurásico hasta el Cretácico medio, se produjo el emplazamiento del Cinturón Batolítico Peninsular, un proceso que implicó una profunda deformación estructural, levantamientos y metamorfismos que alteraron significativamente la geología preexistente. En el Cenozoico medio, la región se caracterizó por la acumulación de una amplia variedad de rocas volcánicas, un metamorfismo de menor grado, el emplazamiento de cuerpos graníticos, y la creación del Golfo de California (Gastil et al., 1975). El emplazamiento del Batolito Peninsular permite dividir las rocas de Baja California en dos intervalos significativos: el pre-batolítico, que abarca las rocas formadas antes y durante el emplazamiento, y el post-batolítico, que incluye todas las rocas que se formaron después.

El área de estudio está compuesta litológicamente por rocas prebatolíticas, principalmente por rocas volcanoclásticas de la Formación Alisitos de edad Cretácico Temprano (100-120 Ma), así como por rocas metamórficas, que incluyen mármoles, pizarras, cuarcitas, esquistos y gneises. Además, está presente un conjunto de rocas batolíticas, resultado del emplazamiento del Batolito Peninsular hacia el final del Mesozoico, durante el Cretácico Tardío (~100 Ma). Esta intrusión magmática, que recorre toda la península, dio origen a la Cordillera Peninsular. El batolito está compuesto principalmente por rocas intrusivas predominantemente félsicas, con una composición que varía desde granodiorita hasta tonalita, y en menor medida, gabros y dacitas (Gastil et al., 1975).

Gastil et al. (1975) menciona que en el oeste de la península, el batolito se emplaza en algunos sitios y en otros coexiste temporalmente con las rocas volcanoclásticas de la Formación Alisitos, cuya edad corresponde al Cretácico Temprano (100-120 Ma). Al norte de la Falla de Agua Blanca, la Formación Alisitos está constituida principalmente por secuencias volcánicas, como tobas y flujos piroclásticos, con una escasa presencia de rocas sedimentarias. En contraste, al sur de la Falla de Agua Blanca, la Formación

Alisitos incluye secuencias de limolitas, lutitas calcáreas y lodolitas, intercaladas con areniscas, conglomerados volcánicos, tobas, brechas volcánicas y calizas (Gastil et al., 1975).

Al este del cinturón volcanoclástico, se encuentra una franja de rocas originalmente sedimentarias, compuestas por areniscas, lutitas y algunas calizas, que han experimentado diversos grados de metamorfismo, transformándose en mármoles, pizarras, cuarcitas, esquistos y gneises. En algunas de estas rocas se han hallado fósiles del Jurásico (145-200 Ma) e incluso del Triásico (>200 Ma). Sin embargo, el alto grado de metamorfismo presente en la mayoría de estas rocas ha dificultado la preservación de fósiles, lo que complica la determinación de su edad y su relación estratigráfica con la Formación Alisitos (Gastil et al., 1975)



**Figura 3.** Geología superficial del área de estudio. Los colores del mapa indican los diferentes tipos de roca. Los cuadros en negro marcan los sitios MT correspondientes a los tres perfiles de datos procesados en el presente trabajo. Las líneas negras continuas representan fallas geológicas conocidas mientras que las líneas punteadas las fallas inferidas.

Las rocas prebatolíticas y batolíticas están localmente cubiertas por sedimentos del Cretácico Tardío (65-100 Ma) y rocas volcánicas del Paleógeno (25-65 Ma). Según Gastil et al. (1975), tras el emplazamiento del batolito, que culminó hace aproximadamente 90 Ma, la Cordillera Peninsular se elevó, enfrió y erosionó. Los sedimentos resultantes fueron transportados por ríos desde el este hacia la costa del Pacífico,

formando deltas tipo molasse en la plataforma continental. Para el Eoceno (35-55 Ma), las montañas mesozoicas se habían reducido a colinas aisladas, rodeadas de planicies aluviales que depositaron secuencias sedimentarias sobre algunas rocas batolíticas.

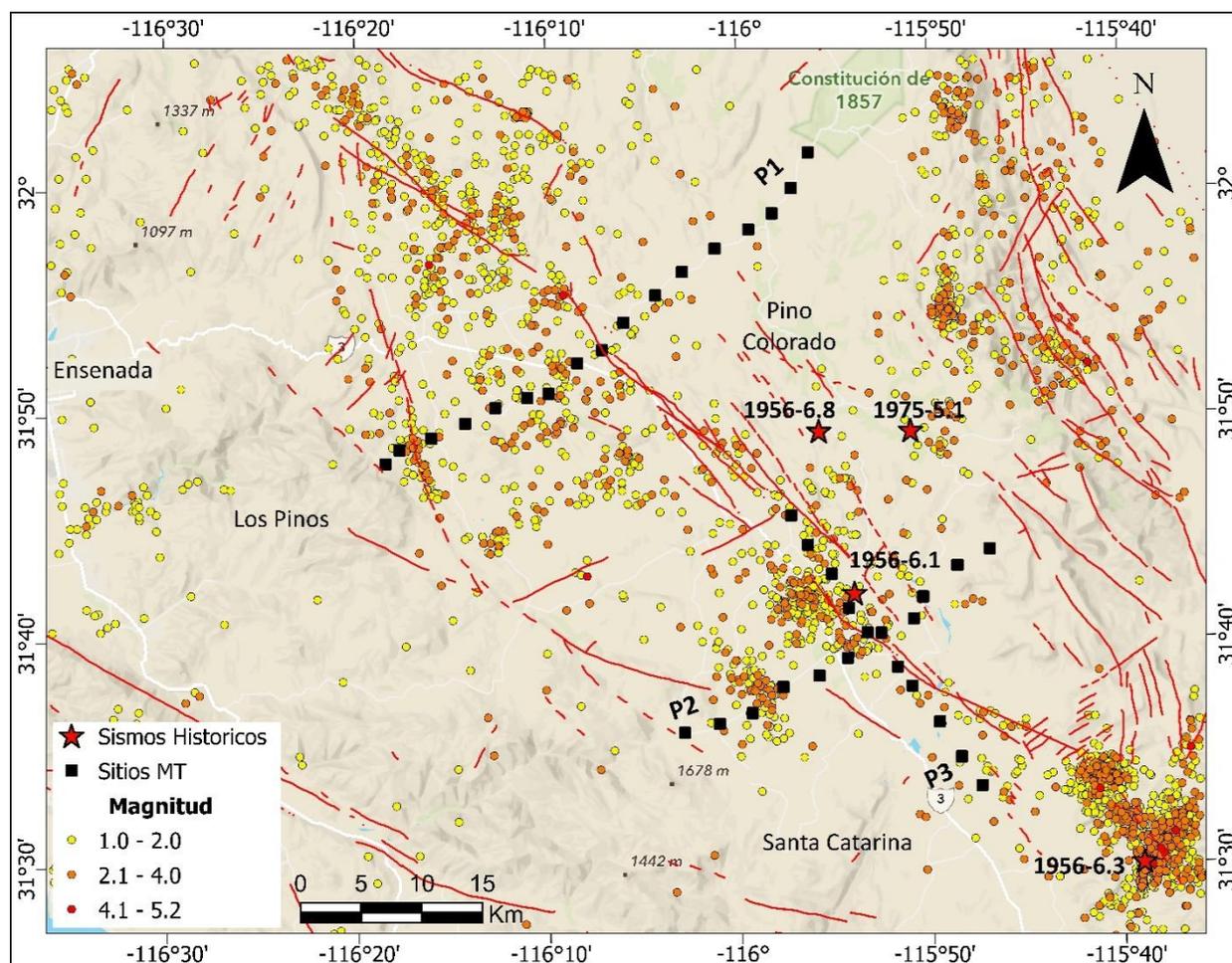
La Figura 3 muestra la geología de la zona de estudio, donde un conglomerado basal descansa sobre el basamento granítico de la Sierra de Juárez. Este conglomerado contiene clastos volcánicos y fragmentos derivados del mismo basamento. Su edad ha sido datada en  $53.8 \pm 1.5$  Ma mediante un análisis K-Ar de cristales de biotita en un clasto de andesita, asociándolo con un periodo de intensa erosión de la cordillera peninsular mesozoica (Gastil et al., 1975). Sobre este conglomerado, se presenta una secuencia de cuatro unidades volcánicas en orden ascendente: una brecha andesítica de lahar, un basalto discontinuo, una toba riolítica densa y localmente soldada que cubre mesetas, y otro basalto discontinuo. El basalto que sobreyace a la brecha de lahar tiene una edad de  $13.6 \pm 0.4$  Ma, mientras que la toba riolítica ha sido datada en  $10.0 \pm 0.5$  Ma. Toda la secuencia tiene un espesor aproximado de 300 m y se asocia con los productos del arco volcánico del Mioceno (Gastil et al., 1975).

## 2.2 Marco Sismo-Tectónico

La actividad sismo-tectónica en el norte de Baja California está asociada con tres grupos de fallas activas. El primer grupo incluye fallas transcurrentes como Cerro Prieto, Imperial, Cucapá, Laguna Salada y Brawley, localizadas en el Valle Mexicali-Imperial. El segundo grupo comprende fallas normales de bajo ángulo, relacionadas con el Escarpe Principal del Golfo, como las fallas de San Pedro Mártir, San Felipe y la zona de falla de Sierra Juárez. El tercer grupo abarca fallas que cruzan la península, como Agua Blanca y San Miguel-Vallecitos, con movimientos tanto horizontales como verticales (Stock et al., 1991) (ver Figura 2)

La Falla de San Miguel ha presentado en las últimas décadas una elevada microsismicidad, con sismos de magnitud moderada ( $4.0 < ML < 5.5$ ) y, esporádicamente, eventos de mayor magnitud ( $ML > 6.0$ ). En 1954, se registraron dos sismos con magnitudes de 6.0 y 6.3. Posteriormente, en 1956, una secuencia de cuatro sismos con magnitudes entre 6.1 y 6.8 provocó rupturas visibles en la superficie a lo largo de 20 km. Como resultado de estos eventos, la superficie experimentó desplazamientos de hasta 90 cm en sentido horizontal y entre 10 y 20 cm en sentido vertical, causando daños en ranchos y poblados cercanos a la traza de la falla (Shor & Roberts, 1958; Brune et al., 1979; Doser, 1992). La microsismicidad de la Falla de San Miguel ha sido objeto de estudio durante aproximadamente 30 años. Reyes et al. (1975) instalaron 22

estaciones portátiles y, entre diciembre de 1970 y diciembre de 1973, registraron más de 100 eventos diarios en el sector sur de la falla, con hipocentros a profundidades de entre 8 y 14 km. Johnson et al. (1976) ampliaron este análisis, identificando hipocentros entre 0 y 20 km a lo largo de 80 km de la traza de la falla, lo que sugiere que la ruptura causada por los sismos de 1956 representó solo una cuarta parte de la zona sísmicamente activa en la actualidad. Dado que el sistema San Miguel-Vallecitos tiene una longitud aproximada de 135 km, la ruptura de 20 km observada en 1956 constituye solo el 15% de su extensión total, lo que sugiere un mayor riesgo sísmico para toda la región.



**Figura 4.** Distribución de la sismicidad en el área de estudio, mostrando los sitios MT y los principales rasgos estructurales. Las líneas rojas representan fallas geológicas, mientras que las líneas punteadas corresponden a fallas inferidas. Los sismos históricos están señalados con estrellas rojas (Allen et al., 1965; Doser, 1992; González-Escobar, 1987) y los sitios MT se indican con cuadros negros.

Soares (1981) realizó un estudio de microsismicidad en el sector de la FSM ubicado en el Valle de Ojos Negros, donde reporta actividad sísmica a profundidades entre 1 y 19 km, los mecanismos focales de algunos de los eventos indican movimiento de rumbo lateral derecho y otros son de tipo normal, lo cual

concuenda con evidencias superficiales, tanto a lo largo del trazo de la falla como a lo largo de pequeñas fallas normales perpendiculares al trazo principal, las cuales podrían jugar un papel importante en la distribución del movimiento (Doser, 1992).

Frez et al. (2000) analizaron datos obtenidos durante un mes por una red de 13 estaciones digitales al norte de nuestra área de estudio. Encontraron que los hipocentros asociados con el sector norte de la Falla de San Miguel se distribuyen en una banda de 6 a 8 km de ancho a lo largo de la traza, con profundidades entre 13 y 18 km. Otro grupo de hipocentros se localiza en el Valle de Ojos Negros, con profundidades de 12 a 17 km, que aumentan hacia el noreste. Los mecanismos focales a lo largo de la falla son mayormente transcurrentes con una pequeña componente normal, mientras que en el valle y entre los segmentos norte y central son predominantemente normales. El análisis de los planos de falla indica un eje de compresión N – S y tensiones en dirección E – W.

Se comprende poco sobre cómo se distribuye el movimiento neto entre placas en las fallas activas de la región, especialmente a lo largo de los distintos segmentos de la Falla de San Miguel. Tampoco se conocen bien las conexiones entre el campo de esfuerzos de la Falla de San Miguel y las fallas vecinas, como Agua Blanca al sur, Vallecitos al norte, Tres Hermanos al oeste y Sierra de Juárez al este. Lo que sí es evidente es que los cambios en el campo de esfuerzos de una falla pueden provocar alteraciones en fallas cercanas, lo suficientemente significativas como para generar nuevos sismos (Stein, 2003).

En la Figura 4 se presenta la distribución de los sismos registrados en el área de estudio, destacando la alta actividad sísmica en la región. Se incluyen únicamente los eventos ocurridos entre 2010 y 2020. Además, se muestran sismos históricos significativos, como el de 1956 en el sector de falla de San Miguel y el de Pino Solo en 1975, lo que resalta la importancia tectónica de la zona.

## Capítulo 3. Fundamentos teóricos

---

En la exploración geofísica se tiene como objetivo principal obtener una imagen detallada de alguna propiedad física del subsuelo, para poder obtener esto se utilizan diversos métodos geofísicos. Dentro de estos se encuentran los métodos electromagnéticos, los cuales exploran cómo los campos electromagnéticos interactúan con los materiales del subsuelo y pueden proporcionar información sobre la conductividad eléctrica de las rocas.

En el caso particular de este trabajo se empleó el método magnetotelúrico que usa como fuente de excitación las perturbaciones electromagnéticas naturales que alcanzan la superficie de la Tierra, para determinar la distribución de conductividad eléctrica en el subsuelo. Una pequeña parte de la onda electromagnética incidente penetra verticalmente, difundiéndose en el medio y generando las corrientes telúricas.

En el método MT son de interés las variaciones que van de  $10^{-3}$  a  $10^2$  Hz. Según Vozoff (1991) las frecuencias por arriba de 1 Hz se originan por las tormentas eléctricas a escala mundial en puntos distantes al lugar de estudio. A frecuencias inferiores a 1 Hz, la mayor parte de la señal se debe a sistemas de corrientes en la magnetosfera creados por la actividad solar.

### 3.1 Método Magnetotelúrico

El método magnetotelúrico (MT) es una técnica de exploración geofísica que utiliza las fluctuaciones naturales del campo magnético terrestre como fuente de poder para obtener información sobre las propiedades eléctricas del subsuelo. Este método, cuyos fundamentos se remontan a la década de 1950, se basa en los trabajos pioneros de Tikhonov, quien propuso la medición simultánea de las variaciones de los campos eléctrico y magnético como una forma de explorar el subsuelo.

Posteriormente, esta idea se aplicó con éxito para detectar las características eléctricas en capas profundas del terreno. Cagniard (1953) consolidó las bases del método magnetotelúrico para la prospección geofísica y desarrolló fórmulas para calcular las curvas de resistividad aparente vs. período y fase vs. período. Inicialmente, este método se concibió para interpretarse mediante un modelo de capas horizontales. Actualmente, estas curvas de resistividad aparente y fase se pueden interpretar simulando distribuciones

de resistividad del subsuelo en 2D y en 3D. La interpretación del MT se basa en la evaluación de la razón entre el campo eléctrico y el campo magnético sobre la superficie de la Tierra, conocida como impedancia de superficie, la cual está relacionada directamente con la resistividad del subsuelo (Cagniard, 1953).

Según Vozoff (1972) en los casos en que el medio es homogéneo e isotrópico o presenta estratificación horizontal, la impedancia es un escalar. Sin embargo, en el caso más general, cuando existen heterogeneidades laterales y/o anisotropía, la relación entre los campos adquiere un carácter tensorial.

El punto de partida para comprender el comportamiento de los campos eléctricos y magnéticos en la Tierra son las ecuaciones de Maxwell, que describen los fenómenos electromagnéticos en la naturaleza. Estas ecuaciones generalizan las observaciones experimentales realizadas por Coulomb, Faraday, Gauss y Ampere.

### 3.2 Ecuaciones de Maxwell

Se presenta una descripción general de los aspectos básicos del método MT, descrito en varios artículos y libros de texto (Vozoff, 1991; Simpson & Bahr, 2005, Chave & Jones, 2012). Se supone un medio lineal, isotrópico y homogéneo, tomando en consideración que para un medio no lineal o anisotrópico la teoría es más complicada. Un campo electromagnético se puede describir con cuatro vectores:

- **E** = Intensidad del campo eléctrico ( $V/m$ ).
- **H** = Intensidad del campo magnético ( $A/m$ ).
- **B** = Densidad de flujo magnético ( $Wb/m^2$  o Tesla).
- **D** = Desplazamiento eléctrico ( $C/m^2$ ).

Las cuatro ecuaciones de Maxwell relacionan estos vectores con sus fuentes, una distribución de densidad eléctrica  $n_f$  ( $C/m^3$ ) y una densidad de corriente eléctrica  $j$  ( $A/m^2$ ) de la siguiente forma:

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

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

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

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = n_f \quad (4)$$

La ecuación (1) corresponde a la ley de Faraday la cual nos expresa que variaciones temporales del campo magnético inducen un campo eléctrico. El primer término de la ecuación (2) hace referencia a la ley de Ampere la cual establece que una corriente eléctrica en un conductor provoca un campo magnético. El segundo término de la ecuación (2) fue aportado por Maxwell y significa que también una variación del campo de desplazamiento eléctrico puede generar un campo magnético a su alrededor. La ecuación (3) corresponde a la ley de Gauss para un campo magnético, la cual dice que no existen los monopolos magnéticos.

Finalmente la ecuación (4) indica la ley de Gauss para un campo eléctrico, expresa que el desplazamiento eléctrico que atraviesa una superficie cerrada es proporcional a la densidad de carga eléctrica contenida dentro de dicha superficie.

Además de las cuatro leyes de Maxwell los campos electromagnéticos se relacionan entre sí mediante algunas propiedades físicas, las cuales establecen una relación del comportamiento del campo electromagnético de acuerdo al medio en el que se propagan, estas expresiones se conocen como relaciones constitutivas:

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \quad (5)$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H} \quad (6)$$

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (7)$$

donde  $\varepsilon$  es la permitividad eléctrica ( $F/m$ ), indica la facilidad de un material a polarizarse al someterse a un campo eléctrico externo;  $\mu$  corresponde a la permeabilidad magnética ( $H/m$ ), es la resistencia de un material para dejar pasar a través de él un campo magnético; y  $\sigma$  es la conductividad eléctrica ( $S/m$ ) que es la capacidad de un material para conducir corriente eléctrica. Ésta última es la generalización de la ley de Ohm.

### 3.3 Ecuación de onda

Para deducir la ecuación de onda se aplica el rotacional a la ecuación (1):

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) + \frac{\partial}{\partial t} (\nabla \times \mathbf{B}) = 0 \quad (8)$$

Sustituyendo la ecuación (2):

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) + \mu \frac{\partial}{\partial t} \left( \mathbf{J} + \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} \right) = 0 \quad (9)$$

Sustituyendo ahora la ecuación (7) y arreglando términos nos queda:

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{E}) + \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} + \mu \sigma \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = 0 \quad (30)$$

Empleando la identidad vectorial  $\nabla \times (\nabla \times \mathbf{A}) = \nabla(\nabla \cdot \mathbf{A}) - \nabla^2 \mathbf{A}$ , y considerando un medio sin cargas libres, es decir  $\nabla \cdot \mathbf{E} = 0$ , la ecuación anterior puede escribirse como:

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} - \mu \sigma \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} = 0 \quad (41)$$

Utilizando un procedimiento similar al anterior, puede demostrarse que el campo magnético  $\mathbf{H}$  también cumple con una ecuación similar:

$$\nabla^2 \mathbf{H} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \mathbf{H}}{\partial t^2} - \mu\sigma \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} = 0 \quad (52)$$

Conocida como la ecuación de onda con dispersión, en la que el tercer término corresponde a la disipación de energía en medios conductores  $\sigma \neq 0$ .

### 3.3.1 Campos armónicos

Los campos vectoriales presentes en las ecuaciones de Maxwell, como  $\mathbf{E}(t)$  y  $\mathbf{H}(t)$ , varían en el tiempo. Sin perder generalidad, estos campos pueden descomponerse en una suma de ondas sinusoidales, cada una con distintas frecuencias, amplitudes y fases (componentes armónicas). Cada componente armónica puede escribirse como  $|\mathbf{E}|e^{i\omega t}$ ,  $|\mathbf{H}|e^{i\omega t}$ , por lo tanto las leyes de Faraday y de Ampere quedan como:

$$\nabla \times \mathbf{E} = -i\omega\mu\mathbf{H} \quad (13)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = (\sigma + i\omega)\mathbf{E} \quad (14)$$

Las ecuaciones de onda equivalentes a las ecuaciones (11) y (12) en el dominio de la frecuencia serán:

$$\nabla^2 \mathbf{E} + (\mu\epsilon\omega^2 - i\mu\sigma\omega)\mathbf{E} = 0 \quad (15)$$

$$\nabla^2 \mathbf{H} + (\mu\epsilon\omega^2 - i\mu\sigma\omega)\mathbf{H} = 0 \quad (16)$$

O bien pueden reducirse de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} \nabla^2 \mathbf{E} + \kappa^2 \mathbf{E} &= 0 \\ \nabla^2 \mathbf{H} + \kappa^2 \mathbf{H} &= 0 \end{aligned} \quad (17)$$

donde  $\kappa = \sqrt{\mu\epsilon\omega^2 - i\mu\sigma\omega}$ , que es la constante de propagación y  $\omega$  representa la frecuencia angular dada en *rad/s*. Las ecuaciones (17) se conocen como las ecuaciones de Helmholtz.

### 3.4 Aproximación Cuasiestática

Tomando en cuenta que a frecuencias menores de 100 *kHz*, como las utilizadas en el método MT, y considerando el rango de valores típicos de  $\sigma$ ,  $\varepsilon$  y  $\mu$  en las rocas de la corteza de la tierra, tenemos que:

$$\mu\varepsilon\omega^2 \ll \mu\sigma\omega \quad (18)$$

Conocida como la aproximación cuasiestática, la cual nos dice que las corrientes de desplazamiento son mucho menores que las corrientes de conducción. Empleando esta aproximación las ecuaciones (17) se convierten en las ecuaciones de difusión:

$$\begin{aligned} \nabla^2 \mathbf{E} - \mu\sigma \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} &= 0 \\ \nabla^2 \mathbf{H} - \mu\sigma \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t} &= 0 \end{aligned} \quad (19)$$

En el dominio de la frecuencia:

$$\begin{aligned} \nabla^2 \mathbf{E} - i\mu\sigma\omega \mathbf{E} &= 0 \\ \nabla^2 \mathbf{H} - i\mu\sigma\omega \mathbf{H} &= 0 \end{aligned} \quad (20)$$

Dado el rango de frecuencias utilizados en el MT (frecuencias bajas), la propagación de los campos electromagnéticos en el subsuelo están gobernadas por estas ecuaciones de difusión. Cabe mencionar que esta es una característica de la mayoría de los métodos electromagnéticos, con excepción del georadar, en donde se usan frecuencias mayores a  $10^5 \text{ Hz}$ .

Ward & Hohman (1988) mencionan que una de las soluciones más simples de las ecuaciones (20) es en términos de ondas planas. Si se considera, por simplicidad, solamente ondas viajando en la dirección *z*, podemos escribir las expresiones para los campos como:

$$\begin{aligned} \mathbf{E} &= |\mathbf{E}| e^{i(\kappa z - \omega t)} \\ \mathbf{H} &= |\mathbf{H}| e^{i(\kappa z - \omega t)} \end{aligned} \quad (21)$$

En el método MT se puede utilizar esta solución siempre y cuando la fuente de los campos electromagnéticos se encuentre lo suficientemente lejos del sitio de observación de tal manera que las ondas arriben como un frente de ondas planas. Tomando en cuenta la aproximación cuasiestática la constante de propagación queda:

$$\kappa = \sqrt{i\mu\sigma\omega} \quad (22)$$

y utilizando el hecho de que  $\sqrt{i} = \frac{1}{\sqrt{2}}(1 + i)$ , se puede escribir como:

$$\kappa = \sqrt{\frac{\mu\sigma\omega}{2}}(1 + i) = \alpha + i\beta \quad (23)$$

### 3.5 Skin Depth

Para un semiespacio homogéneo la profundidad a la cual la amplitud de un campo se reduce con un factor de  $1/e$ , es decir, 37% de su amplitud original se conoce como penetración nominal o skin depth ( $\delta$ ):

$$\delta = \frac{1}{\beta} = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\sigma}} \quad (24)$$

Considerando  $\mu = \mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$  y  $\omega = 2\pi f$ , nos queda:

$$\delta = 503 \sqrt{\frac{1}{f\sigma}} = 503\sqrt{\rho T} \text{ (m)} \quad (25)$$

donde  $\rho$  es la resistividad del medio en  $\Omega \cdot m$  y  $T$  es el período de la onda.

La penetración del campo dependerá del período y de la conductividad de las estructuras en la Tierra, siendo que a una mayor frecuencia la profundidad es menor y a menor frecuencia hay una mayor profundidad de penetración (Vozoff, 1972).

### 3.6 Tensor de Impedancias

Durante el registro de datos MT, se miden los campos eléctricos y magnéticos horizontales en el dominio del tiempo, y posteriormente, para su procesamiento, se transforma al dominio de la frecuencia. Generalmente, el eje  $x$  se orienta hacia el norte y el eje  $y$  hacia el este. Los datos MT se representan como un tensor de impedancias en lugar de una impedancia escalar, ya que la impedancia depende de la polarización de los campos. La impedancia  $Z_{xy}$  queda definida como la razón entre el campo eléctrico en la dirección  $x$  ( $E_x$ ), y el campo magnético en la dirección  $y$  ( $H_y$ ), además depende de la frecuencia y sus elementos son complejos.

$$Z_{xy}(\omega) = \frac{E_x(\omega)}{H_y(\omega)} \quad (26)$$

En general, el subsuelo no es homogéneo y su resistividad varía en todas las direcciones. En este contexto, la relación entre las componentes horizontales de los campos eléctrico y magnético medidos en la superficie terrestre adquiere un carácter tensorial (Vozoff, 1991). Escrito en su forma matricial, el tensor de impedancias  $\mathbf{Z}$  se representa como:

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} Z_{xx} & Z_{xy} \\ Z_{yx} & Z_{yy} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix} \quad (27)$$

El tensor de impedancia contiene la información sobre la distribución de corrientes eléctricas inducidas en el subsuelo. Es una representación de la respuesta en la superficie de la Tierra ante la difusión del campo electromagnético en su interior.

#### 3.6.1 Resistividad aparente

A partir de la estimación de la impedancia, se pueden derivar tanto la resistividad aparente como la fase. La resistividad aparente  $\rho_a$  puede considerarse como la resistividad promedio ponderada de la Tierra sobre un volumen muestreado por la señal electromagnética a una frecuencia específica. Para cada elemento del tensor, existe una  $\rho_a$ , la cual se define mediante la siguiente ecuación:

$$\rho_{a,i,j}(\omega) = \frac{1}{\omega\mu_o} |Z_{ij}(\omega)|^2 \quad (28)$$

Dado que la impedancia  $Z_{ij}$  es una cantidad compleja, también es necesario determinar su fase, esta se define como la diferencia de fase entre los campos eléctrico y magnético utilizados para calcular el tensor de impedancia y está descrita por la siguiente ecuación:

$$\phi_{i,j} = \tan^{-1} \left( \frac{\text{Im}(Z_{ij})}{\text{Re}(Z_{ij})} \right) \quad (29)$$

### 3.6.2 Dimensionalidad Geoeléctrica

En teoría pueden obtenerse cuatro curvas de resistividad y fase dado que tenemos cuatro elementos del tensor de impedancia. Sin embargo, la complejidad del tensor de impedancias depende de la distribución espacial de las estructuras geoeléctricas del subsuelo, que pueden ser 1D, 2D y 3D, ejemplificados, estructuralmente en la Figura 5.

#### 3.6.2.1 Medio Unidimensional (1D)

En el caso unidimensional (1D), es decir, un medio en el que la resistividad varía solo con la profundidad, las componentes diagonales del tensor de impedancia son iguales a cero, esto se debe a que el campo magnético en una dirección induce corrientes que fluyen únicamente en la dirección perpendicular. Además las componentes antidiagonales son iguales pero con signos opuestos, al no haber variaciones laterales de resistividad, por lo que el tensor de impedancias para el caso 1D queda como:

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & Z_{xy} \\ -Z_{yx} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix} \quad (30)$$

#### 3.6.2.2 Medio Bidimensional (2D)

En un modelo bidimensional (2D) de la Tierra, la resistividad varía con la profundidad y en una dirección horizontal. Si la resistividad varía a lo largo del eje  $y$ , la dirección  $x$  se define como el “rumbo geoeléctrico”.

En el caso 2D, las ecuaciones de Maxwell pueden desacoplarse en dos grupos de componentes de campo, cada uno definido por la polarización del campo en la dirección del rumbo geoelectrico.

Si el sistema de coordenadas de referencia se encuentra alineado con el rumbo geoelectrico de las estructuras, la diagonal del tensor es cero y los elementos fuera de la diagonal son distintos de cero y diferentes entre sí ( $Z_{xy} \neq Z_{yx}$ ).

$$\begin{pmatrix} E_x \\ E_y \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 & Z_{TE} \\ Z_{TM} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} H_x \\ H_y \end{pmatrix} \quad (31)$$

El modo de polarización TE (Transversal Eléctrico), describe corrientes que fluyen a lo largo de la estructura (Figura 6), es decir, que el campo eléctrico es paralelo a la estructura, entonces  $E_x$  se relaciona solo con  $H_y$  y  $H_z$ .

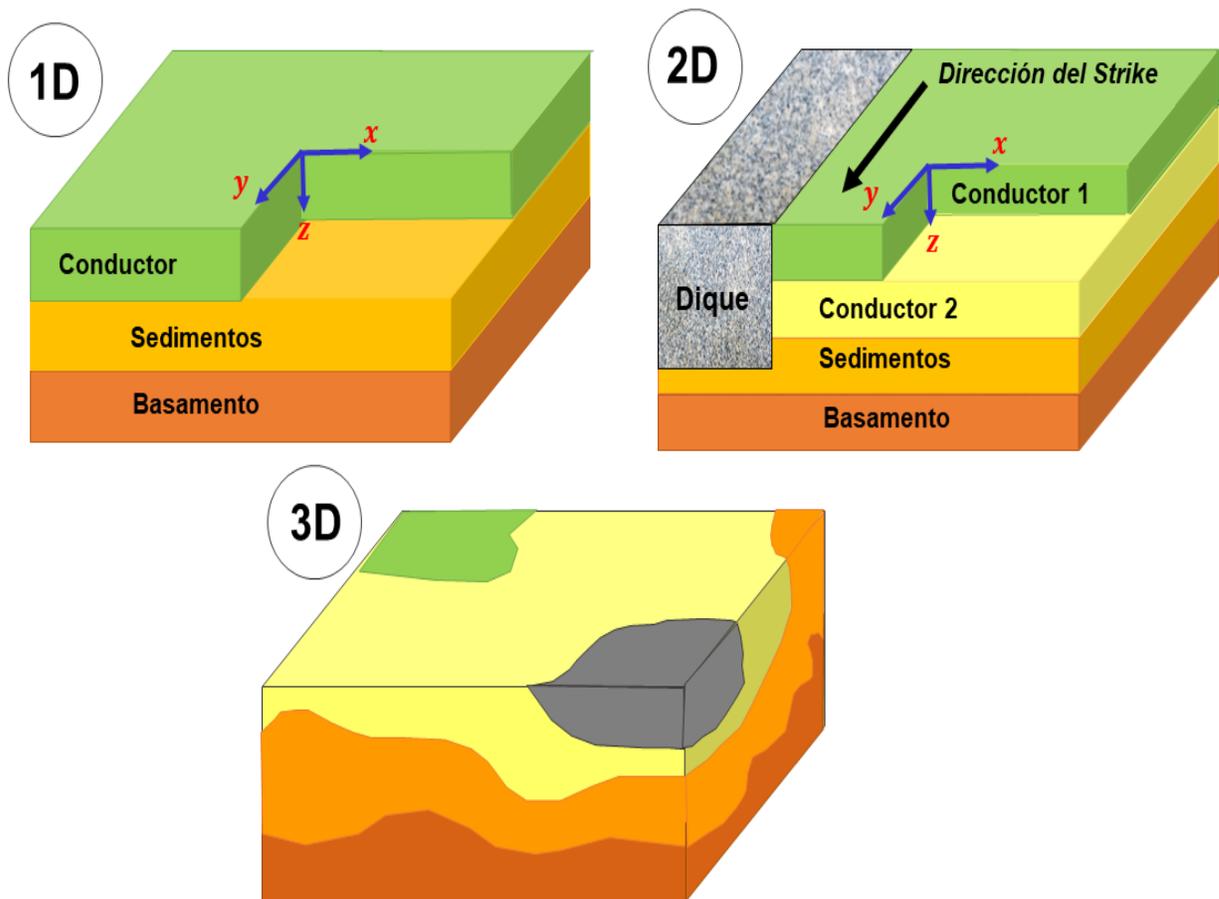
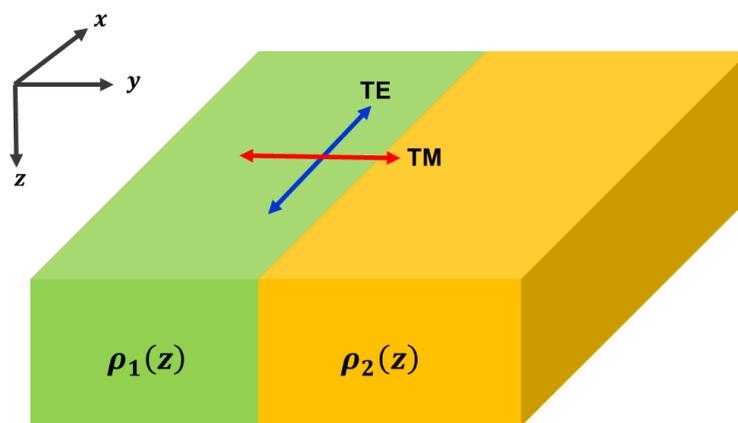


Figura 5. Dimensionalidad de medios 1D, 2D y 3D.



**Figura 6.** Medio 2D donde la dirección de la estructura está orientada respecto al eje  $x$ . En el modo TE el campo eléctrico está a lo largo de la estructura, mientras en el modo TM el campo eléctrico cruza la interfaz.

En el caso del modo de polarización TM (Transversal Magnético), es ahora el campo magnético el que se encuentra paralelo a la dirección de la estructura, donde  $H_x$  se relaciona solo con  $E_y$  y  $E_z$ . El modo TM describe corrientes que fluyen a través de las interfaces (Figura 6). Cuando los ejes de medición no están alineados al rumbo de la estructura los cuatro elementos del tensor son distintos de cero, sin embargo una rotación de coordenadas reduce el tensor a una forma antidiagonal.

### 3.6.2.3 Medio Tridimensional (3D)

En el caso de un medio tridimensional o 3D, la conductividad varía en todas las direcciones. Todas las componentes del tensor de impedancia son diferentes entre sí, y no nulas. Por lo tanto, no existe un ángulo según el cual las componentes de la diagonal del tensor de impedancias se aproximen a cero. Debido a que no es posible reducir el tensor a una forma antidiagonal con una simple rotación de coordenadas, en un medio tridimensional es necesario determinar todas las componentes del tensor de impedancia  $(Z_{xx}, Z_{xy}, Z_{yx}, Z_{yy})$  para cada una de las frecuencias. Para un medio 3D el tensor de impedancias se define con la ecuación (27).

## 3.7 Invariantes $\rho_{\pm}$

Los datos MT que se registran en el campo están influenciados por la distribución tridimensional de la resistividad en el área de estudio. Sin embargo, frecuentemente es necesario usar modelos 2D para su

interpretación. Esto plantea el problema de cómo interpretar datos 3D con modelos 2D, es decir, como “reducir” la influencia 3D en los datos y transformarlos en datos con influencia mayormente 2D. La forma más tradicional de hacerlo es encontrando un ángulo de rotación que reduzca el tensor de impedancia (ecuación 27) a una forma antidiagonal (ecuación 31), es decir, a un tensor 2D. Sin embargo, esto lleva a otros problemas porque este ángulo no siempre existe o no es único ni tampoco el mismo para todos los sitios observados.

Una manera diferente es buscar funciones de las componentes del tensor que sean independientes del ángulo de rotación, como el determinante o la traza. Gómez-Treviño et al. (2014) encuentra dos funciones invariantes ante rotación  $\rho_+$  y  $\rho_-$  que se expresan en términos de las resistividades  $\rho_s$  y  $\rho_p$  propuestas por Romo et al. (2005) como:

$$\rho_{\pm} = \rho_s \pm \sqrt{\rho_s^2 - \rho_s \rho_p} \quad (32)$$

donde  $\rho_s$  y  $\rho_p$  están dadas por

$$\rho_s = \frac{1}{\omega\mu} \left( \frac{Z_{xx}^2 + Z_{xy}^2 + Z_{yx}^2 + Z_{yy}^2}{2} \right)^{1/2} \quad (33)$$

$$\frac{1}{\rho_p} = \frac{\omega\mu}{\sqrt{2}} \frac{(Z_{xx}^2 + Z_{xy}^2 + Z_{yx}^2 + Z_{yy}^2)^{1/2}}{(Z_{xy}Z_{yx} - Z_{xx}Z_{yy})} \quad (34)$$

Es importante mencionar que a la ecuación 32 se le anexa el término  $\varepsilon^2$  (ecuación 35), el cual se relaciona con cierta distorsión del campo eléctrico (Groom & Bailey, 1989), lo que implica que las resistividades  $\rho_+$  y  $\rho_-$  son inmunes a ciertas distorsiones, pero no a todas, como la distorsión por cizallamiento.

$$\rho_{\pm} = \rho_s \pm \sqrt{\rho_s^2 - \rho_s \rho_p \varepsilon^2} \quad (35)$$

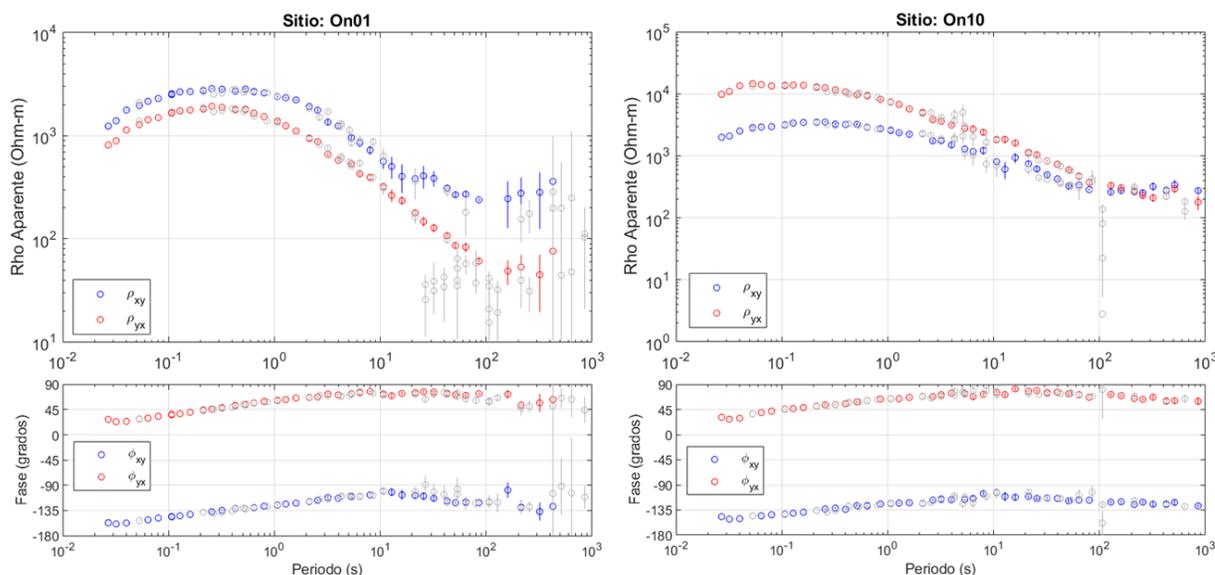
Las resistividades  $\rho_+$  y  $\rho_-$  son invariantes ante rotación. Gómez-Treviño et al. (2014) encuentran que, en el caso ideal 2D, las resistividades  $\rho_+$  y  $\rho_-$  se reducen a  $\rho_{TE}$  y  $\rho_{TM}$ , que son las resistividades correspondientes a los modos TE (Trasversal Eléctrico) y TM (Trasversal Magnético), excepto por una

ambigüedad de  $90^\circ$  inherente a la identificación de los modos TE y TM, es decir que  $\rho_+$  puede reducirse a  $\rho_{TE}$  y  $\rho_-$  a  $\rho_{TM}$ , o viceversa. En este trabajo usaremos  $\rho_{\pm}$  para obtener el modelo de inversión en 2D. Mientras que para la inversión 3D utilizamos las resistividades provenientes de las cuatro componentes del tensor.

## Capítulo 4. Metodología

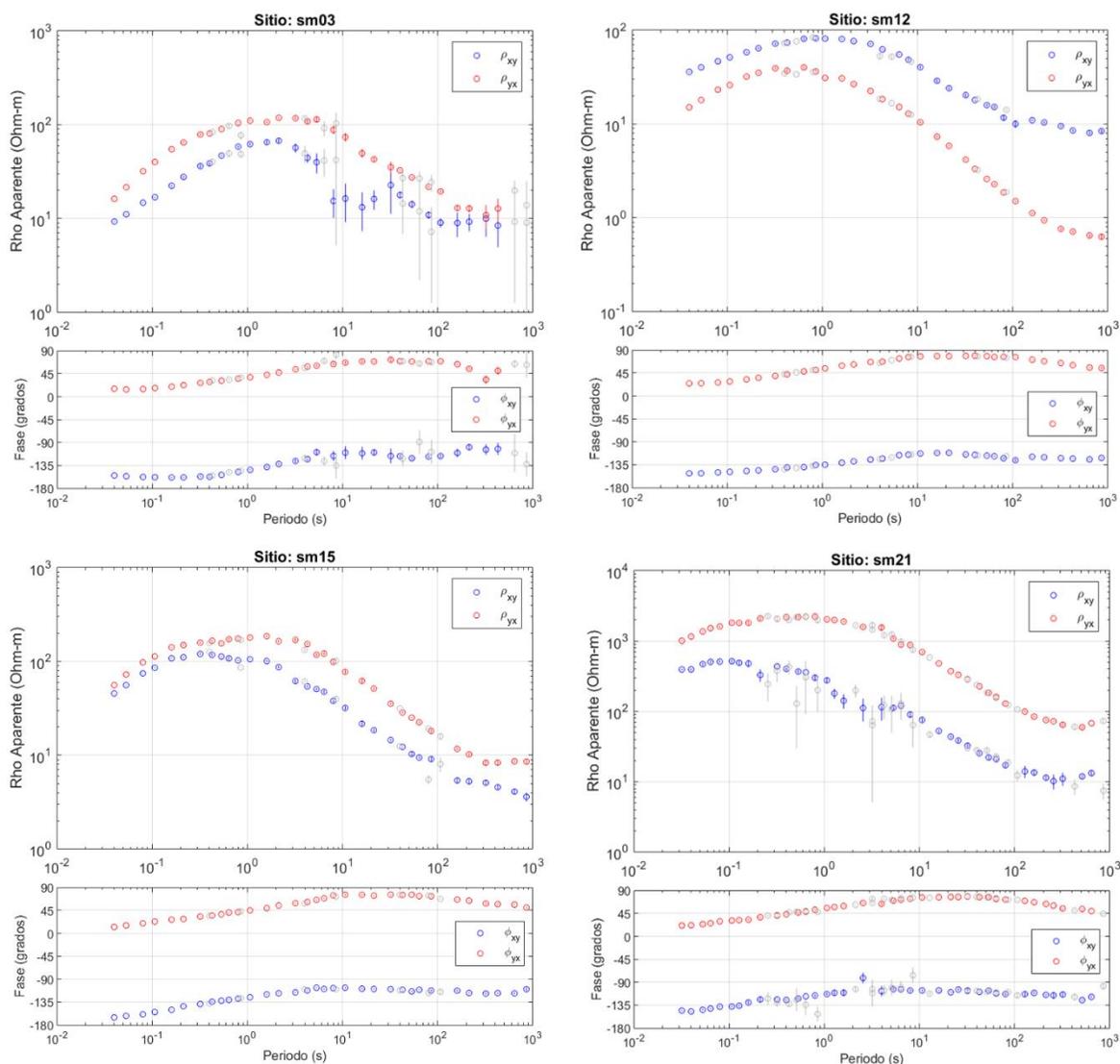
### 4.1 Datos observados

En este trabajo de tesis se utilizaron dos conjuntos de datos magnetoteléricos (MT), que incluyen 21 sitios registrados por Oliver (2004) y 17 sitios reportados por Antonio-Carpio et al. (2011). Estos datos están distribuidos en tres perfiles dentro de la zona de estudio (Figura 1). Antes de llevar a cabo las inversiones 2D y 3D, se realizó un proceso de depuración de los datos, eliminando aquellos que presentaban valores atípicos en ciertos periodos, ya que su inclusión podría generar ruido y afectar la calidad de los resultados en las inversiones.



**Figura 7.** Curvas depuradas de resistividad aparente y fase para los sitios On01 y On10 del perfil 1. Los círculos representan los datos de cada sondeo; la componente  $Z_{xy}$  se muestra en azul, la componente  $Z_{yx}$  en rojo, y los datos eliminados aparecen en gris. Las barras de error se representan con líneas continuas verticales.

En la Figura 7 se presentan los datos depurados de dos sitios MT correspondientes al perfil 1 (Ojos Negros), mientras que en la Figura 8 se muestran los datos de cuatro sitios de los perfiles 2 y 3 (San Miguel). En ambas figuras, los datos eliminados durante el proceso de depuración se muestran en color gris. Esta limpieza de datos fue importante para garantizar que las inversiones se realizaran con datos de buena calidad, lo que a su vez maximiza la precisión en la interpretación de las estructuras subterráneas detectadas en la región de estudio.



**Figura 8.** Curvas depuradas de resistividad aparente y fase para los sitios sm03 y sm12 del perfil 2, y los sitios sm15 y sm21 del perfil 3. Los círculos representan los datos de cada sondeo; la componente  $Z_{xy}$  se muestra en azul, la componente  $Z_{yx}$  en rojo, y los datos eliminados aparecen en gris. Las barras de error se representan con líneas continuas verticales.

## 4.2 Inversión 2D

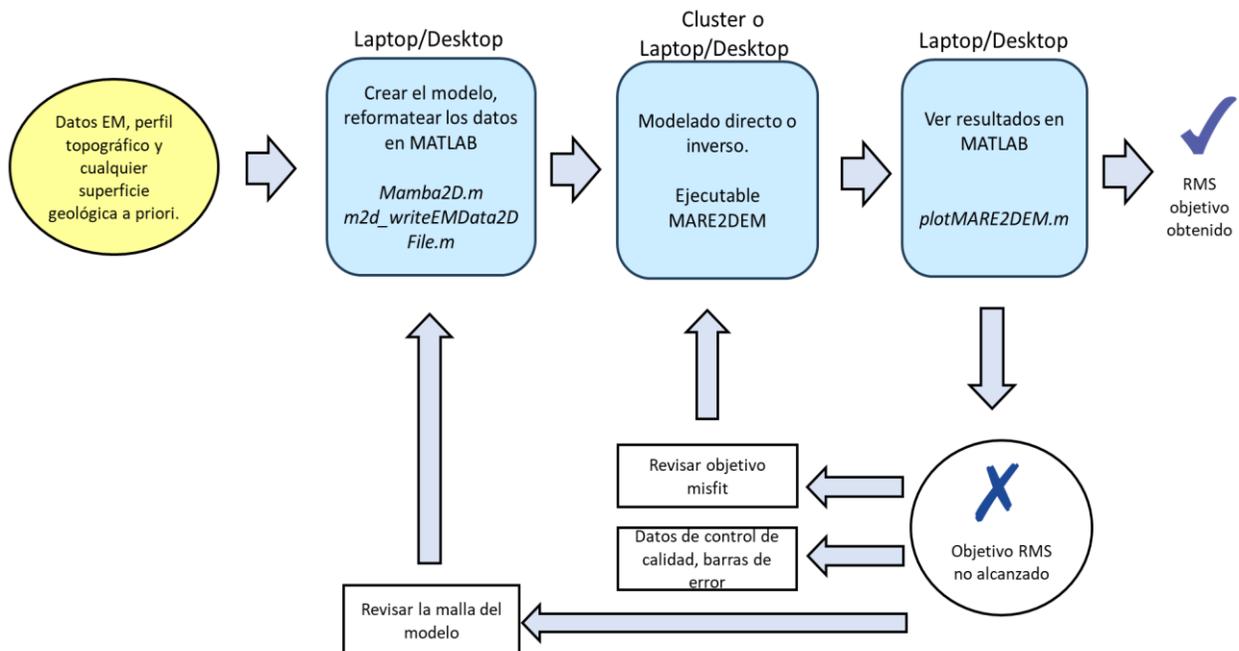
La modelación 2D de los perfiles de datos Magnetotelúricos (MT), se realizó mediante el código MARE2DEM, el cual fue desarrollado por Key & Ovall (2011). Este programa utiliza un esquema de elemento finito para dar solución numérica a las ecuaciones de Maxwell.

Para la inversión de datos, el programa utiliza una variación del método de Occam descrito por Constable et al. (1987), este es una variante de la minimización no lineal de Gauss-Newton. El algoritmo nuevo se

llama Fast Occam, Key (2016) menciona que este algoritmo prueba una menor cantidad de valores del factor de regularización  $\mu$  y se queda con el valor que reduzca el RMS en algún porcentaje establecido por el usuario, haciendo así que se disminuya significativamente el tiempo de cómputo.

El código MARE2DEM utiliza el método de elemento finito para calcular la respuesta de cada modelo y cuenta con una interfaz de usuario en Matlab que permite crear fácilmente la malla para la inversión compuesta de celdas triangulares o cuadriláteros (Key, 2016). Además, se puede incluir un archivo con el perfil topográfico o batimétrico de la zona de estudio. De forma general, el procesamiento en MARE2DEM funciona de la siguiente forma:

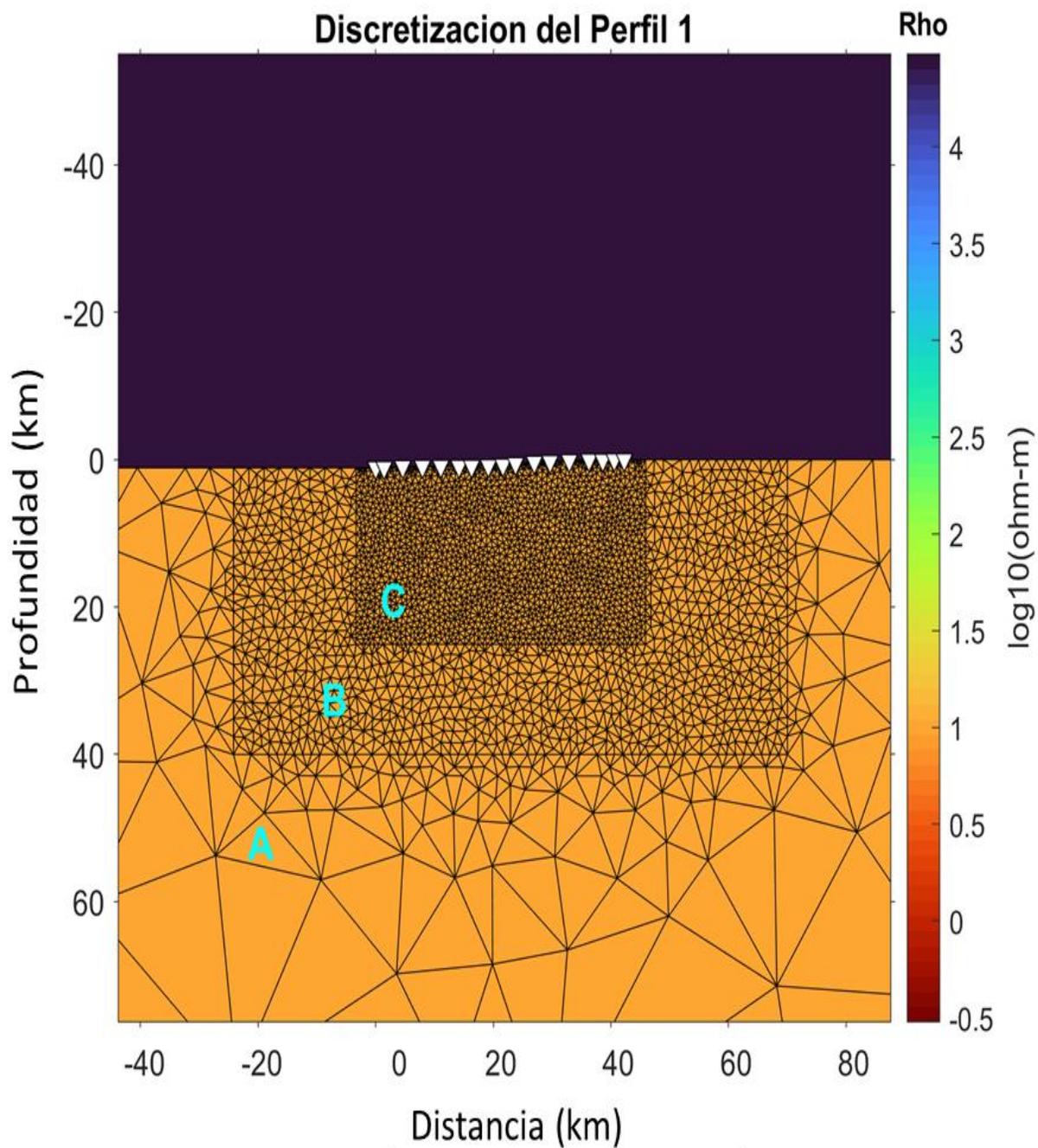
- Preparación de archivos de datos y construcción de la malla para el modelo inicial, usando una interfaz de MATLAB.
- Ejecución del programa MARE2DEM (implementado en MPI-Fortran y C) ya sea en una computadora personal o en un clúster.
- Visualización de los resultados: modelos y ajustes a curvas observadas, usando una interfaz de MATLAB.



**Figura 9.** Flujo típico de trabajo del código MARE2DEM. Modificada de Key (2016).

### 4.2.1 Perfil 1

La inversión del perfil 1 se realizó considerando un medio bidimensional discretizado en 3 regiones: A, B y C (Figura 10).



**Figura 10.** Discretización del perfil 1 (Ojos Negros). En la región C los datos tendrán mayor influencia, por tal motivo los triángulos son más pequeños. Por otra parte en la región B el tamaño de los triángulos aumenta y en la región A aumenta el tamaño de los triángulos hacia los extremos.

La región A abarca un área de 2000 por 2000 km, lo cual es necesario para cumplir con las condiciones de frontera, que establecen que los campos deben ser cero en las fronteras. Por esta razón, la región A se extiende hasta una distancia donde los campos cumplen esta condición (Streich, 2009).

La región A se dividió en dos capas: aire y subsuelo. Se asignó una resistividad de  $1e+12 \Omega \cdot m$  para la capa de aire, la cual se extiende de los -1000 km a los 0 km, tomando como referencia el sitio con mayor elevación para establecer el punto cero. Para el subsuelo, se empleó un valor de  $100 \Omega \cdot m$ , determinado a partir de las curvas de resistividad características de cada sitio a lo largo del perfil.

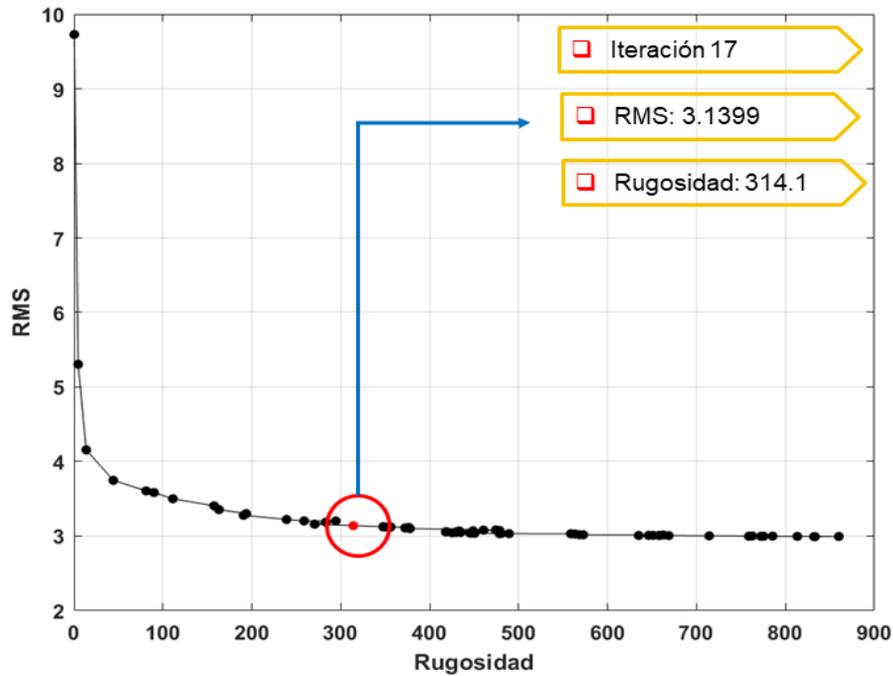
Dentro de la capa del subsuelo se definió una región B, que abarca una profundidad de 40 km iniciando en la interfaz aire-tierra y se extiende lateralmente 85 km (Figura 10). La zona de mayor interés, la región C, fue discretizada con mayor detalle, empleando triángulos de aproximadamente 1000 m de longitud para mejorar la resolución en esta área, mientras que en la región A los triángulos aumentan de tamaño hacia los extremos. Esta configuración asegura un modelo más preciso en la zona de interés, manteniendo la estabilidad en los límites del modelo.

Es importante mencionar que se asignó un error del 10 % a los datos de resistividad aparente y 2.86 grados a los de fase. Adicionalmente, se incorporó la topografía promedio del perfil, considerando las elevaciones de cada sitio. Para este fin, se realizó una interpolación que permitió generar un archivo con datos topográficos más segmentados y detallados, lo que mejoró la precisión del modelo.

La integración de la topografía permitió obtener un modelo más realista, logrando una correlación más precisa entre las elevaciones del terreno y las propiedades eléctricas del subsuelo. Esto contribuyó significativamente a una interpretación más precisa de las estructuras geológicas presentes en el perfil 1.

Para el subsuelo, se aplicó una discretización triangular de elemento finito ajustado a la topografía, generando una malla compuesta por aproximadamente 6,000 a 9,000 triángulos. Se extendieron los límites del modelo para evitar efectos de borde durante el proceso de inversión.

La visualización de los resultados se realizó en MATLAB, utilizando la función plotMARE2DEM, la cual facilita la visualización de las respuestas de los modelos, la generación de seudosecciones, y ofrece otras herramientas útiles para el análisis e interpretación de los datos. El modelo seleccionado para el perfil 1 correspondió a la iteración 17, ya que presentó un equilibrio óptimo entre el ajuste de los datos y la suavidad del modelo (Figura 11).



**Figura 11.** Curva L del perfil 1 (Ojos Negros), obtenida de los diferentes valores de rugosidad frente a los valores de RMS de los modelos de inversión 2D.

Este equilibrio se evaluó mediante la curva L, donde se analiza la relación entre el error RMS (Root Mean Square) y la rugosidad del modelo, determinando el punto óptimo en el vértice de dicha curva. El parámetro RMS se calcula con la siguiente ecuación:

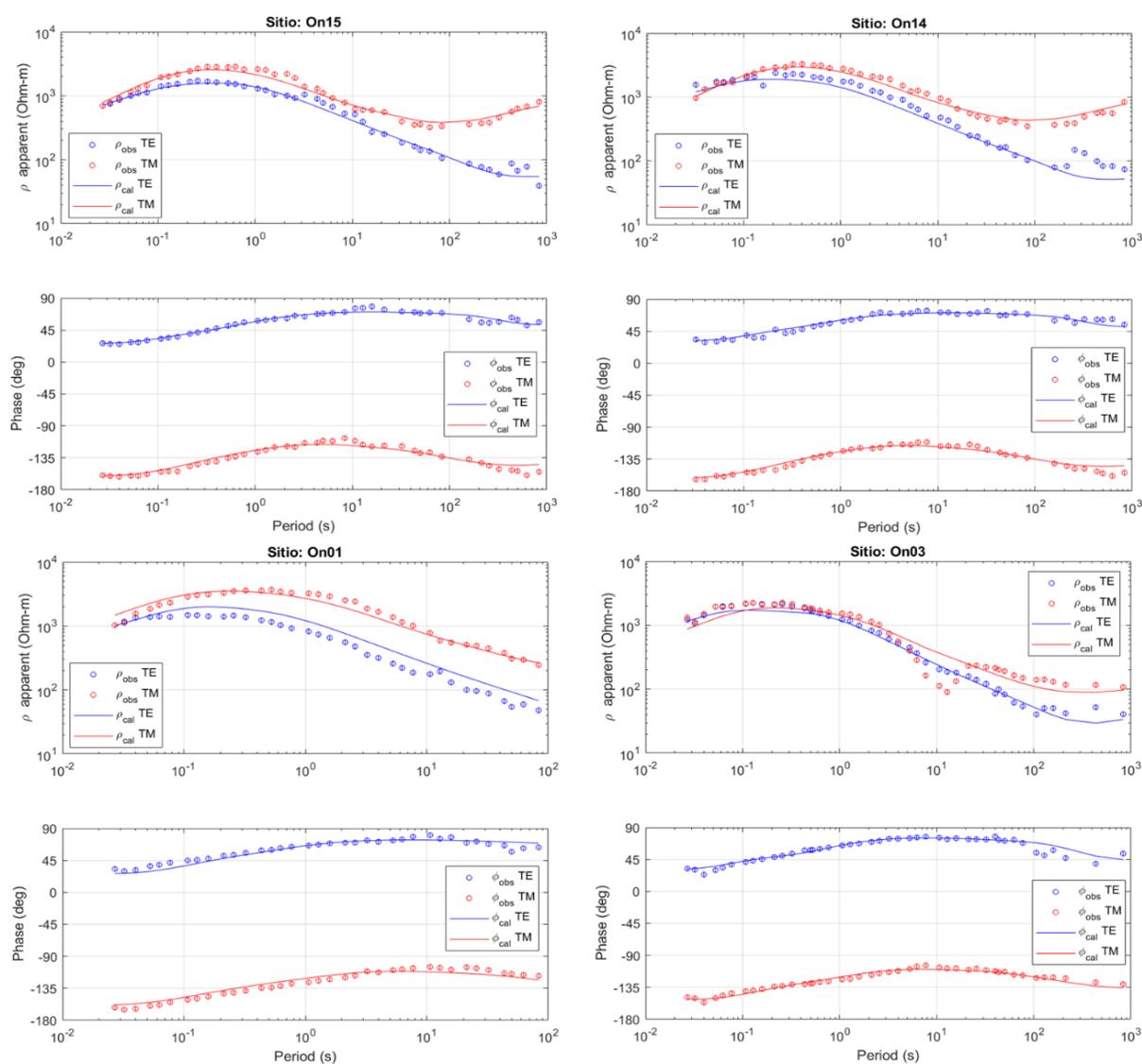
$$x_{rms} = \sqrt{\frac{\chi^2}{n}} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left[ \frac{d_i - F_i(m)}{s_i} \right]^2} \quad (36)$$

donde  $d_i$  son los datos observados,  $F_i(m)$  son los datos calculados por el modelo,  $s_i$  es la incertidumbre (desviación estándar), es decir, el peso o error asociado a cada dato, y  $n$  es el número total de datos. Un menor valor de RMS indica un mejor ajuste entre los datos observados y calculados. Por otro lado, la rugosidad del modelo, que mide que tan suave o rugoso es, se define como:

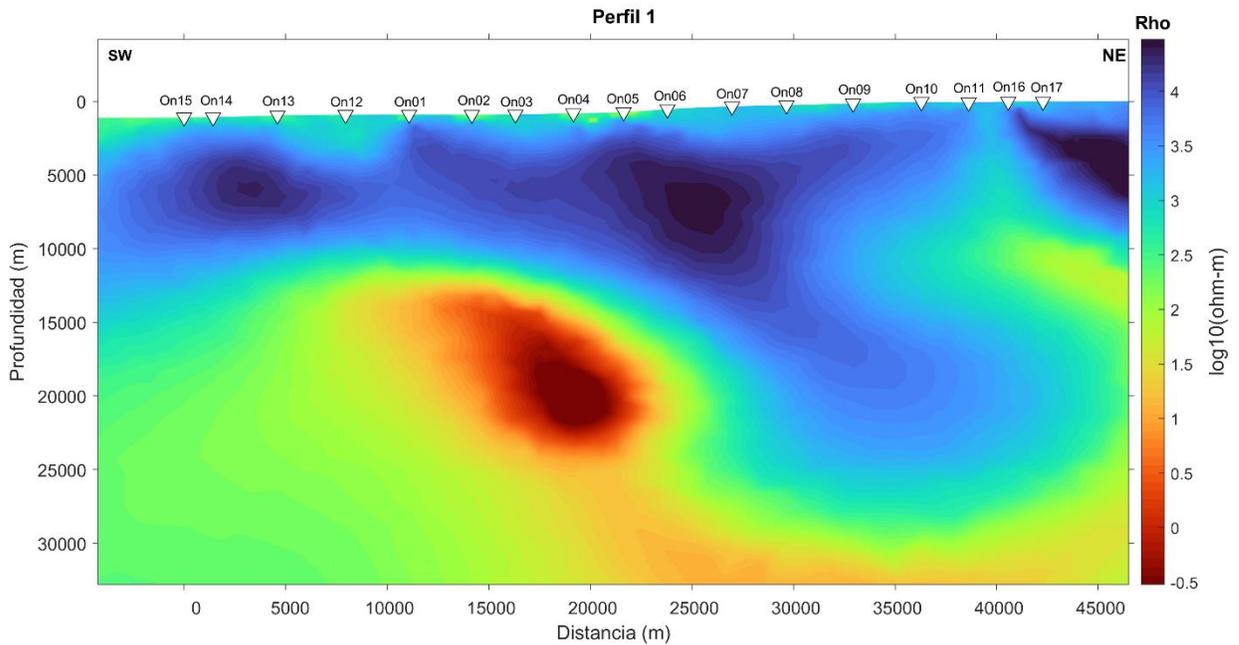
$$\|\mathbf{Rm}\|^2 = \sum_{i=1}^m \left( \sum_{j=1}^{N(i)} [\omega_j (m_i - m_j)]^2 \right) \quad (37)$$

donde  $N_i$  es el número de parámetros vecinos alrededor de los parámetros  $m_i$  y  $\omega_i$  que son pesos establecidos de modo que la suma de diferencias se aproxima a la integral del gradiente local.

En este trabajo, se realizaron cinco intentos de inversión, cada uno con diversas iteraciones. Finalmente, se seleccionó el modelo de la iteración 17 del quinto intento, que abarcó un total de 62 iteraciones. En la Figura 12 se muestran las respuestas obtenidas a partir de la iteración 17, las cuales indican un ajuste satisfactorio entre los datos observados y calculados. En la Figura 13 se presenta el modelo de resistividades resultante, que abarca un rango de  $0.3 \Omega \cdot m$  a  $30,000 \Omega \cdot m$ , representado en escala logarítmica para mejorar la visualización.



**Figura 12.** Comparación entre las resistividades aparentes y las fases observadas con las calculadas para los sitios On15, On14, On02 y On03 del perfil 1. Los puntos representan los datos medidos, mientras que las líneas muestran las respuestas calculadas a partir del modelo 2D.

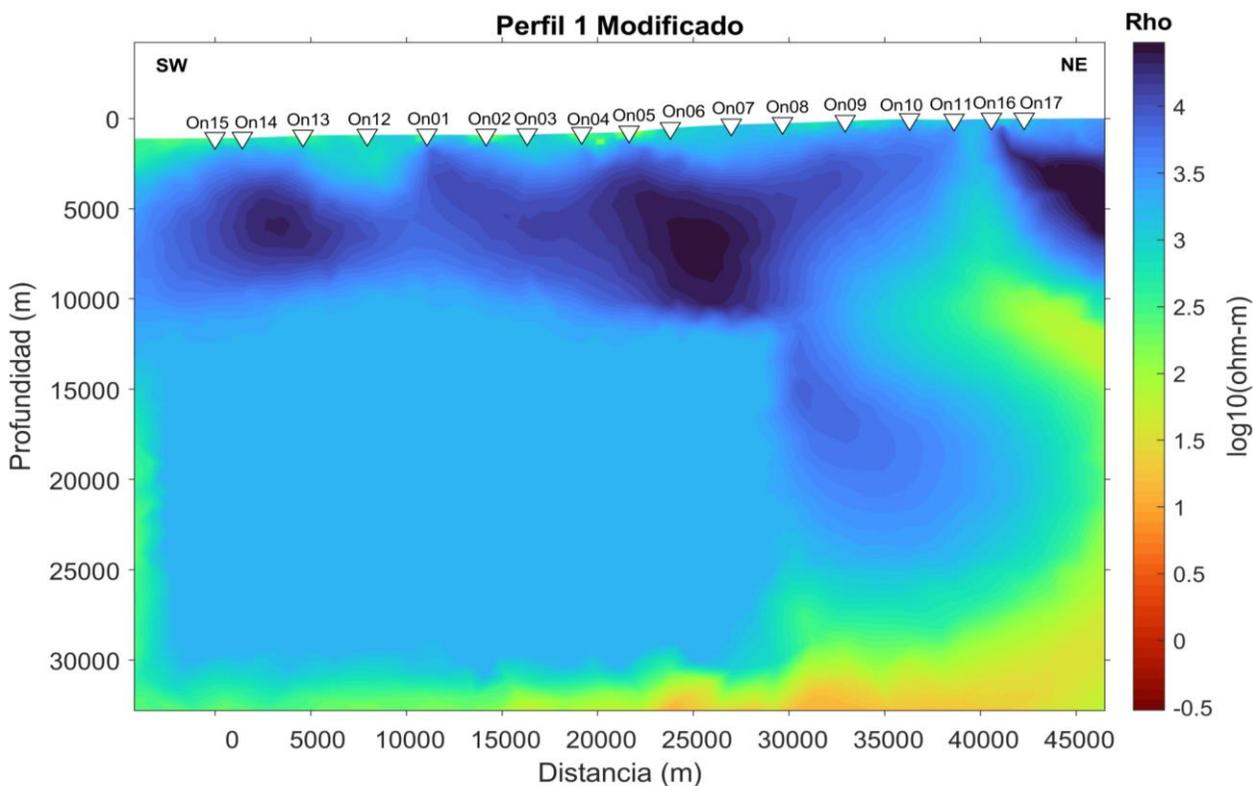


**Figura 13.** Modelo 2D del perfil 1 (Ojos Negros) con orientación SW-NE. Los valores de resistividad ( $\rho$ ) se representan en escala logarítmica, donde los colores cálidos indican resistividades bajas y los colores fríos corresponden a resistividades más altas. Los sitios MT se identifican mediante triángulos de color blanco.

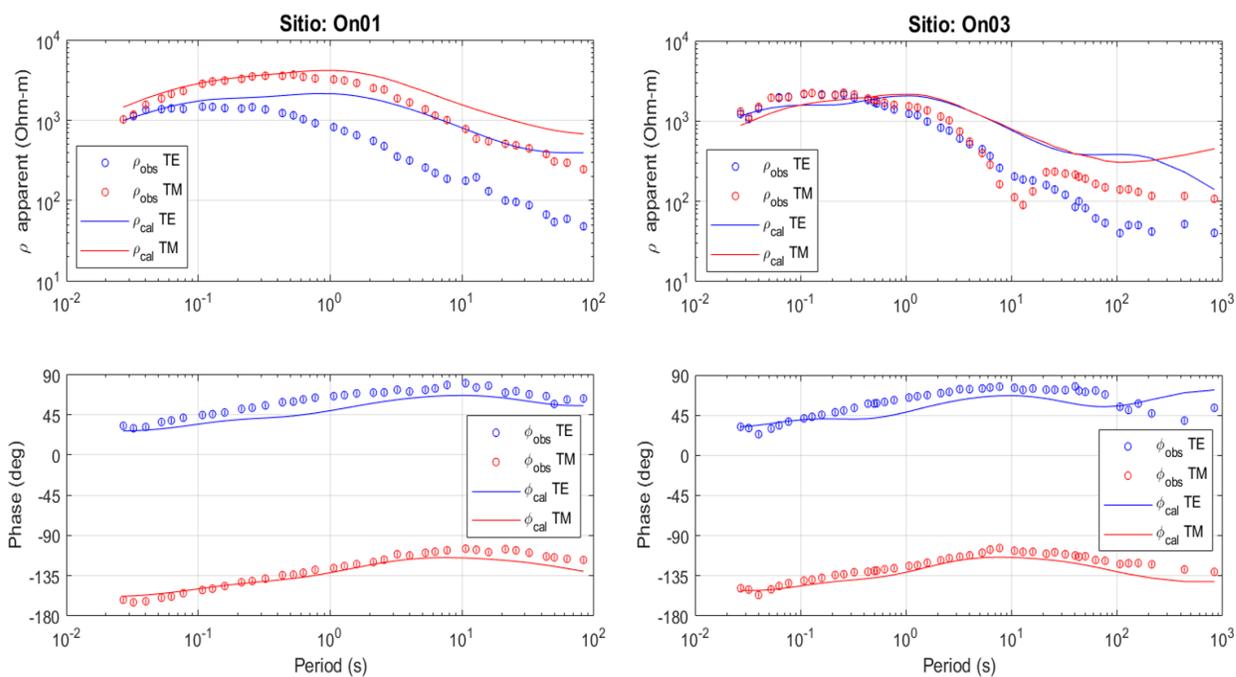
#### 4.2.1.1 Prueba de Sensibilidad

Un método sencillo para evaluar qué tan bien está resuelto un rasgo en un modelo de inversión es mediante pruebas de sensibilidad. Estas pruebas consisten en modificar el rasgo de interés y calcular la respuesta del modelo. Si el desajuste se incrementa, significa que la presencia del rasgo era necesaria para ajustar mejor los datos; si no cambia, su existencia es incierta. Para confirmar la presencia de cuerpos conductores en el perfil 1, se realizaron pruebas de sensibilidad.

Existen dos enfoques para estas pruebas. El primero, más rápido, implica un modelado directo para observar cómo responden las curvas calculadas. El segundo consiste en realizar una nueva inversión a partir del modelo modificado para verificar si converge al mismo resultado que las inversiones originales. En este trabajo se optó por el modelado directo. Para el perfil 1, se modificó el valor de resistividad del cuerpo conductor ubicado a los 11 km de profundidad (Figura 13), asignándole un valor de  $2,000 \Omega \cdot m$  (Figura 14). Posteriormente, se realizó un modelado directo y se obtuvieron curvas de respuesta (Figura 15) que mostraron un desajuste muy grande cuando se comparan con las curvas observadas (Figura 15). Esta variación confirma que el cuerpo conductor presente en el perfil 1 está respaldado por los datos observados, lo que refuerza su interpretación como una estructura geológicamente significativa.



**Figura 14.** Modelo modificado del perfil 1 donde el cuerpo conductor ha sido sustituido por uno resistivo con un valor asignado de  $2,000 \Omega \cdot m$ .

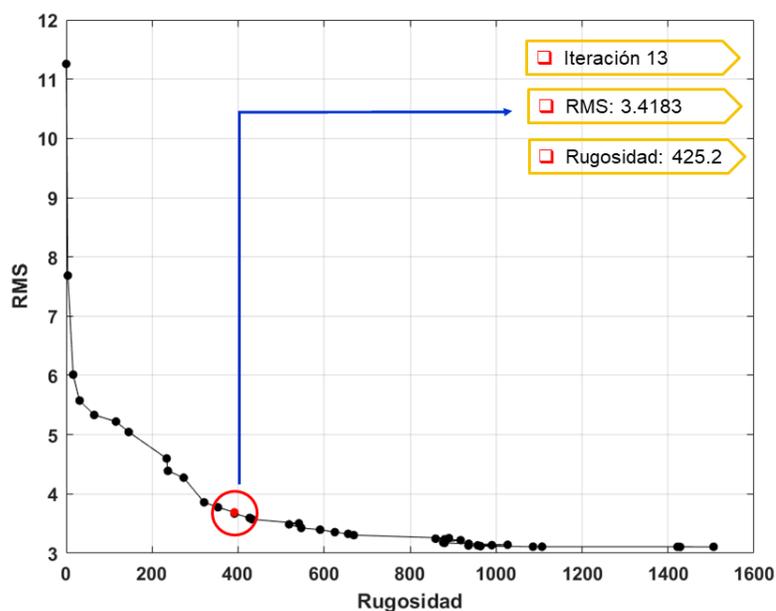


**Figura 15.** Comparación entre las resistividades aparentes y las fases observadas con las calculadas a partir del modelo modificado (**Figura 14**) para los sitios On01 y On03 del perfil 1. Los puntos representan los datos medidos, mientras que las líneas corresponden a las respuestas calculadas a partir del modelo modificado.

#### 4.2.2 Perfil 2

Para el perfil 2, también se consideró un medio bidimensional, que se discretizó en tres regiones similar al enfoque aplicado en el perfil 1 (Figura 10). La región A cubre un área de  $2000 \times 2000$  km y se dividió en dos capas: aire y subsuelo. Se asignó una resistividad de  $10^{12} \Omega \cdot m$  para la capa de aire y de  $100 \Omega \cdot m$  para el subsuelo. Dentro de la capa del subsuelo, se definió la región B, que se extiende hasta una profundidad de 40 km desde la interfaz aire-tierra y lateralmente abarca 70 km.

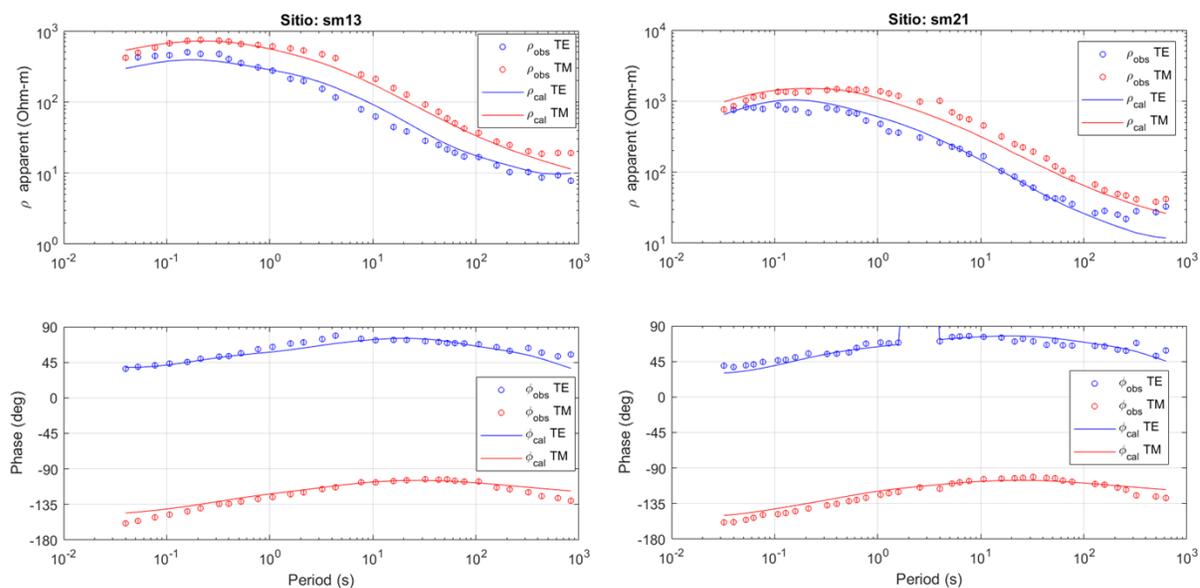
La zona de mayor interés, la región C, fue discretizada con mayor detalle, utilizando triángulos de aproximadamente 1000 m de longitud para mejorar la resolución en esta área. Al igual que en el perfil 1, se incorporó la topografía promedio del perfil, considerando las elevaciones de cada sitio para una mejor representación del terreno y se asignó un error del 10% en los datos de resistividad aparente y de 2.86 grados en los valores de la fase. Para el subsuelo, se aplicó una discretización triangular de elemento finito, generando una malla compuesta por aproximadamente 6,000 a 9,200 triángulos. El modelo seleccionado para el perfil 2 correspondió a la iteración 13, ya que presentó un equilibrio óptimo entre el ajuste de los datos y la suavidad del modelo (Figura 16), este equilibrio se evaluó mediante la curva L.



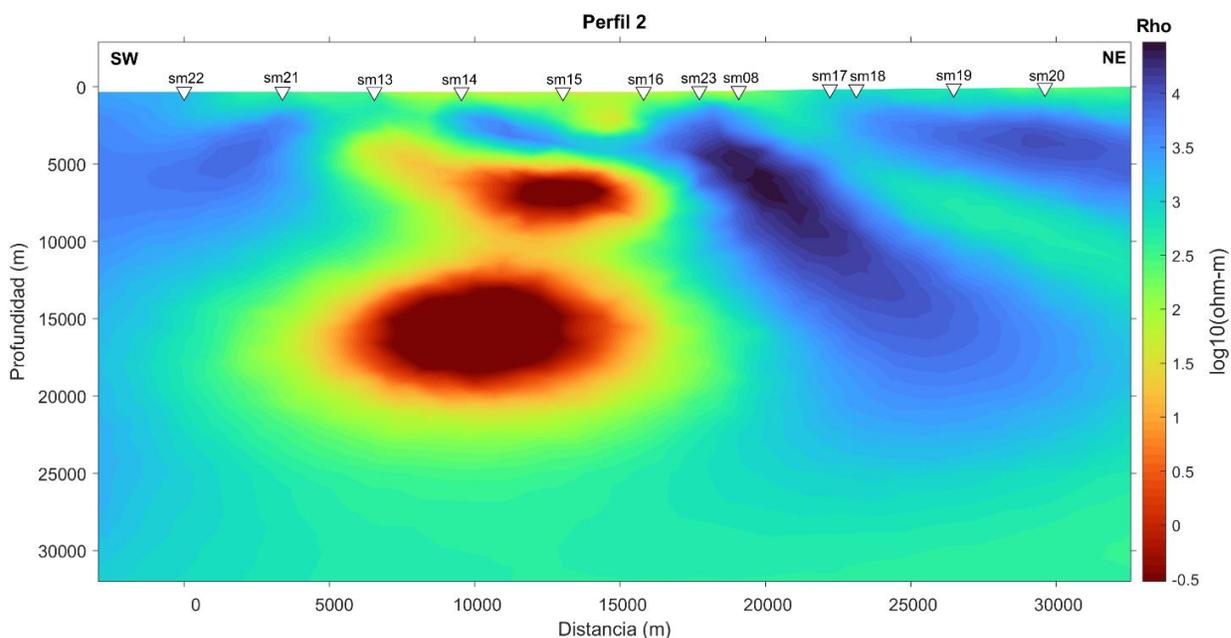
**Figura 16.** Curva L del perfil 2 (San Miguel), obtenida de los diferentes valores de rugosidad frente a los valores de RMS de los modelos de inversión 2D.

Se realizaron 4 intentos de inversión, cada uno con distinto número de iteraciones. Finalmente, se seleccionó el modelo de la iteración 13 del cuarto intento, que abarcó un total de 41 iteraciones. En la

Figura 17 se muestran las respuestas obtenidas a partir de la iteración 13, las cuales indican un ajuste satisfactorio entre los datos observados y calculados y en la Figura 18 se presenta el modelo de resistividades resultante del proceso de inversión.



**Figura 17.** Comparación entre las resistividades aparentes y las fases observadas con las calculadas para los sitios sm13 y sm21 del perfil 2. Los puntos representan los datos medidos, mientras que las líneas muestran las respuestas calculadas a partir del modelo 2D.



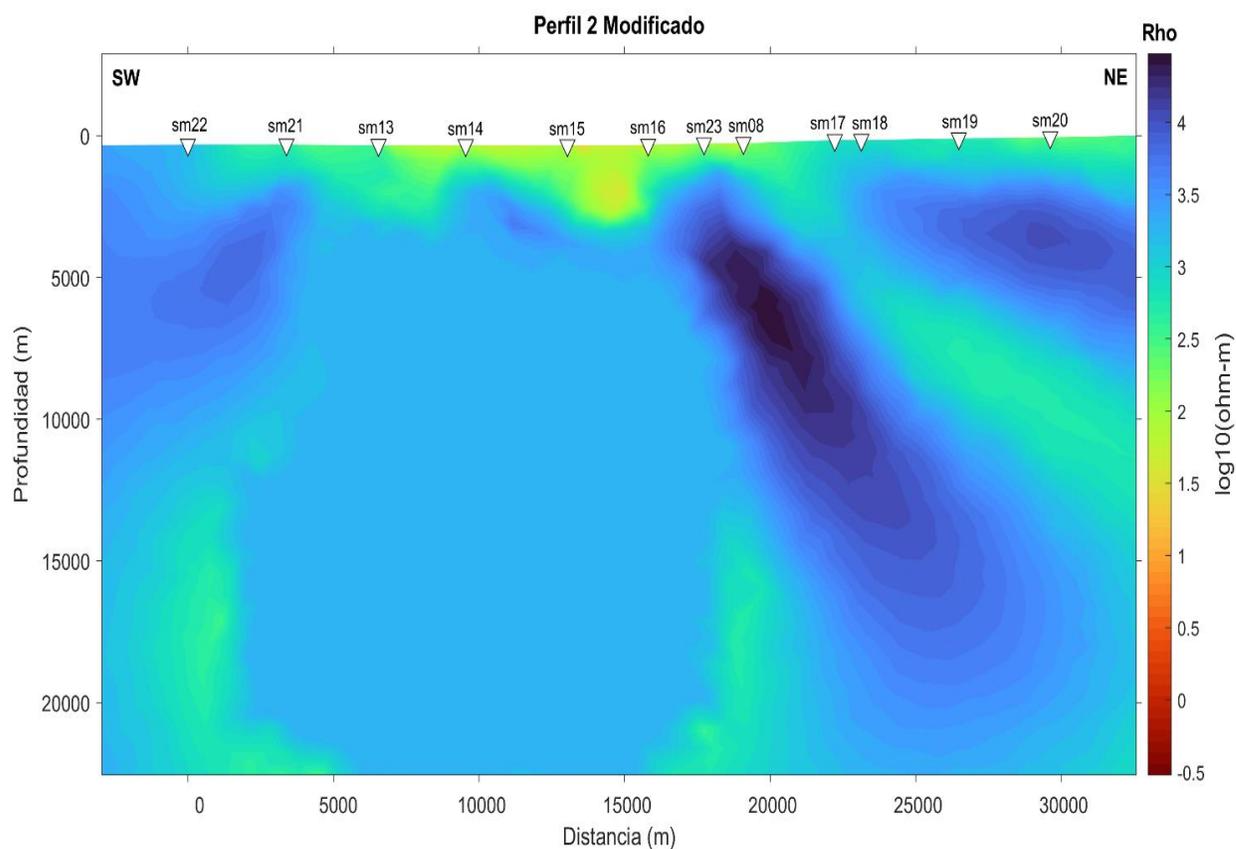
**Figura 18.** Modelo 2D del perfil 2 (San Miguel) con orientación SW-NE. Se utiliza una escala logarítmica para representar los valores de resistividad ( $\rho$ ). Los sitios MT están representados con triángulos de color blanco.

#### 4.2.2.1 Prueba de Sensibilidad

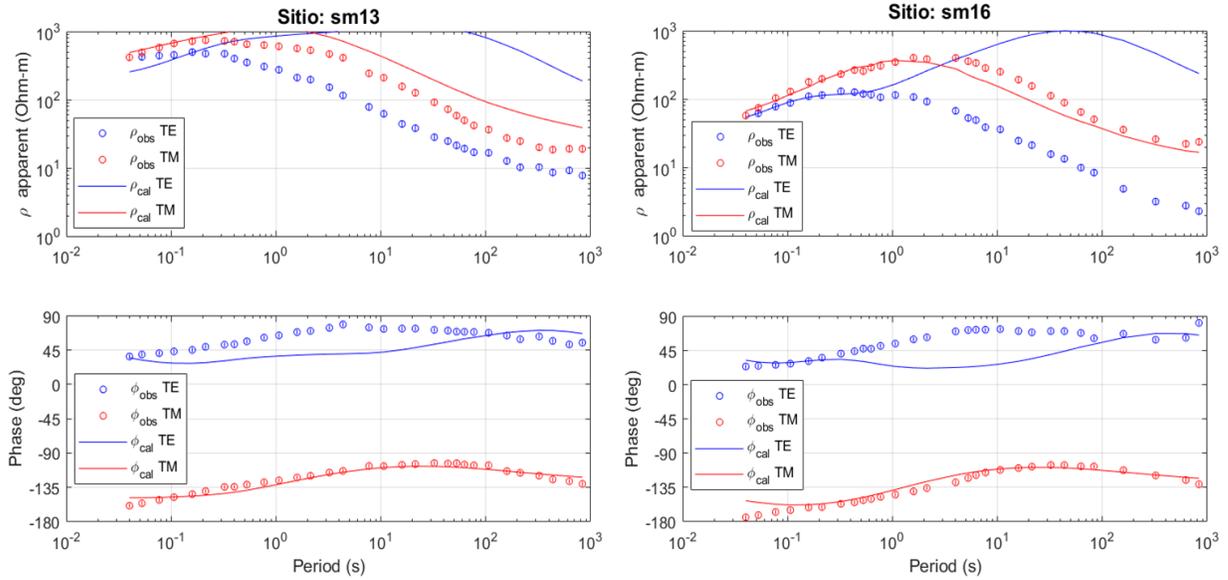
Al igual que en el perfil 1, para el perfil 2 se realizó una prueba de sensibilidad. Esta prueba consistió en modificar la resistividad del cuerpo conductor ubicado entre los 5 km y 20 km de profundidad (Figura 18), asignándole un valor de  $2,000 \Omega \cdot m$  (Figura 19).

Una vez realizada la modificación, se llevó a cabo un modelado directo, generando curvas de respuesta que se muestran en la Figura 20. Estas curvas mostraron desajustes mayores al compararse con las curvas observadas, especialmente en la curva correspondiente al modo TE, que se aprecia en color azul en la Figura 20.

La diferencia en el comportamiento de las curvas, particularmente en el modo TE, resalta la sensibilidad del modelo a los cambios en la resistividad de esta estructura profunda. Estas diferencias confirman que el cuerpo conductor identificado en el perfil 2 está respaldado por los datos observados, reforzando su interpretación como una estructura geológicamente relevante.



**Figura 19.** Modelo modificado del perfil 2 donde el cuerpo conductor ha sido sustituido por uno resistivo con un valor asignado de  $2,000 \Omega \cdot m$ .



**Figura 20.** Comparación entre las resistividades aparentes y las fases observadas con las calculadas a partir del modelado modificado para los sitios sm13 y sm16 del perfil 2. Los puntos representan los datos medidos, mientras que las líneas corresponden a las respuestas calculadas a partir del modelo modificado.

### 4.3 Inversión 3D

En el caso de los modelos 3D, para la inversión de los datos se usó un código desarrollado por Kelbert et al. (2014). Este código está construido de manera modular, con componentes básicos de inversión como el modelado directo, cálculos de sensibilidad, algoritmos de inversión parametrización y regularización del modelo.

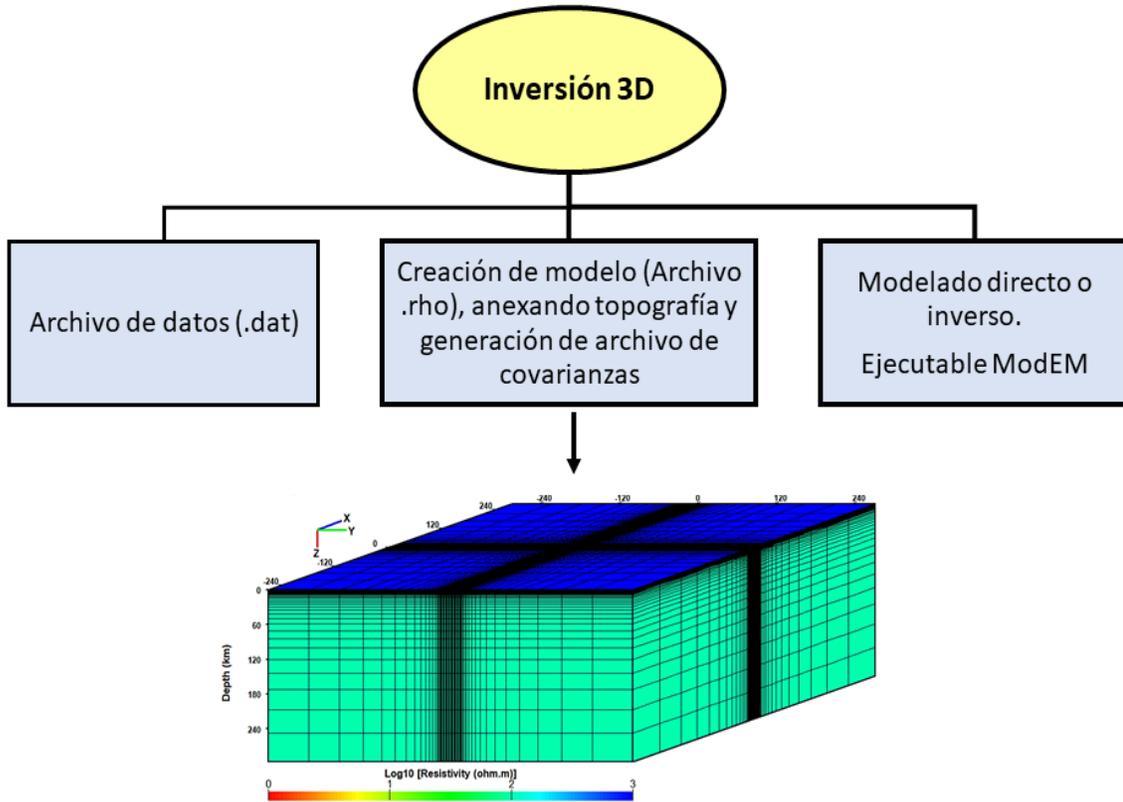
El código ModEM proporciona una base general para resolver de forma regularizada problemas inversos, es decir, minimiza una función de penalización de la siguiente forma:

$$\Phi(\mathbf{m}, \mathbf{d}) = (\mathbf{d} - \mathbf{f}(\mathbf{m}))^T \mathbf{C}_d^{-1} (\mathbf{d} - \mathbf{f}(\mathbf{m})) + \nu (\mathbf{m} - \mathbf{m}_0)^T \mathbf{C}_m^{-1} (\mathbf{m} - \mathbf{m}_0) \quad (38)$$

El primer término de la ecuación (38) minimiza el desajuste entre datos observados  $\mathbf{d}$  y respuesta del modelo  $\mathbf{f}(\mathbf{m})$ . El segundo término mantiene los parámetros del modelo  $\mathbf{m}$  cercanos a los de un modelo de referencia (o modelo a priori)  $\mathbf{m}_0$ , el cual generalmente es un semiespacio homogéneo.

En la ecuación 38,  $\mathbf{C}_d$  es la covarianza de los datos (matriz de incertidumbre en los datos),  $\nu$  es un parámetro de regularización y  $\mathbf{C}_m$  define la matriz de covarianza del modelo (Kelbert et al., 2014). Este

último parámetro controla la suavidad del modelo resultante, al ponerle peso a la diferencia en la resistividad entre celdas vecinas.



**Figura 21.** Flujo sencillo de trabajo del código ModEM

El cálculo del modelo directo en el código ModEM está implementado con la técnica de diferencias finitas en un mallado intercalado de tipo Yee, y la solución de las ecuaciones de Maxwell es obtenida a partir de la siguiente ecuación:

$$\nabla \times \nabla \times E + i\omega\mu\sigma E = 0 \quad (39)$$

En la Figura 21 se presenta un esquema del proceso de inversión 3D utilizando el software ModEM. El primer paso consiste en generar un archivo de datos (.dat), que contiene la información de impedancias, periodos, posiciones de los sitios y otros parámetros relevantes de cada sitio MT, además de indicar si se emplearan solo los datos de la antidiagonal o el tensor completo.

Posterior a esto, se crea un archivo del modelo (.rho) que define el modelo a priori, incluyendo la malla utilizada para discretizar el modelo, la resistividad y otros parámetros asociados. Es importante mencionar que en esta etapa es posible incorporar la topografía al modelo. Este archivo también puede emplearse para generar un archivo de covarianzas (.cov), que contiene los parámetros de suavidad y la topografía o batimetría discretizada en las celdas de las capas superiores del modelo.

Finalmente, se ejecuta el código ModEM para realizar la inversión o modelado directo. Además, para realizar la inversión es indispensable contar con archivos adicionales que incluyan los parámetros de control necesarios para configurar y ejecutar correctamente el código.

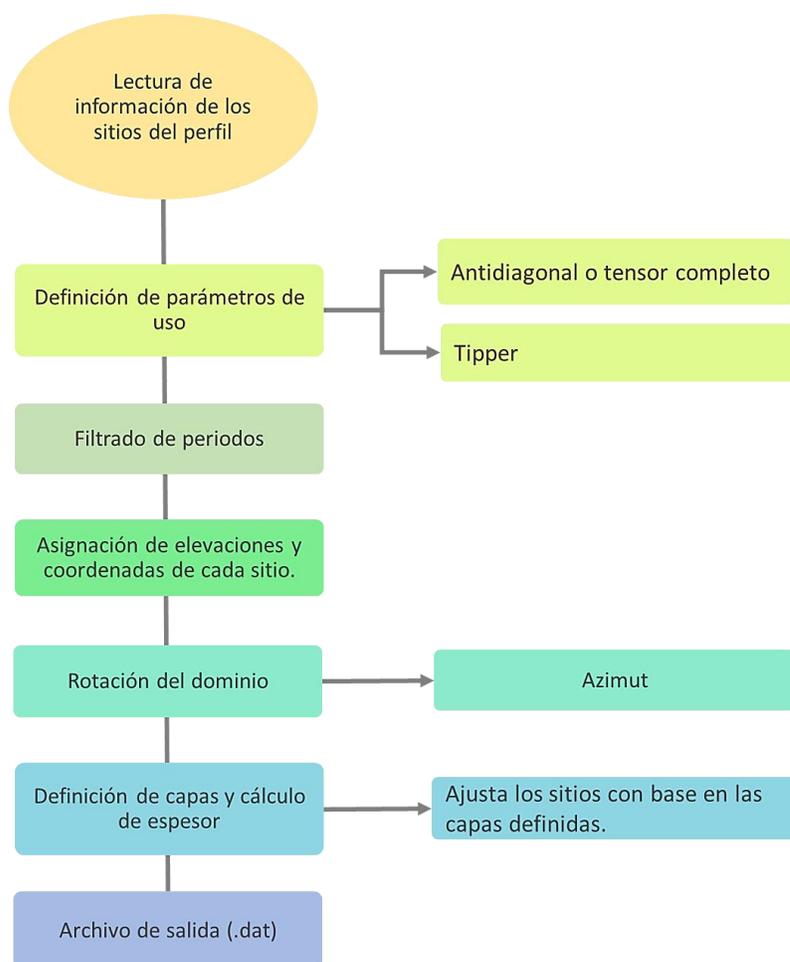
### 4.3.1 Modelo Ojos Negros

El proceso de inversión 3D de los datos magnetotelúricos (MT) correspondientes al perfil 1 (Ojos Negros) comenzó con la generación de los archivos fundamentales para realizar la inversión utilizando el código ModEM. Estos archivos incluyen el archivo de datos, el archivo del modelo y el archivo de covarianzas. Para generar el archivo de datos, se empleó un código en Matlab, que sigue el flujo general presentado en la Figura 22.

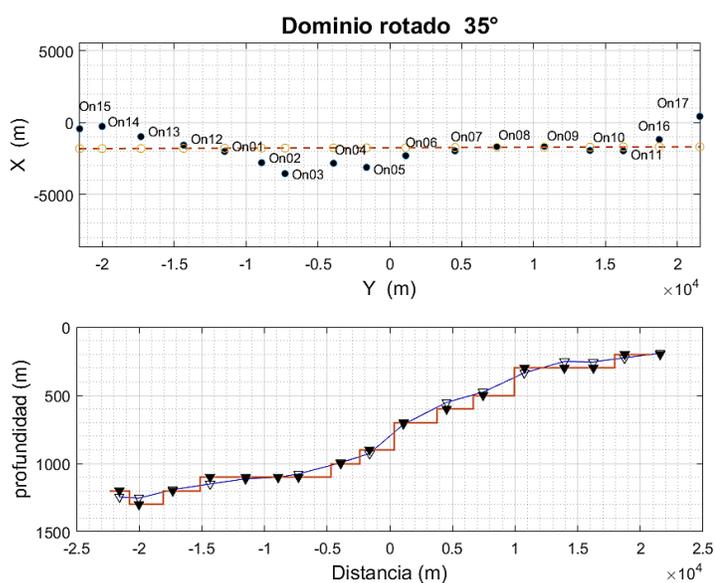
Es relevante destacar que, en el caso del perfil 1, el dominio del modelo se construyó con un azimut de  $35^\circ$  (Figura 24), con objeto de optimizar el número de celdas en el modelo. Además, se asume que el rumbo del perfil fue diseñado para intersectar perpendicularmente a alguna estructura de interés a profundidad, por lo que es aconsejable que para la modelación numérica se use una malla orientada al rumbo del perfil (esto es, perpendicular al rumbo de la estructura buscada).

Al rotar el dominio del modelo, el rumbo de las estructuras objetivo se alinean a los campos electromagnéticos simulados en las direcciones X y Y en el dominio del modelo. De este modo, los campos simulados están alineados con las direcciones principales de los campos generados por la estructura que se está modelando.

Una vez rotado el dominio, se definió la discretización de las capas más superficiales, utilizando un total de 22 capas con un espesor 100m cada una (Figura 23). Se generaron dos archivos de datos, uno con los elementos de la antidiagonal ( $Z_{xy}$  y  $Z_{yx}$ ) y otro con las 4 componentes del tensor ( $Z_{xx}$ ,  $Z_{xy}$ ,  $Z_{yx}$  y  $Z_{yy}$ ).



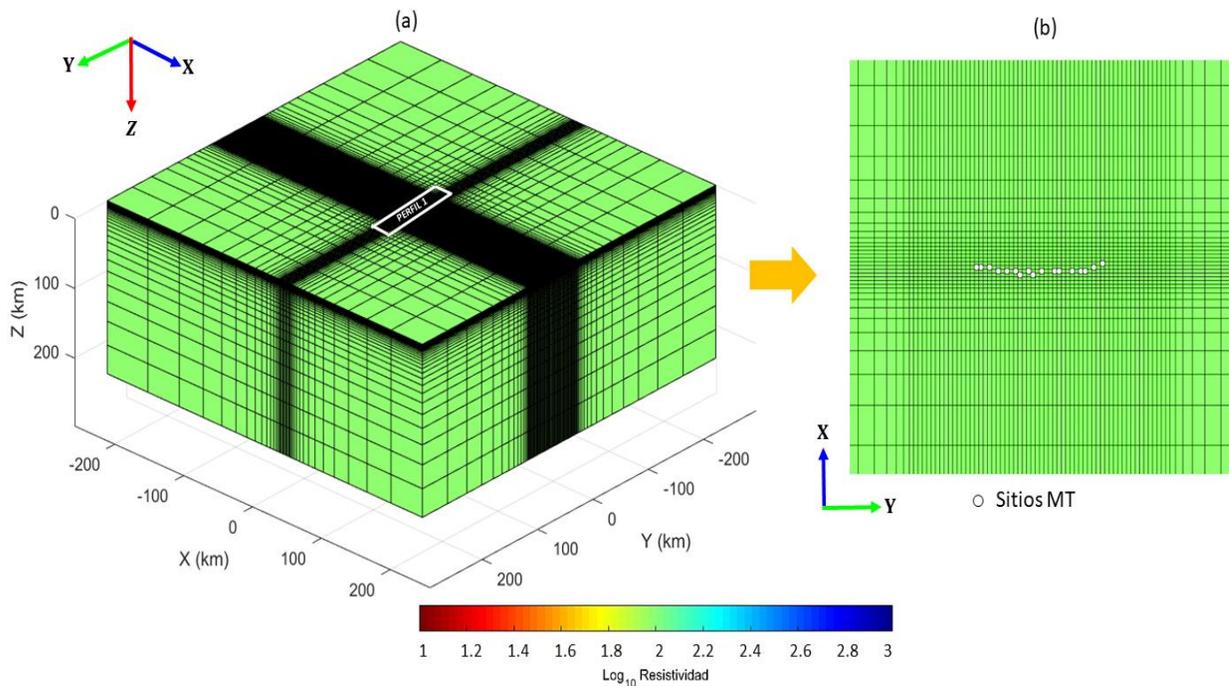
**Figura 22.** Flujo de trabajo del código en Matlab para poder generar los archivos de datos (.dat) correspondientes a los tres perfiles de datos magnetotelúricos (MT).



**Figura 23.** Distribución de los sitios MT del perfil 1 y representación de las capas requeridas para representar la topografía en el modelo.

Después de generar el archivo de datos, se procedió a construir el modelo a priori utilizando el programa 3DGrid. La selección del modelo a priori es importante para realizar la inversión 3D, ya que constituye el modelo de referencia para la optimización. Para el perfil 1, los parámetros empleados en la malla del modelo a priori fueron los siguientes:

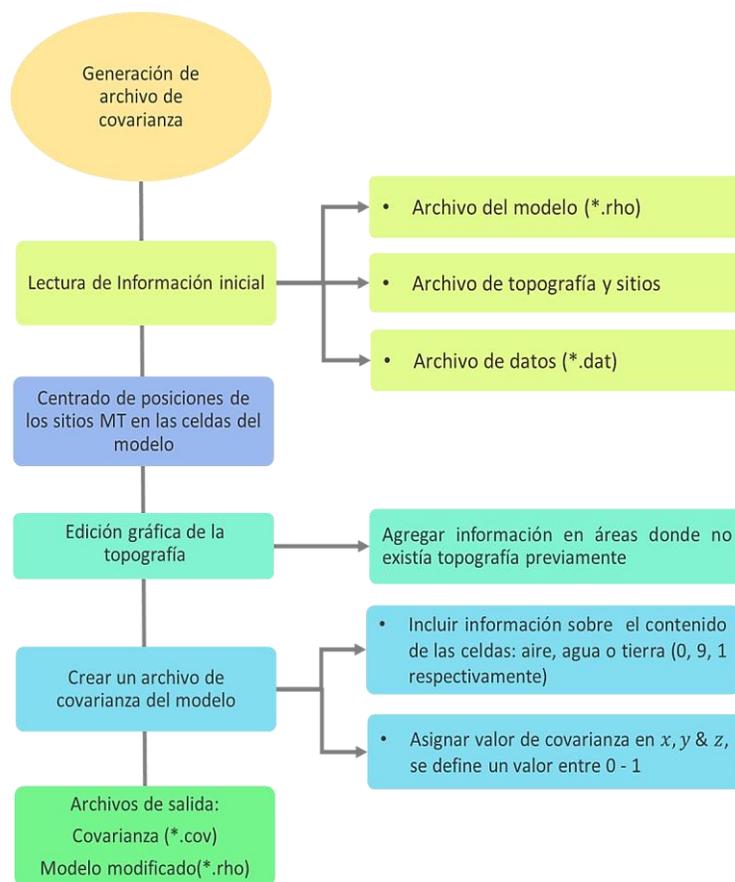
- Modelo homogéneo con una resistividad de  $100 \Omega \cdot m$ .
- En la zona de interés, se utilizó una discretización de 6 celdas en la dirección X y 30 celdas en Y, con dimensiones de  $1500 \times 1500 m$ .
- Se añadieron 14 celdas adicionales tanto en X como en Y, con dimensiones incrementándose por un factor de 1.3.
- En la dirección Z, se aplicó una discretización lineal hasta los 2300 m, con capas de 100 m de espesor, seguidas por capas con espesores incrementándose por un factor de 1.2, hasta cubrir al menos 2 "skin depths". Es importante mencionar que el "skin depth" máximo calculado es de aproximadamente 150 km.



**Figura 24.** Discretización del modelo 3D del perfil 1 (Ojos Negros). (a) Visualización en 3D del modelo con  $34 \times 58 \times 58$  celdas en las direcciones **X**, **Y** y **Z**. (b) Vista en planta (2D) que muestra la ubicación de los sitios MT, representados por círculos blancos. En la zona de interés, las celdas tienen dimensiones de  $1500 \times 1500 m$ .

El mallado 3D resultante para el perfil 1 consistió en  $34 \times 58 \times 58$  celdas en las direcciones X, Y y Z, respectivamente (Figura 24). En el modelo que se visualiza en el 3DGrid los sitios aparecen a distintas profundidades, se considera que  $Z = 0$  es el punto topográfico más alto.

La topografía se integró al modelo fuera del programa 3DGrid, ya que esta información no se limita a la posición de los sitios, sino que debe aplicarse a todas las celdas del modelo. Además, el programa 3DGrid no guarda la topografía en el archivo de covarianzas. Para generar dicho archivo incorporando la topografía en todo el dominio del modelo, se utilizó un código en Matlab desarrollado por el Dr. José Manuel Romo Jones, cuyo funcionamiento general se describe en la Figura 25. Cabe destacar que se asignó un valor de covarianza en  $x, y$  y  $z$  de 0.2.



**Figura 25.** Flujo de trabajo del código en Matlab para la generación de los archivos de covarianza (.cov) correspondientes a los tres perfiles de datos magnetotelúricos (MT).

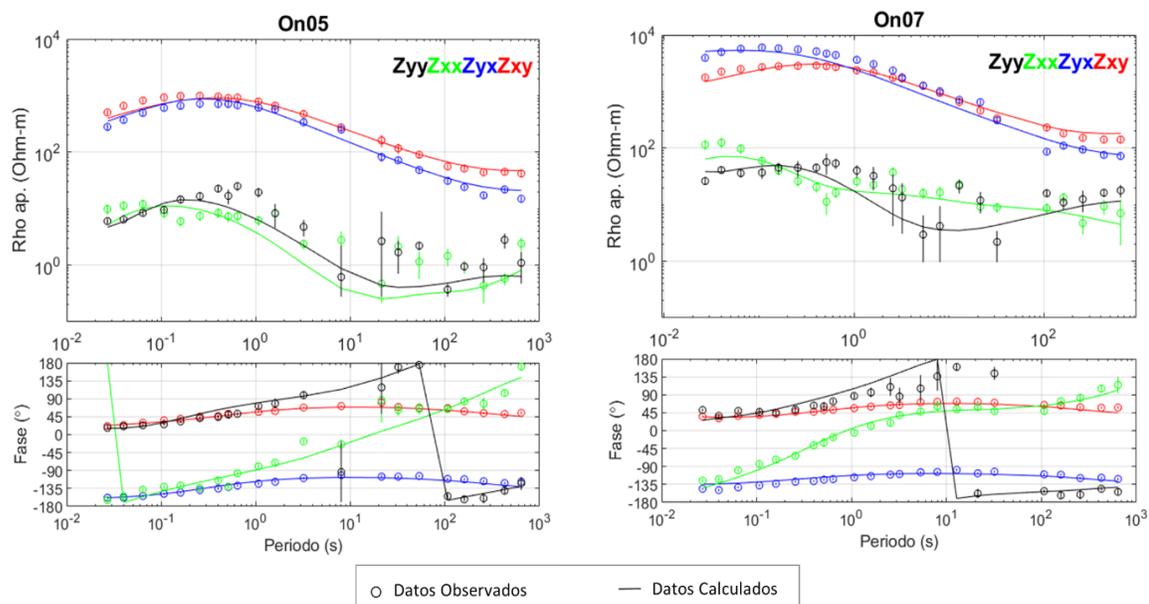
Una vez obtenidos los tres archivos fundamentales para el proceso de inversión, se implementaron dos esquemas de inversión. El primero utilizó los elementos de la antidiagonal del tensor de impedancias, considerando una incertidumbre del 5% de  $|Z_{xy}|$  y  $|Z_{yx}|$ . Para el segundo esquema, se partió del modelo

obtenido con la antidiagonal pero agregando la información del tensor completo. El modelo de referencia (o modelo a priori) continuó siendo el semiespacio homogéneo de  $100 \Omega \cdot m$ . En este segundo esquema se usaron incertidumbres del 5% para la antidiagonal  $|Z_{xy}|$ ,  $|Z_{yx}|$ , y del 10% para la diagonal  $|Z_{xx}|$ ,  $|Z_{yy}|$ . Además se incorporó el tipper, éste relaciona el campo magnético vertical con sus dos componentes horizontales. Es importante mencionar que este parámetro es especialmente sensible a los cambios laterales de la resistividad. Para el tipper se usó una incertidumbre del 5% en ambas componentes. En la Tabla 1 se muestran el número de iteraciones realizadas en cada esquema de inversión y el valor de RMS inicial y final obtenido.

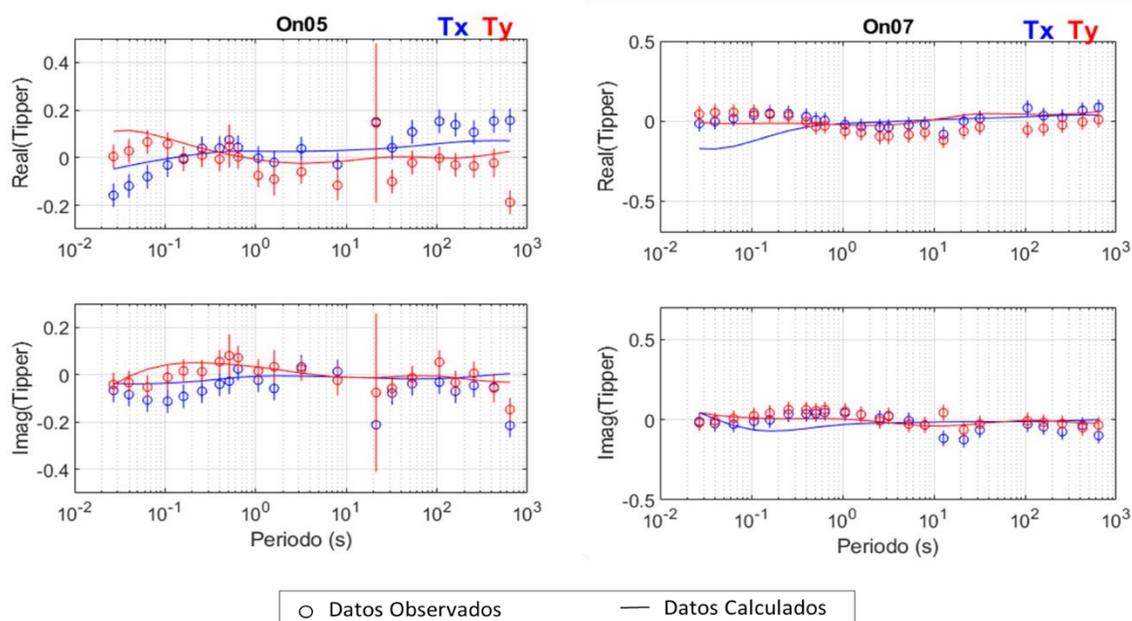
**Tabla 1.** Número de iteraciones y valor de RMS inicial y final obtenidos en cada esquema de inversión para el perfil 1 (Ojos Negros).

Esquema de inversión	No. De iteraciones	RMS inicial	RMS final
Antidiagonal	120	35.35	6.64
Tensor Completo	93	11.54	2.18

En la Figura 26 se presentan los resultados de dos sitios del perfil 1, On05 y On07, donde se observa un buen ajuste entre los datos observados (representados por círculos) y los datos calculados (representados por líneas continuas). Este ajuste es satisfactorio, con un RMS de 2.18, el cual es aceptable. Por otra parte, en la Figura 27 se muestran los ajustes del tipper para los mismos sitios que en la Figura 26.

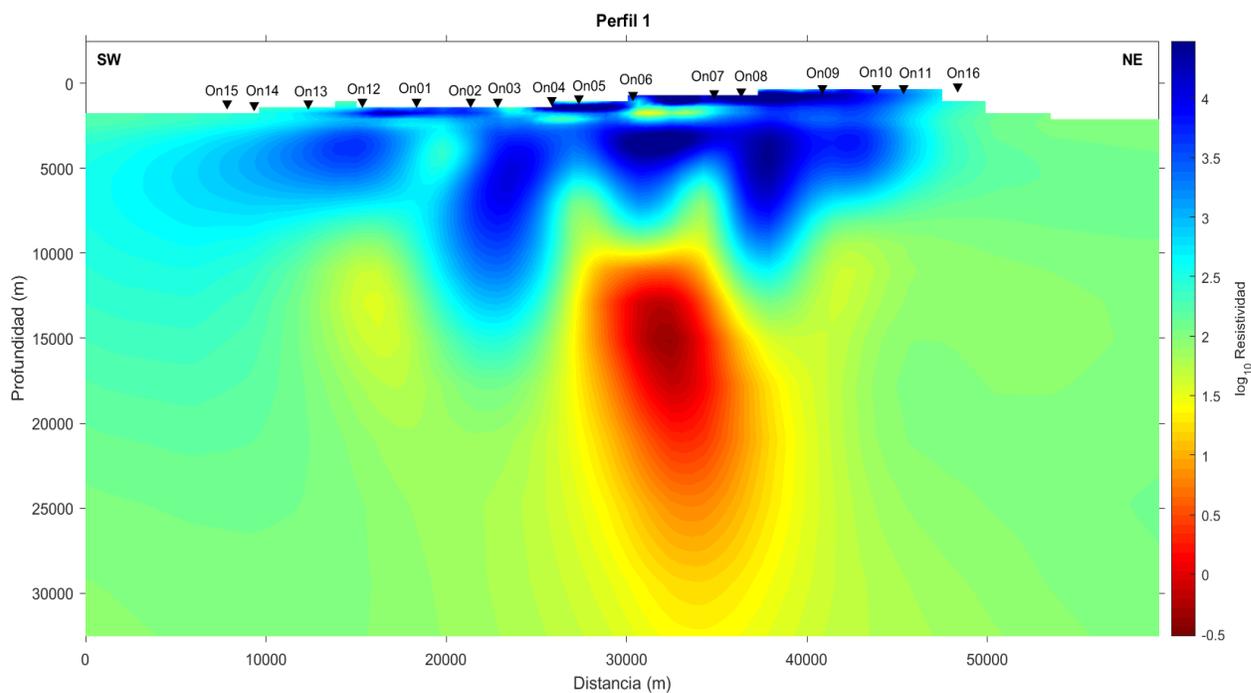


**Figura 26.** Curvas de resistividad aparente y fase del tensor completo de impedancias para los sitios On05 y On07. Los círculos corresponden a los datos observados en campo, mientras que las líneas continuas muestran los valores estimados a partir de la inversión.



**Figura 27.** Curvas de ajustes del tipper para los sitios On05 y On07. Los círculos corresponden a los datos observados en campo, mientras que las líneas continuas muestran los valores estimados a partir de la inversión.

En la Figura 28 se muestra el modelo inverso resultante en una vista 2D a lo largo del perfil 1, donde se aprecia la distribución de resistividades en profundidad



**Figura 28.** Modelo 3D del perfil 1 (Ojos Negros) con orientación SW-NE. Los valores de resistividad ( $\rho$ ) se representan en una escala logarítmica donde los colores cálidos indican resistividades bajas y los colores fríos resistividades altas. Los sitios MT se muestran con triángulos negros.

### 4.3.2 Modelo San Miguel

Para el modelo de San Miguel, se realizó la inversión conjunta de los perfiles 2 y 3 (Figura 29). Al igual que en el modelo de Ojos Negros (perfil 1), se generaron un archivo de datos, un archivo del modelo y un archivo de covarianza.

En el caso del modelo de San Miguel, el dominio del modelo se mantuvo alineado al N geográfico. Cabe mencionar que suponemos que el perfil 2 corta perpendicularmente las estructuras de la Falla San Miguel, mientras que el perfil 3 corre paralelo a estas estructuras. Para la simulación 3D consideramos que sería mejor que el campo electromagnético simulado no estuviera alineado a ninguno de los perfiles para que incidiera diagonalmente en las estructuras de interés, sin privilegiar a ninguno de los dos perfiles.

La discretización de las capas más superficiales consistió en un total de 22 capas con un espesor 100 m cada una. Los parámetros utilizados en la malla del modelo a priori de San Miguel (Perfil 2 y 3) fueron los siguientes:

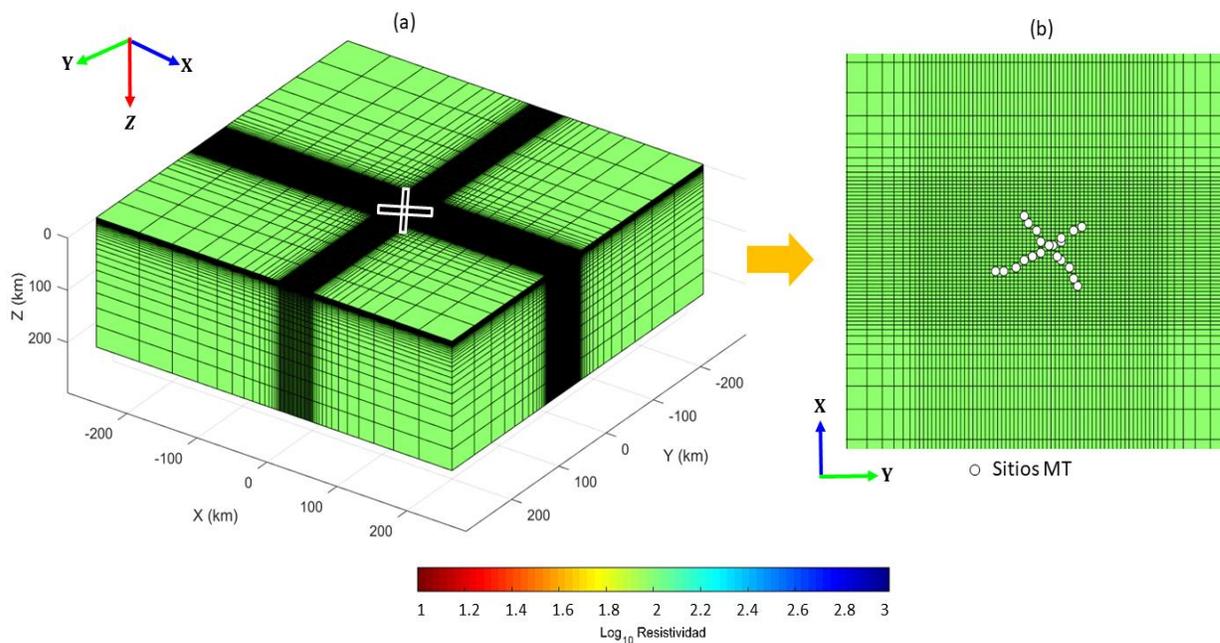
- Modelo homogéneo con una resistividad de  $100 \Omega \cdot m$ .
- En la zona de interés, se utilizó una discretización de 20 celdas en la dirección X y 30 celdas en Y, con dimensiones de  $1200 \times 1200$  m.
- Se añadieron 15 celdas adicionales en ambas direcciones (X, Y), con un factor de incremento de 1.3.
- En la dirección Z, se aplicó una discretización lineal hasta los 2300 m, con capas de 100 m de espesor, seguidas por un factor de incremento de 1.2 hasta cubrir al menos 2 “skin depths”. El “skin depth” máximo calculado es de  $\sim 150$  km.

El mallado 3D resultante para el modelo de San Miguel consistió en  $50 \times 60 \times 58$  celdas en las direcciones X, Y y Z, respectivamente (Figura 29).

Para el proceso de inversión, al igual que en el perfil 1, se realizó primero una inversión utilizando los elementos de la antidiagonal, considerando una incertidumbre del 5% de  $|Z_{xy}|$  y  $|Z_{yx}|$ . La segunda

inversión se realizó partiendo del modelo obtenido con la antidiagonal, pero añadiendo la información de todas las componentes del tensor y además el tipper.

Se utilizó una incertidumbre del 5% para la antidiagonal  $|Z_{xy}|$ ,  $|Z_{yx}|$ , y del 10% para la diagonal  $|Z_{xx}|$ ,  $|Z_{yy}|$ , y 5% para ambas componentes del tipper.



**Figura 29.** Discretización del modelo 3D del perfil 2 y 3 (San Miguel). (a) Visualización en 3D del modelo con  $50 \times 60 \times 58$  celdas en las direcciones **X**, **Y** y **Z**. (b) Vista en planta (2D) que muestra la ubicación de los sitios MT, representados por círculos blancos. En la zona de interés, las celdas tienen dimensiones de  $1200 \times 1200$  m.

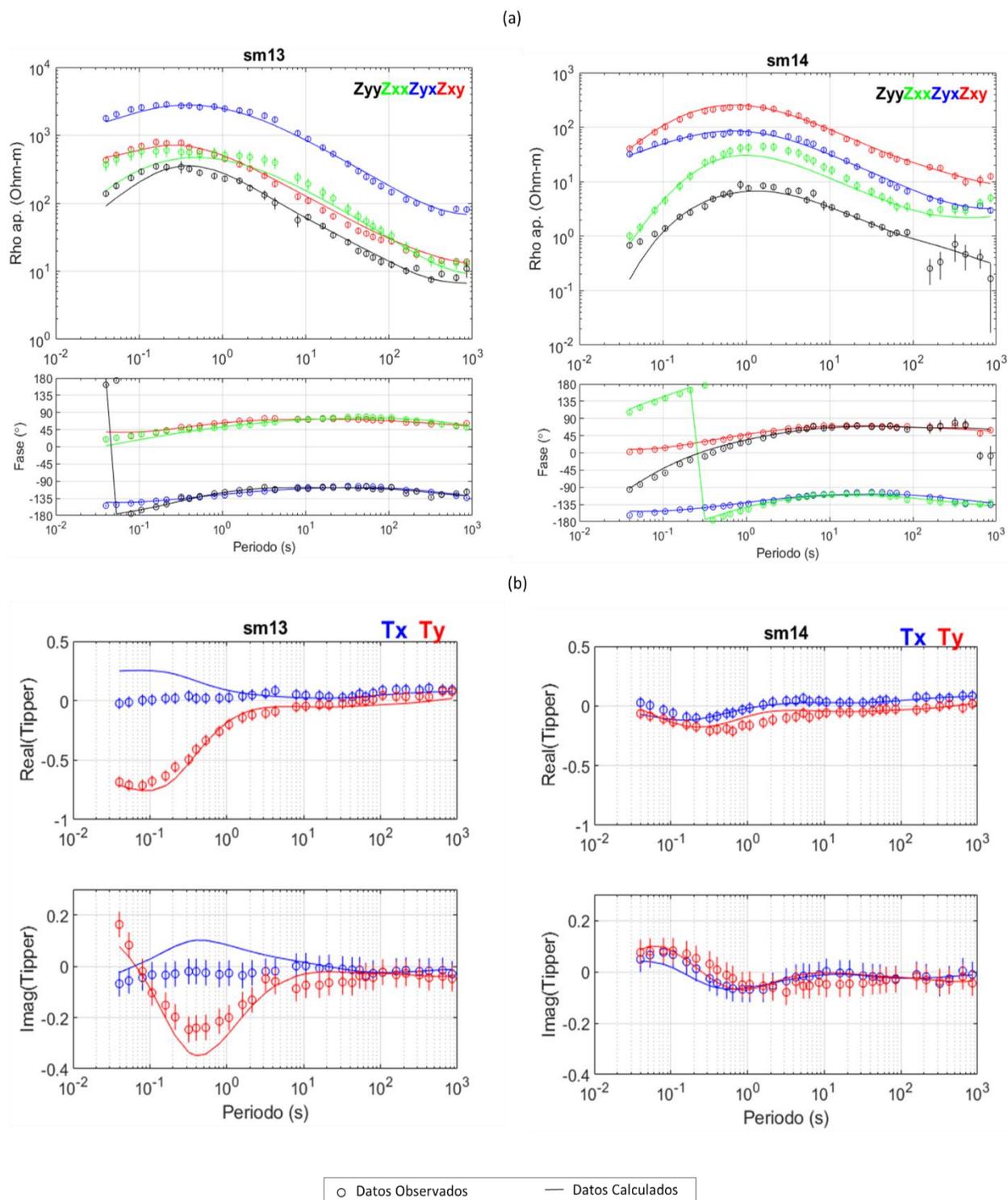
En la Tabla 2 se muestran el número de iteraciones realizadas en cada esquema de inversión y el valor de RMS inicial y final obtenido.

**Tabla 2.** Número de iteraciones y valor de RMS inicial y final obtenidos en cada esquema de inversión para el perfil 2 y 3 (San Miguel).

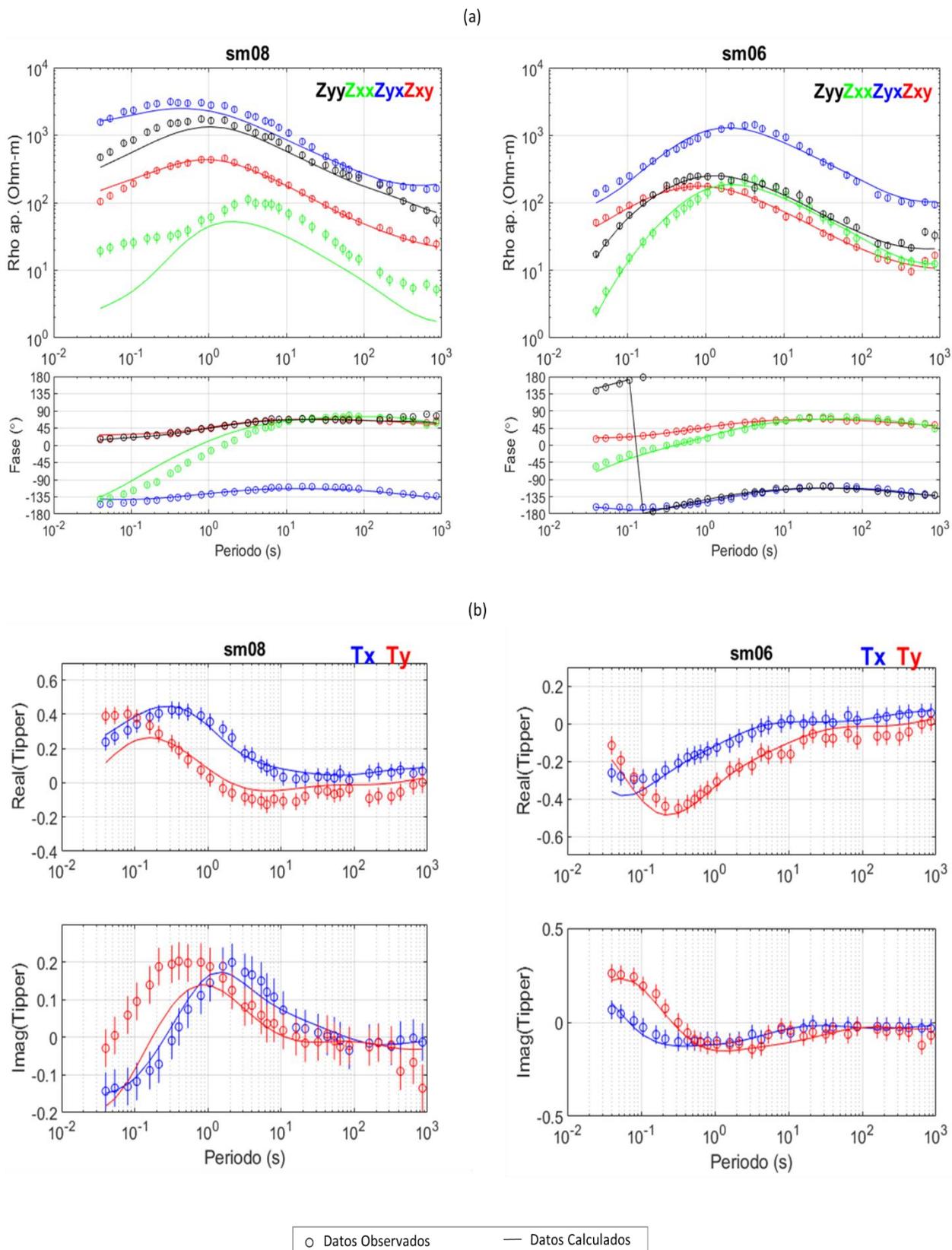
Esquema de inversión	No. De iteraciones	RMS inicial	RMS final
Antidiagonal	87	13.48	1.33
Tensor Completo	120	8.42	1.67

El modelo resultante de la inversión presentó un RMS de 1.67, lo que indica un buen ajuste entre los datos observados y calculados, como se muestra en las figuras 30 y 31. Los modelos correspondientes al área de

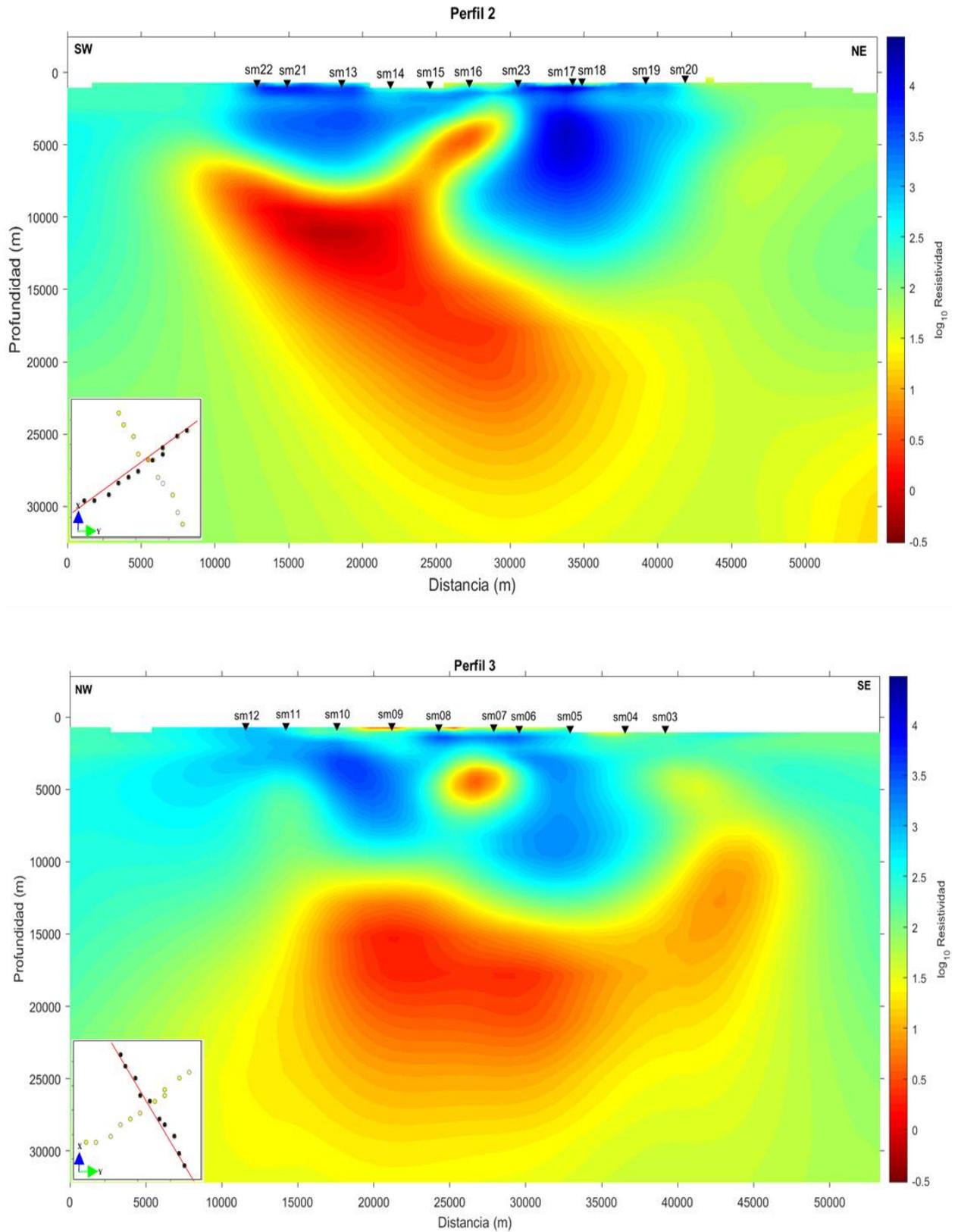
San Miguel (perfiles 2 y 3) se presentan en la Figura 32, donde se observa una vista 2D que permite apreciar la distribución de resistividades en profundidad de los dos perfiles.



**Figura 30.** (a) Curvas de resistividad aparente y fase del tensor completo de impedancias para los sitios sm13 y sm14 del perfil 2. (b) Curvas de ajustes del tipper para los sitios sm13 y sm14. Los círculos corresponden a los datos observados en campo, mientras que las líneas continuas muestran los valores estimados a partir de la inversión.



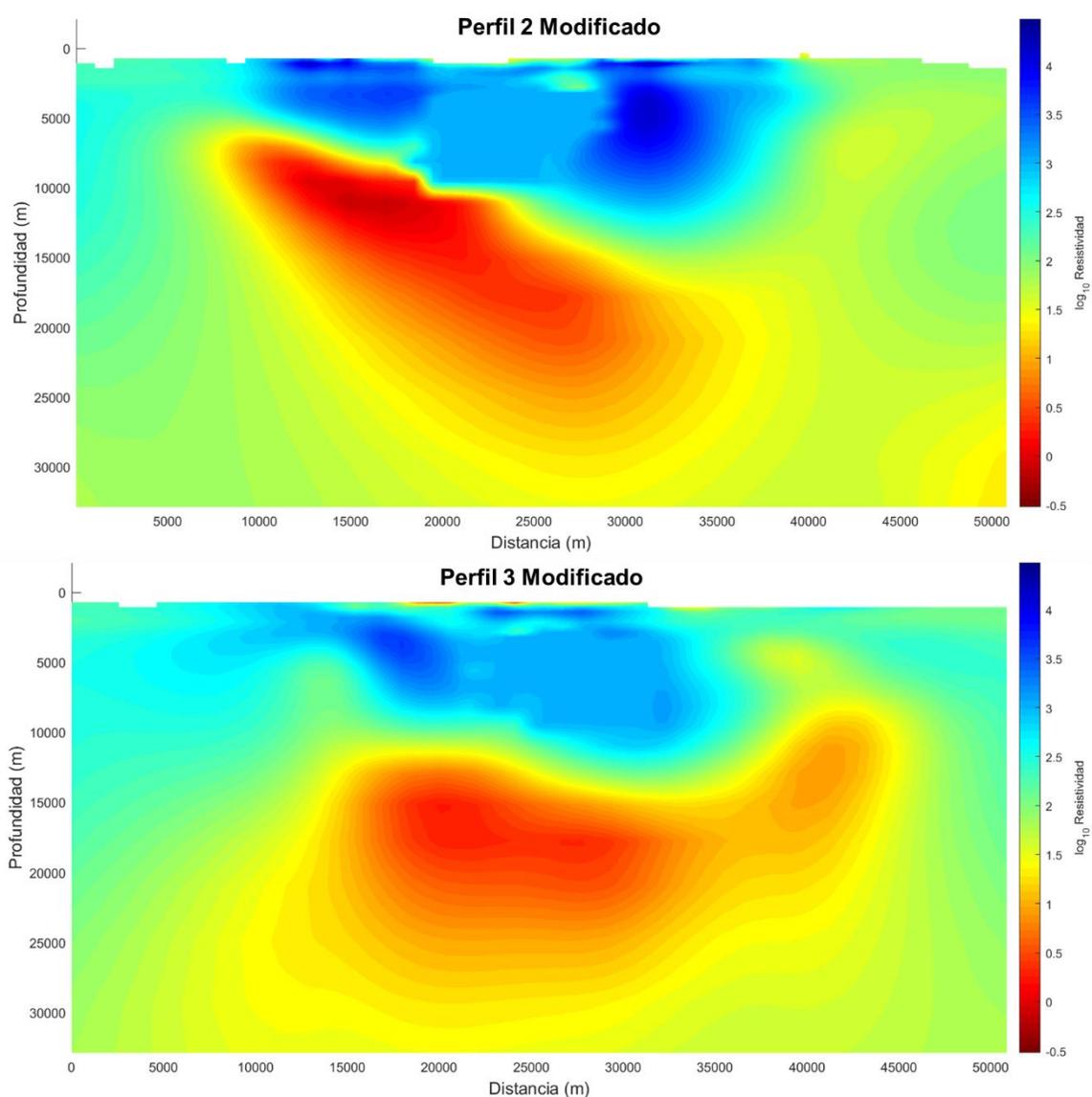
**Figura 31.** (a) Curvas de resistividad aparente y fase del tensor completo de impedancias para los sitios sm08 y sm06 del perfil 3. (b) Curvas de ajustes del tipper para los sitios sm08 y sm06. Los círculos corresponden a los datos observados en campo, mientras que las líneas continuas muestran los valores estimados a partir de la inversión.



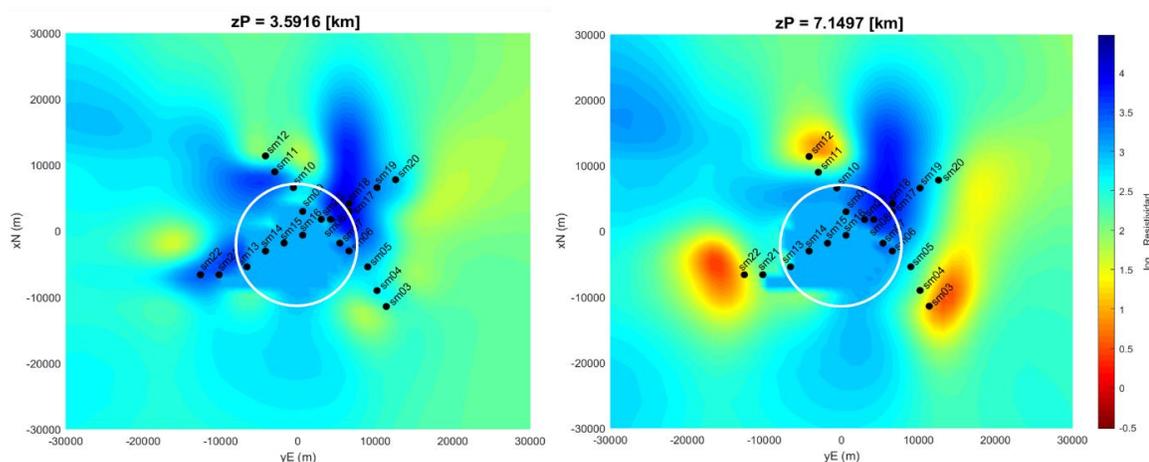
**Figura 32.** Modelos 3D de los perfiles 2 y 3 de San Miguel, con orientaciones SW-NE y NW-SE, respectivamente. Los valores de resistividad ( $\rho$ ) se representan mediante una escala logarítmica. Los sitios MT se muestran como triángulos negros.

### 4.3.2.1 Prueba de Sensibilidad

Se realizó una prueba de sensibilidad en el modelo de San Miguel, que consistió en modificar el cuerpo conductor identificado entre los 2500 m y 7000 m de profundidad, este cuerpo se muestra en la Figura 32. Para esta prueba, se asignó una resistividad de  $1000 \Omega \cdot m$  al cuerpo conductor, esta modificación se pueden observar en la Figura 33 y la Figura 34. Se llevaron a cabo dos experimentos: el primero fue un modelado directo y el segundo una nueva inversión a partir del modelo modificado. En ambos casos, se utilizó el modelo homogéneo inicial de  $100 \Omega \cdot m$ , añadiendo un archivo .prm que contenía las perturbaciones correspondientes al modelo modificado.

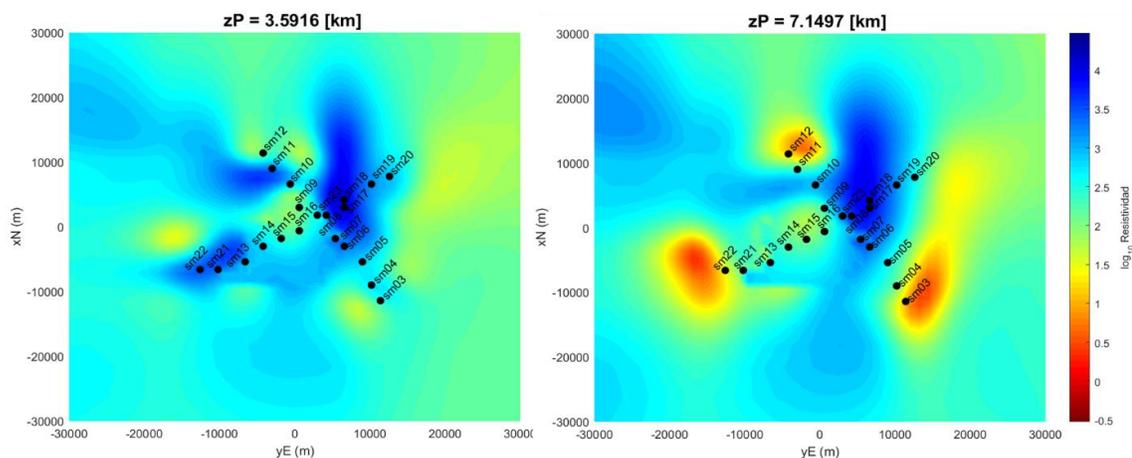


**Figura 33.** Modelo modificado de San Miguel. Se presentan los perfiles 2 y 3, donde el cuerpo conductor, ubicado entre 2500 m y 7000 m de profundidad, fue modificado a un cuerpo resistivo con una resistividad de  $1000 \Omega \cdot m$ .



**Figura 34.** Vista en planta de la modificación del modelo San Miguel, mostrando el cambio del cuerpo conductor ubicado entre 2500 m y 7000 m de profundidad a un cuerpo resistivo con  $1000 \Omega \cdot m$ . Las modificaciones se visualizan a profundidades de  $\sim 3$  km y 7 km, señaladas con un círculo blanco.

En el primer caso, las respuestas obtenidas muestran un ligero desajuste en las curvas en comparación con las de la inversión original; sin embargo, esta diferencia no es significativa. Al revisar el RMS de cada sitio, se observa que el ajuste obtenido con la inversión original es mejor que el del modelado directo del modelo modificado. En el segundo caso, tras realizar la inversión, las curvas resultantes son muy similares a las de la inversión original, aunque el RMS disminuyó a 1.58, lo cual indica un mejor ajuste. El cuerpo conductor se recuperó parcialmente, aunque su resistividad solo llegó a  $100 \Omega \cdot m$  a en vez de recuperar los  $10 \Omega \cdot m$  de la anomalía original (Figura 34). A partir de estas pruebas de sensibilidad, se puede inferir que es necesario que este pequeño cuerpo conductor esté presente en el modelo final, ya que, aunque no se haya recuperado completamente, la resistividad asignada en el modelo modificado se redujo de manera significativa.



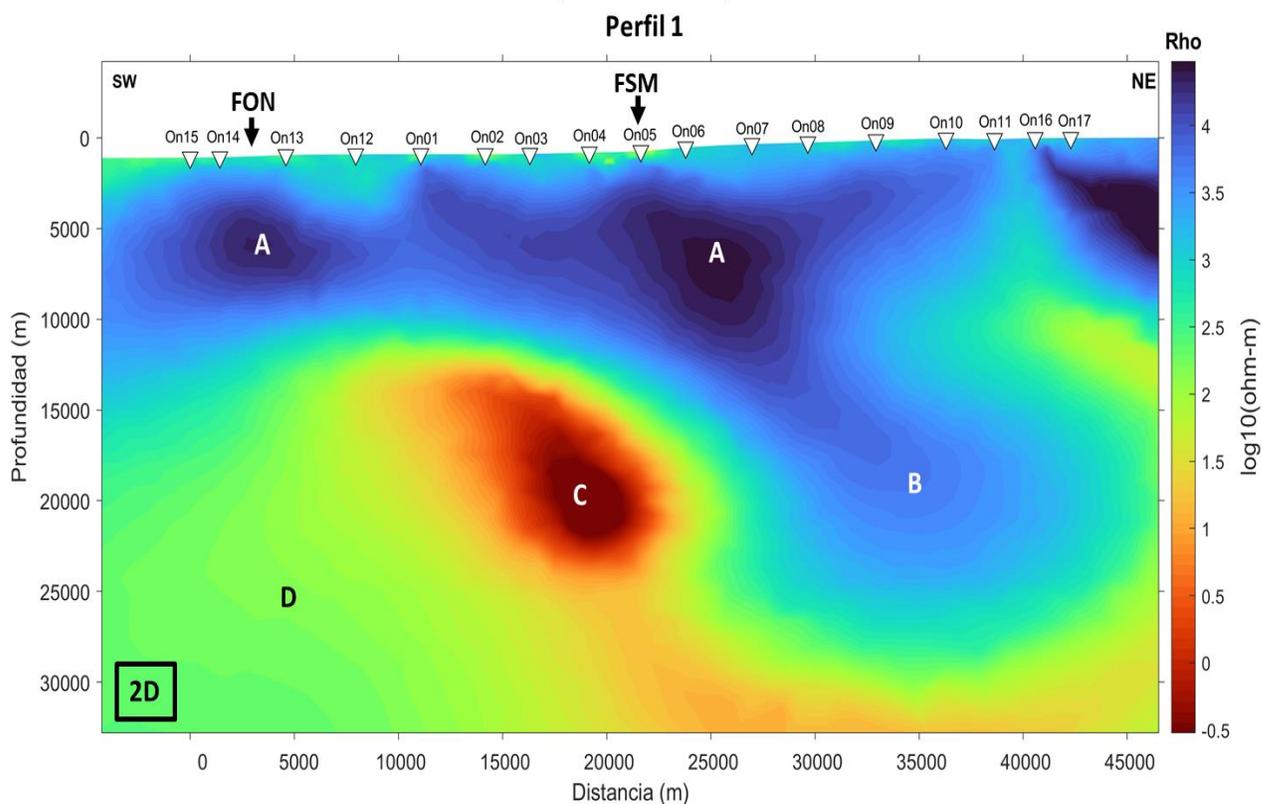
**Figura 35.** Resultado de la inversión del modelo San Miguel, presentado en vista en planta a diferentes profundidades ( $\sim 3$  km y 7 km).

## Capítulo 5. Resultados y Discusión

En este capítulo se presentan los resultados obtenidos de las inversiones 2D y 3D, junto con su correspondiente interpretación e identificación de estructuras, basadas en los valores de resistividad eléctrica de los modelos. Además, se integra la información de sismicidad a los modelos de resistividad para completar el análisis.

### 5.1 Modelos 2D

En la Figura 36 se presenta el modelo interpretado del perfil 1, donde se han identificado diferentes zonas tanto conductoras como resistivas. Para facilitar su identificación, a estas zonas se les ha asignado letras. En el perfil 1 se distinguen cuatro zonas principales, de las cuales dos son resistivas y 2 son conductoras. En los primeros 10 km de profundidad del perfil se encuentra la zona A con alta resistividad.



**Figura 36.** Interpretación del modelo 2D del perfil 1 (Ojos Negros) con orientación SW-NE. Se identificaron zonas de diversas resistividades, las cuales fueron etiquetadas con letras del abecedario en orden alfabético. Las fallas a lo largo del perfil están señaladas con flechas negras.

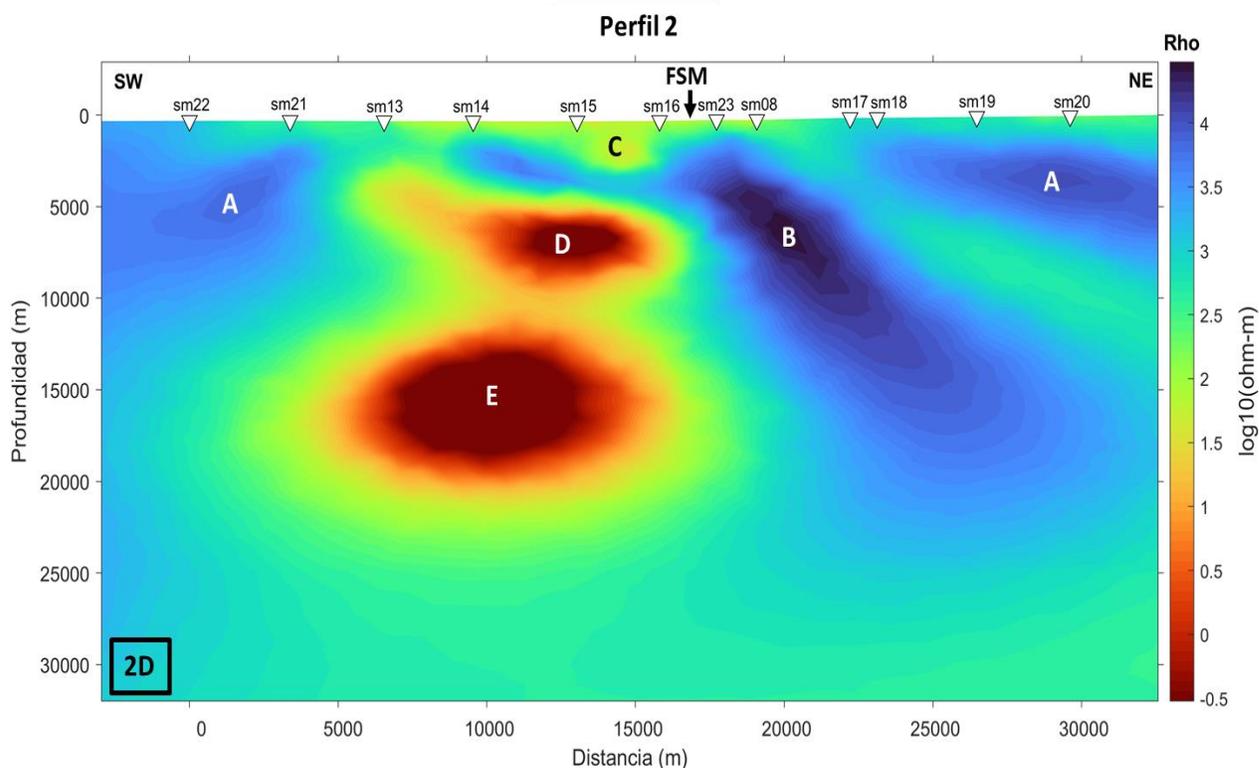
La zona A se extiende desde el sitio On15 hasta On17, con una longitud aproximada de 43 km y valores de resistividad que varían entre  $7,000 \Omega \cdot m$  y  $10,000 \Omega \cdot m$ . Por otro lado, la zona B se localiza entre los sitios On07 y On16, a profundidades de entre 15 km y 25 km. Esta zona se extiende lateralmente hacia el NE con una longitud aproximada de 13 km y un espesor de 10 km, presentando resistividades que oscilan entre  $1,500 \Omega \cdot m$  y  $2,000 \Omega \cdot m$ . También se identificó la zona conductora C, que destaca como el rasgo más sobresaliente del modelo del perfil 1. Esta zona se localiza entre los sitios On02 y On05, a aproximadamente 15 km de profundidad en la parte SW del perfil. La zona C tiene un espesor de 8 km, y una longitud de 6 km, con resistividades que varían entre  $0.3 \Omega \cdot m$  a  $0.6 \Omega \cdot m$ . Cabe mencionar que en el extremo SW se encuentra la zona D, que es menos conductora y presenta resistividades cercanas a los  $100 \Omega \cdot m$ .

Basado en el mapa geológico (Figura 3), también se indica la ubicación de la Falla Ojos Negros (FON), localizada entre los sitios On14 y On13, y la Falla San Miguel (FSM), ubicada en el sitio On05. Estas fallas se indican con flechas negras en la Figura 36.

La zona A, que presenta altas resistividades ( $>7000 \Omega \cdot m$ ) en el modelo, se asocia con rocas granitoides del Cinturón Batolítico Peninsular. Se infiere que estas rocas son secas ya que las altas resistividades reflejan ausencia de fluidos en materiales geológicos no fracturados. En contraste, la zona D con resistividades cercanas a  $100 \Omega \cdot m$  podría estar relacionada con rocas meta-sedimentarias prebatolíticas fracturadas y húmedas. La fracturación y la humedad en las rocas meta-sedimentarias provocan una disminución significativa en los valores de resistividad.

Por otro lado, la zona C, que presenta una alta conductividad ( $<1 \Omega \cdot m$ ), también puede asociarse con rocas meta-sedimentarias (metamórficas). Con base en sus valores de resistividad, se puede inferir la posible presencia de un alto contenido de fluidos atrapados en la base de la interfaz frágil-dúctil (Lin et al., 2023), lo que explicaría su bajo nivel de resistividad. Finalmente, la zona B identificada en el modelo no ha sido asociado a ninguna formación rocosa específica, ya que su interpretación será discutida en el contexto del perfil obtenido del modelo 3D. Cabe destacar que ambos modelos, el 2D y 3D, presentan algunas diferencias en la representación de esta zona.

La Figura 37 presenta la interpretación del modelo del perfil 2 (San Miguel), donde se destacan diferentes zonas con variaciones significativas en su resistividad. En este perfil, se han identificado cinco zonas principales: dos resistivas y tres conductoras.



**Figura 37.** Interpretación del modelo 2D del perfil 2 (San Miguel) con orientación SW-NE. Se identificaron zonas de diversas resistividades, las cuales fueron etiquetadas con letras del abecedario en orden alfabético. Las fallas a lo largo del perfil están señaladas con flechas negras.

En la parte más somera del modelo, justo debajo de los sitios sm13 y sm08, se observa la zona conductora C con resistividades cercanas a  $100 \Omega \cdot m$ , extendiéndose hasta 1 km de profundidad y 2 km debajo de los sitios sm15 y sm16. En el sector SW del modelo, se identificó la zona A, ubicada debajo de los sitios sm22 y sm21, extendiéndose hasta los 8 km de profundidad, con una longitud de aproximadamente 3 km y resistividades que oscilan entre  $1,500$  y  $2,000 \Omega \cdot m$ . Por otra parte, en el extremo NE del perfil, entre los sitios sm19 y sm20, se identificó otra parte de la zona A, que se extiende hasta los primeros 8 km de profundidad, con una longitud de 3 km y resistividades similares a las de la parte SW

Entre los sitios sm23 y sm18 se encuentra la zona B, que se extiende hacia el NE, con una longitud aproximada de 6km, ubicado entre los 3 km y 14 km de profundidad, presentado resistividades de alrededor de  $10,000 \Omega \cdot m$ . También se identificaron las zonas conductoras D y E, que presentan una alta conductividad, con resistividades que oscilan entre los  $0.3 \Omega \cdot m$  a  $0.6 \Omega \cdot m$ . La zona D se localiza entre los sitios sm14 y sm16, a profundidades de 5 km a 8 km, con un espesor de 3 km y una longitud de 3 km. Por otra parte, la zona E, se ubica entre los 12 y 20 km de profundidad, con un espesor de 8 km y una extensión lateral de 9 km, desde los sitios sm13 hasta sm16. Con base en el mapa geológico (Figura 3), se indica la

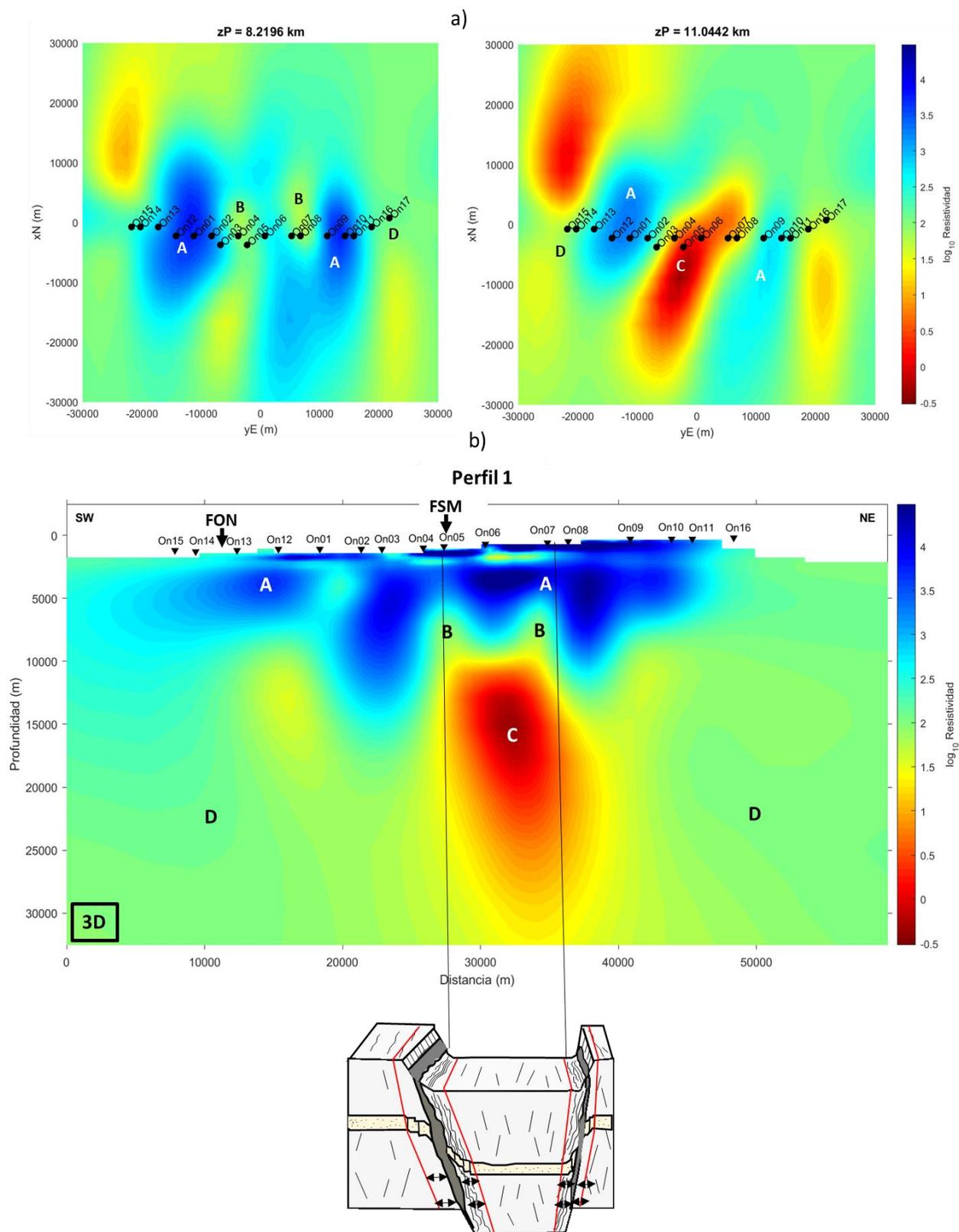
ubicación de la Falla San Miguel (FSM), que atraviesa entre los sitios sm16 y sm23, y está marcada con una flecha negra en la Figura 37.

Las zonas A y B se asocian con rocas granitoides, siendo la zona B más rica en sílice ( $\text{SiO}_2$ ), lo que contribuye a su alta resistividad. En contraste, la zona conductora C se relaciona con sedimentos de rocas metamórficas con presencia de fracturas y humedad. Las zonas D y E, por su parte, parecen compartir una composición similar, asociada a rocas prebatolíticas meta-sedimentarias con un alto contenido de fluidos, lo cual provoca una disminución significativa en sus valores de resistividad.

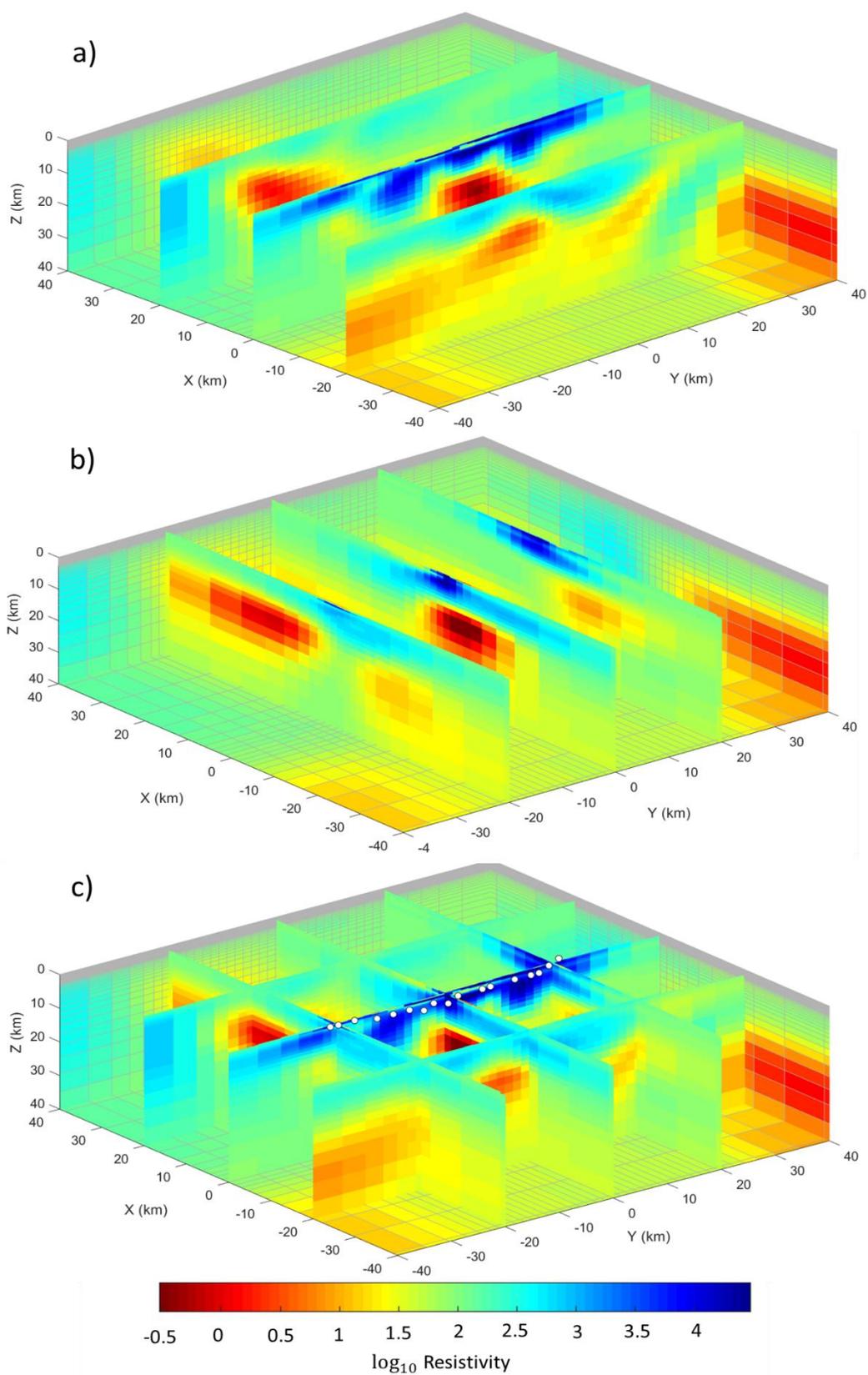
## 5.2 Modelos 3D

La Figura 38 muestra la interpretación del perfil 1 del modelo 3D de Ojos Negros, incluyendo vistas en planta a profundidades de 8km y 11 km, así como una sección en profundidad. Se destacan cuatro zonas principales: una resistiva y tres conductoras. En los primeros 10 km se encuentra la zona resistiva A, con resistividades de alrededor de  $10,000 \Omega \cdot m$ . Esta zona se extiende a lo largo de todo el perfil, debajo de los sitios MT, con un espesor que varía entre 5 km a 8 km debido a la topografía y tiene una longitud aproximada de 43 km. También se identifica la zona D, de conductividad moderada ( $\sim 100 \Omega \cdot m$ ), que rodea a la zona C, la cual es altamente conductora, con resistividades que varían entre  $0.5 \Omega \cdot m$  y  $10 \Omega \cdot m$ . La zona C se localiza entre los sitios On04 y On08, a profundidades de entre 12 y 30 km, con un espesor de 10 km y se extiende lateralmente 10 km. Encima de la zona C, se encuentra la zona B, con un espesor de 1 o 2 km, y presenta resistividades cercana a  $50 \Omega \cdot m$ . Al igual que en la Figura 36, se indican las fallas Ojos Negros y San Miguel con flechas negras.

La zona A está compuesta por rocas granitoides del Cinturón Batolítico Peninsular (CBP), un conjunto de rocas ígneas plutónicas. Dado sus elevados valores de resistividad ( $\sim 10,000 \Omega \cdot m$ ), se infiere que estas rocas son ricas en sílice ( $\text{SiO}_2$ ), un mineral altamente resistivo que no es buen conductor eléctrico. En contraste, la zona B se asocia con una zona de cizalla que contiene minerales metamórficos hidrotermales y arcillas, lo que explica sus resistividades más bajas ( $\sim 50 \Omega \cdot m$ ). La zona C, que es aún más conductora, se interpreta como el núcleo cizallado de la Falla San Miguel, donde la presencia de fluidos podría ser responsable de su mayor conductividad. Finalmente, la zona D, que cubre a la zona C, se puede relacionar con rocas metamórficas de la Formación Santiago Peak-Complejo Bedford, que actúan como rocas encajonantes de los plutones, según se infiere por sus valores de resistividad.



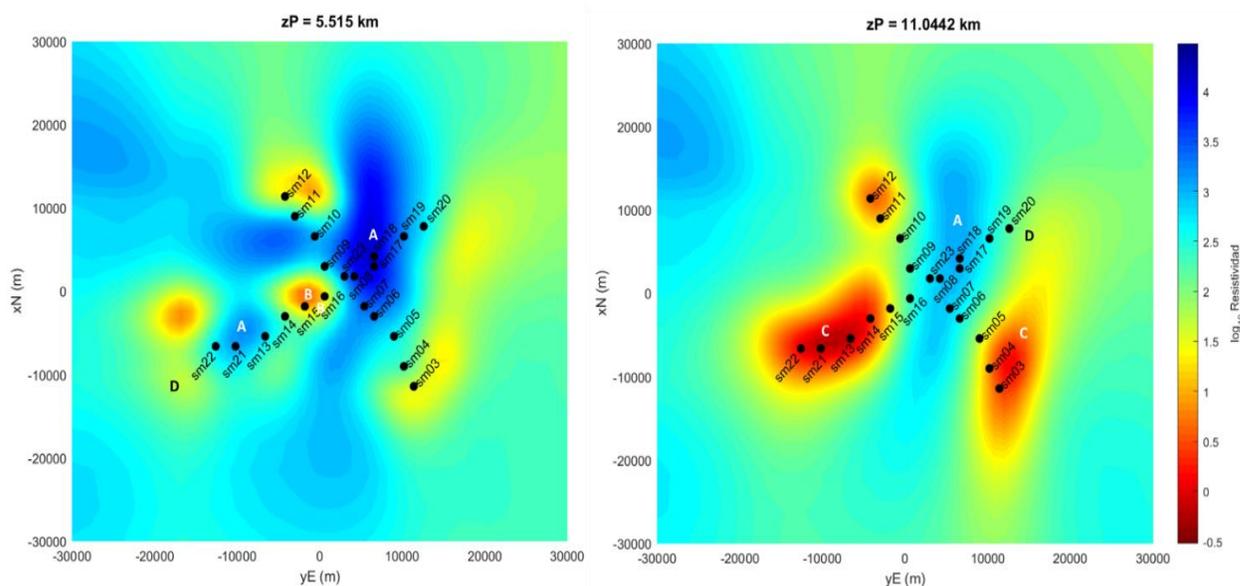
**Figura 38.** Interpretación del modelo 3D del perfil 1 (Ojos Negros). (a) Vista en planta a profundidades de 8 km y 11 km. (b) Sección del perfil 1 de Ojos Negros en profundidad, con orientación SW-NE. Se identificaron zonas con diversas resistividades, etiquetadas alfabéticamente. Las fallas a lo largo del perfil están indicadas con flechas negras, y las líneas negras señalan la zona de cizalla inferida asociada a la Falla San Miguel.



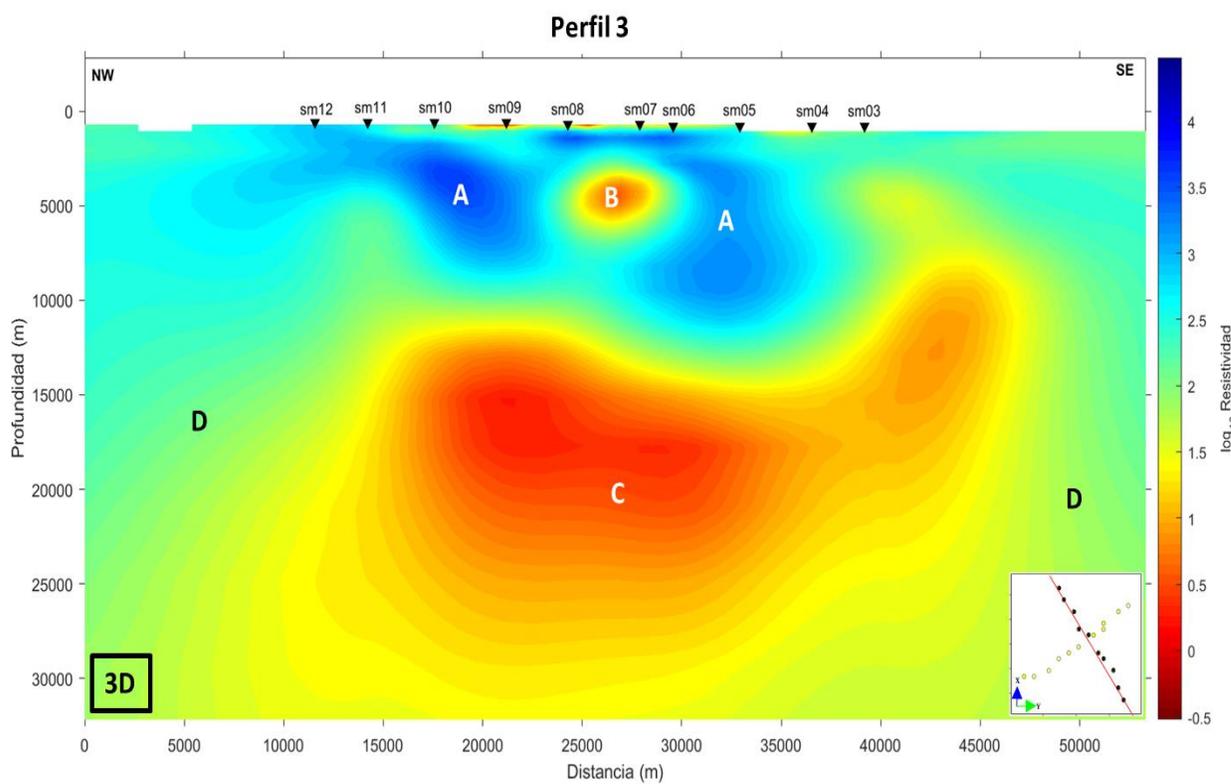
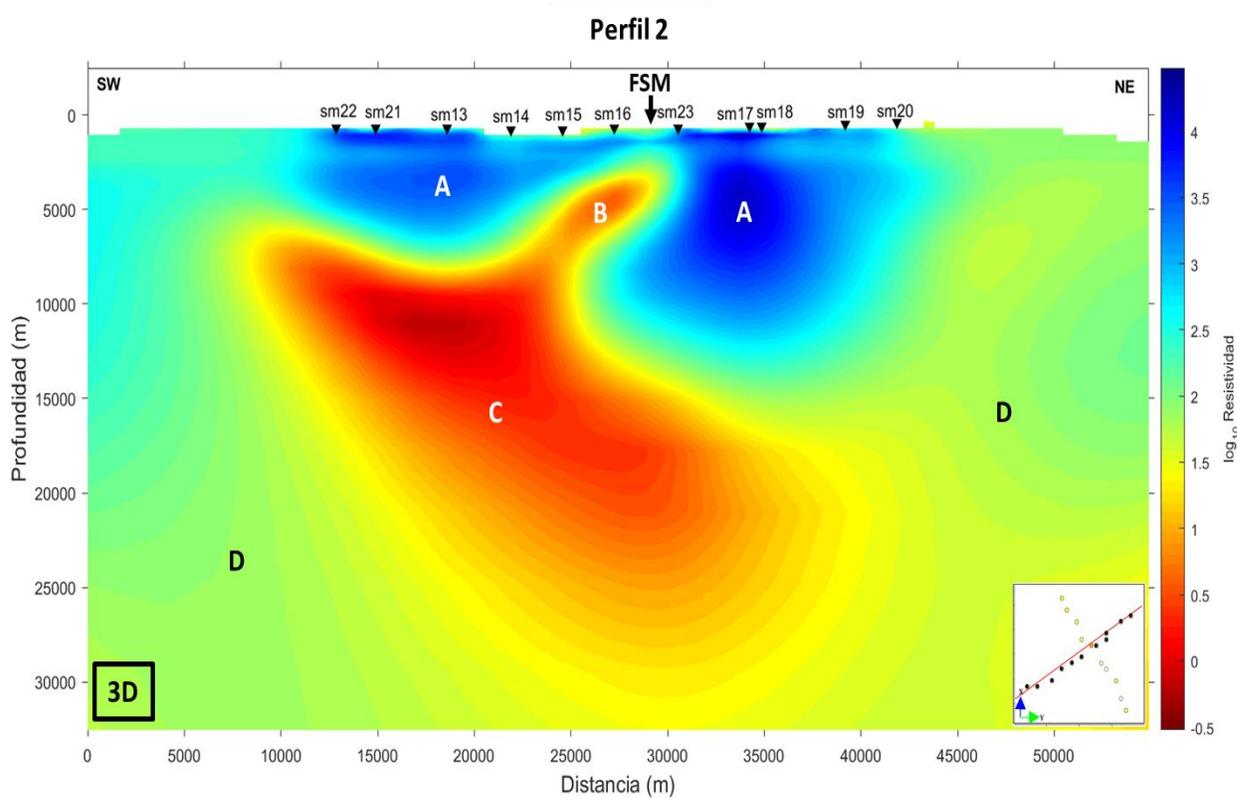
**Figura 39.** Cortes de secciones del modelo 3D de Ojos Negros. (a) Secciones en la dirección X, espaciadas cada 10 km. (b) Secciones en la dirección Y, espaciadas cada 10 km. (c) Superposición de los cortes en las direcciones X y Y, con una profundidad máxima de 40 km.

En la Figura 39 se pueden observar cortes de secciones en las direcciones X y Y, así como su traslape. Se observa que, justo debajo de los sitios, se encuentra una zona altamente resistiva. A medida que se profundiza, aparece una zona más conductora, rodeada por áreas con resistividades moderadas. Uno de los hallazgos más significativos al comparar los modelos 2D y 3D es la discrepancia observada en la caracterización de la zona conductora C. Mientras que en el modelo 2D esta zona aparece como resistiva, el modelo 3D revela que, en realidad, se trata de una región altamente conductora, con resistividades de entre  $0.5 \Omega \cdot m$  y  $10 \Omega \cdot m$ . Este resultado sugiere que el modelo 2D podría estar simplificando las variaciones tridimensionales del subsuelo, lo que lleva a una interpretación errónea de la distribución de resistividades. Además, el modelo 3D proporciona una representación más detallada y realista de la conductividad en otras zonas del perfil. Por ejemplo, lo que en el modelo 2D se presenta como una región extremadamente conductora, en el 3D se define como una zona de conductividad moderada ( $\sim 100 \Omega \cdot m$ ), lo que permite una interpretación más matizada. Esto indica que el 3D capta mejor las propiedades geoelectricas, posiblemente debido a la mayor capacidad de este modelo para incorporar la complejidad estructural del subsuelo, como cambios laterales y verticales en las resistividades, que el modelo 2D no logra capturar con la misma precisión. Posiblemente la inclusión de la topografía 3D, aunque sea muy aproximada, es otro factor que influye significativamente en el modelo resultante.

Para el modelo 3D de San Miguel, se presentan vistas en planta a diferentes profundidades (Figura 40), así como secciones interpretadas en profundidad correspondientes al perfil 2 (SW-NE) y perfil 3 (NW-SE) (Figura 41).



**Figura 40.** Vista en planta del modelo San Miguel a profundidades de 8 km y 11 km. Se identificaron zonas de diversas resistividades, etiquetadas con letras del abecedario en orden alfabético.



**Figura 41.** Interpretación de los perfiles 2 y 3 de extraídos del modelo 3D de San Miguel, con orientaciones SW-NE y NW-SE, respectivamente. Se identificaron zonas con diversas resistividades, etiquetadas alfabéticamente. Las fallas a lo largo del perfil están indicadas con flechas negras.

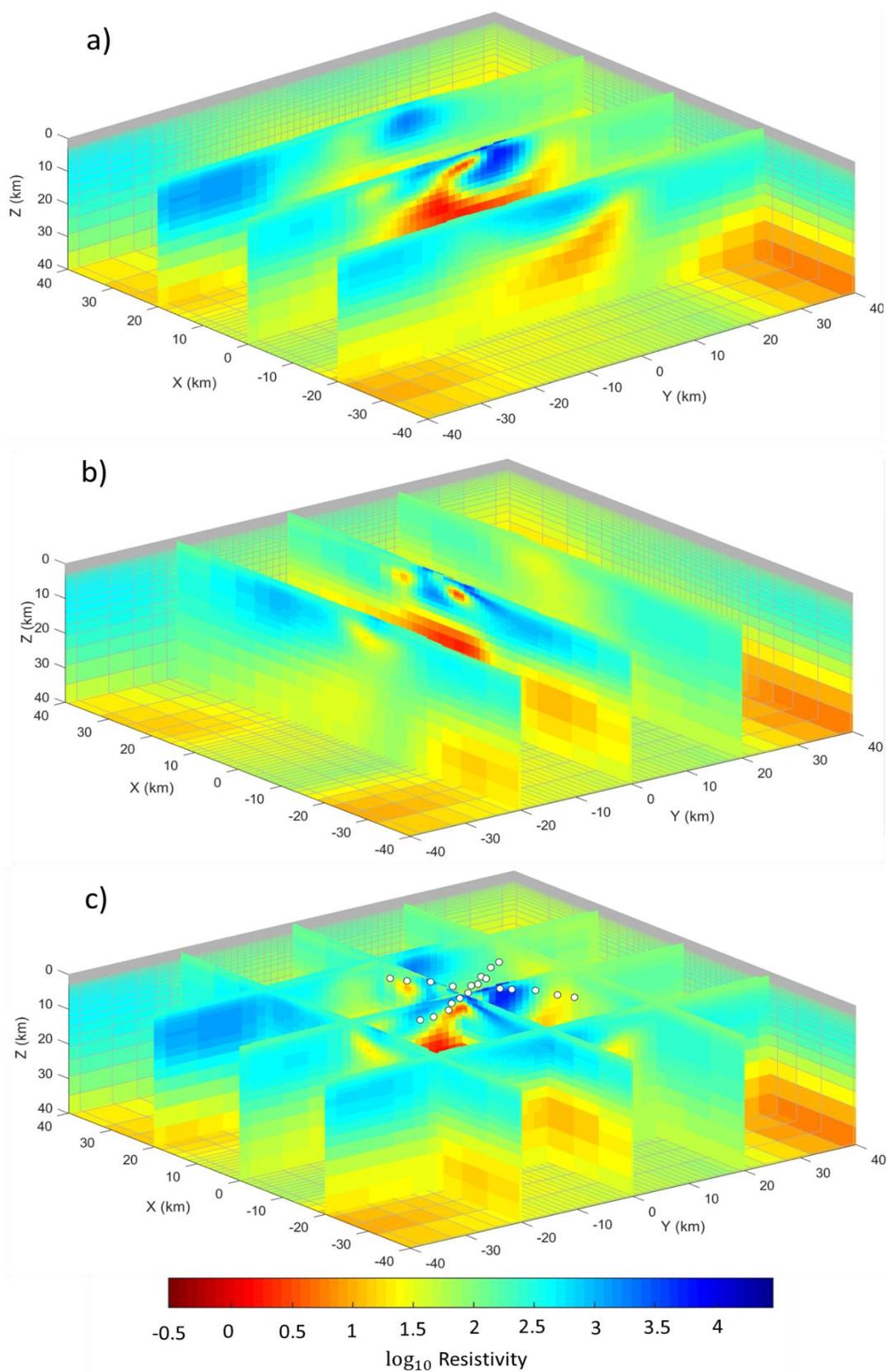
En el perfil 2 se identifican cuatro zonas principales: una resistiva y tres conductoras. La zona A presenta resistividades que oscilan entre  $7,000 \Omega \cdot m$  a  $10,000 \Omega \cdot m$ , y se extiende a lo largo de todo el perfil, alcanzando una profundidad de 5 km en el sector SW y 10 km en el NE.

Por otra parte, la zona conductora B se localiza entre los sitios sm14 y sm23, a una profundidad de 3 km y 7 km, con resistividades entre  $5 \Omega \cdot m$  a  $15 \Omega \cdot m$ . Esta zona B se prolonga desde los 8 km hasta los 25 km de profundidad, denominándose en esta parte como la zona C, se extiende lateralmente a lo largo de todo el perfil, presentando resistividades que varían entre  $0.3 \Omega \cdot m$  a  $5 \Omega \cdot m$ . Finalmente, se identificó la zona D, una zona medianamente conductora que rodea a la zona C, con resistividades de aproximadamente  $100 \Omega \cdot m$ .

En el perfil 3 también se identificaron cuatro zonas principales. La zona A presenta valores de resistividad de  $1,000 \Omega \cdot m$  a  $2,000 \Omega \cdot m$ , extendiéndose lateralmente a lo largo de todo el perfil, con profundidades de entre 8 km y 10 km. La zona B, una zona conductora, se localiza debajo de los sitios sm08 y sm06, a profundidades de entre 3 km y 6 km, con resistividades de  $5 \Omega \cdot m$  a  $15 \Omega \cdot m$ . También se identificó la zona conductora C, que presenta resistividades similares a las de la zona B, se extiende lateralmente a lo largo de todo el perfil. Al igual que en el perfil 2, en el perfil 3 se identifica la zona D, que rodea la zona C, con resistividades de aproximadamente  $100 \Omega \cdot m$ .

La zona A identificada en los perfiles 2 y 3, se asocia con rocas granitoides (rocas ígneas plutónicas) pertenecientes al Cinturón Batolítico Peninsular. Las áreas de resistividad más alta, probablemente reflejan un mayor contenido de sílice en estas rocas. Las zonas B y C se infieren como compuestas por rocas meta-sedimentarias prebatolíticas, posiblemente esquistos, que presentan fracturas y un alto contenido de fluidos. Las bajas resistividades en la zona B están asociadas principalmente a la influencia de la Falla San Miguel (FSM), ya que ésta atraviesa dicha zona. Por otra parte, la zona D también se asocia con rocas meta-sedimentarias, pero con un menor contenido de fluidos, lo que explica sus resistividades más moderadas.

En la Figura 42 se presentan cortes de secciones del modelo 3D de San Miguel en las direcciones X y Y, así como su traslape. Se observa una zona resistiva directamente bajo los sitios, junto con una zona conductora entre los 3 km y 10 km de profundidad, ubicada específicamente en la intersección de los perfiles 2 y 3. A mayor profundidad, se distingue una zona más conductora, extendida a lo largo de los perfiles y rodeada por áreas con resistividades más moderadas.



**Figura 42.** Cortes de secciones del modelo 3D de San Miguel. (a) Secciones en la dirección  $X$ , espaciadas cada 10 km. (b) Secciones en la dirección  $Y$ , espaciadas cada 10 km. (c) Superposición de los cortes en las direcciones  $X$  y  $Y$ , con una profundidad máxima de 40 km.

Los modelos obtenidos a partir de la inversión 2D y 3D de los perfiles de San Miguel, muestran ciertas similitudes, particularmente en el perfil 2, ya que para el perfil 3 no se realizó inversión 2D. Sin embargo, el modelo 3D permite una identificación más precisa de los cambios de resistividad, destacándose en los primeros 10 km, donde se observa claramente una transición de una zona altamente resistiva a una conductora.

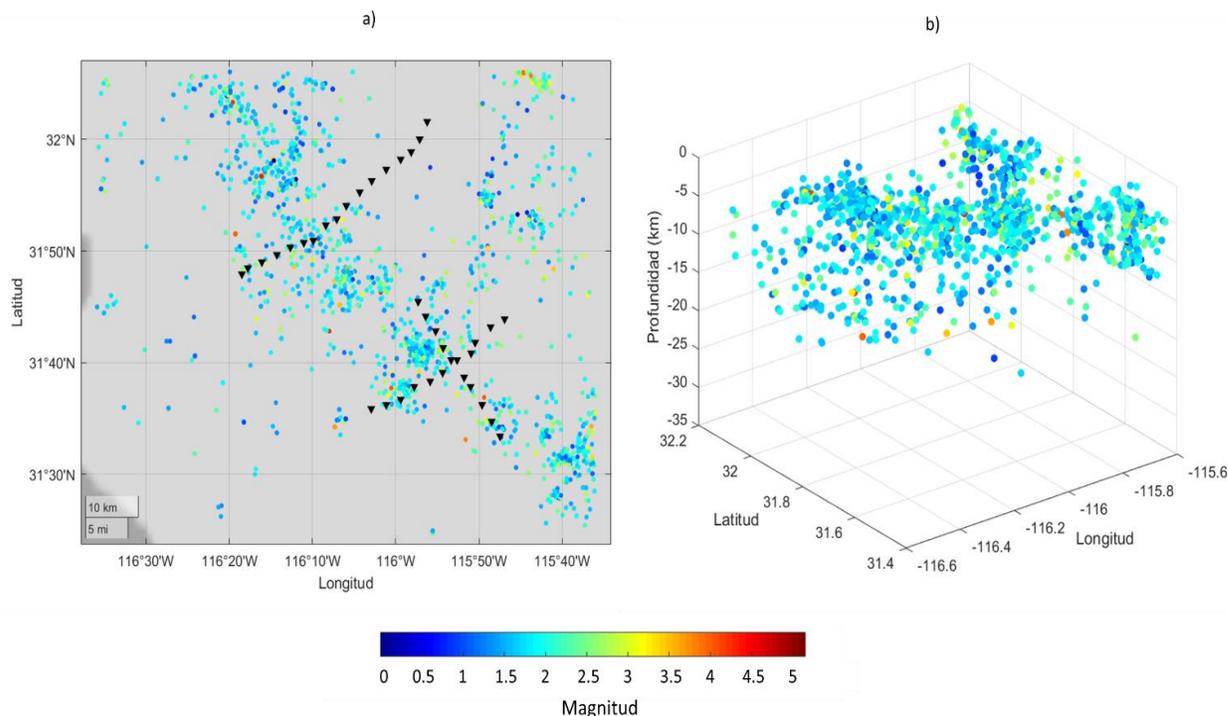
Aunque las zonas conductoras en el modelo 3D están bien definidas, es importante señalar que el espesor de estas zonas no se puede determinar con total certeza. Esto se debe a que, al atravesar zonas conductoras, las ondas electromagnéticas tienden a disiparse, lo que provoca una pérdida de resolución a mayores profundidades. A pesar de esta limitación, el modelo 3D sigue ofreciendo una representación detallada de las variaciones de resistividad en el subsuelo.

En comparación, el modelo 2D, aunque logra identificar dos zonas conductoras, permite una interpretación menos precisa. En este modelo, las zonas conductoras aparecen rodeadas por áreas altamente resistivas, lo que simplifica la complejidad geológica del subsuelo. Sin embargo el modelo 3D ofrece una visión más detallada y equilibrada, en él se observa que la zona conductora más profunda está rodeada por una región de resistividades moderadas, mientras que la zona conductora más somera está rodeada por una región más resistiva.

## **5.3 Integración de eventos sísmicos**

### **5.3.1 Datos de sismicidad**

Los datos sísmicos empleados comprenden los sismos registrados en la Red Sismológica del Noroeste de México (RESNOM) durante el período de 2010 a 2020. En la Figura 4, se muestra la distribución de la sismicidad en el área de estudio, donde se observa una alta microsismicidad. Estos sismos fueron seleccionados mediante un proceso de depuración que garantizó la inclusión de eventos con mayor calidad en cuanto al cálculo de profundidad. Los criterios de depuración incluyeron la eliminación de sismos con un valor de RMS de 0, aquellos con magnitudes menores de 1, eventos con profundidades inferiores a 1 km, y aquellos que presentaban un valor azimutal elevado del GAP, el cual representa la separación azimutal máxima entre estaciones observadas desde el epicentro del evento. La Figura 43 presenta la distribución de los sismos depurados en la zona de estudio y su variación según la profundidad.

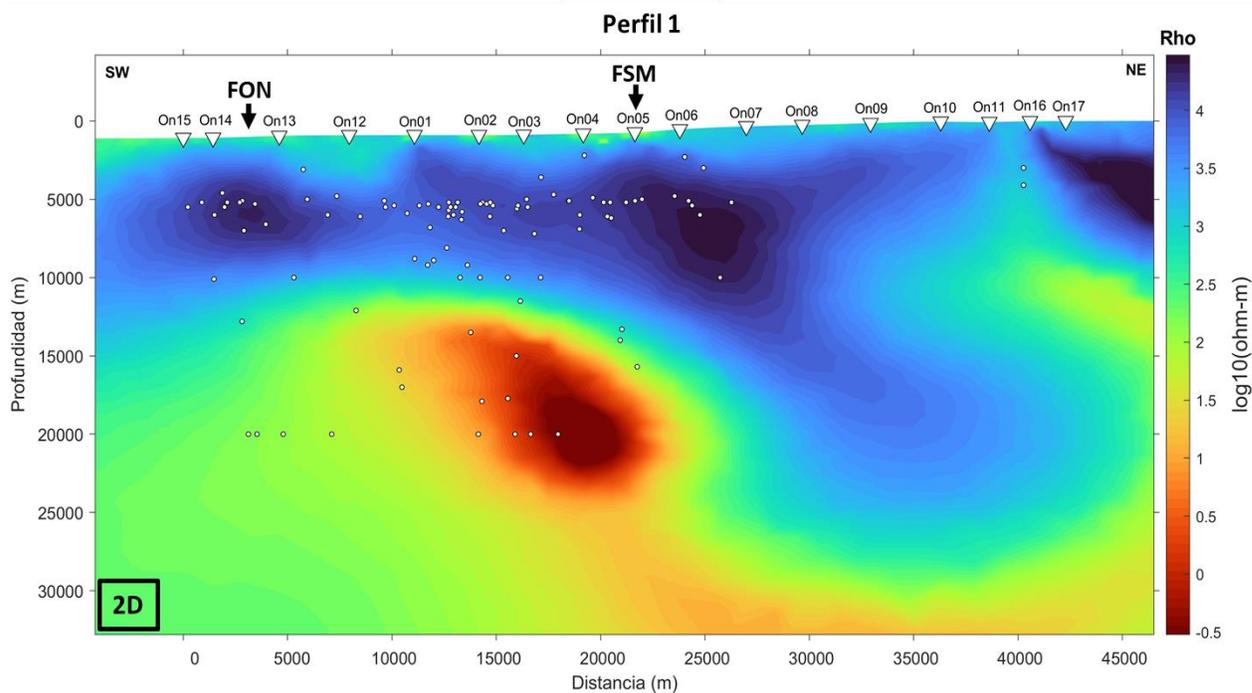


**Figura 43.** Sismos depurados. (a) Mapa de distribución de sismos con los tres perfiles MT. (b) Distribución de sismos en función de su profundidad. Los colores de los sismos representan su magnitud.

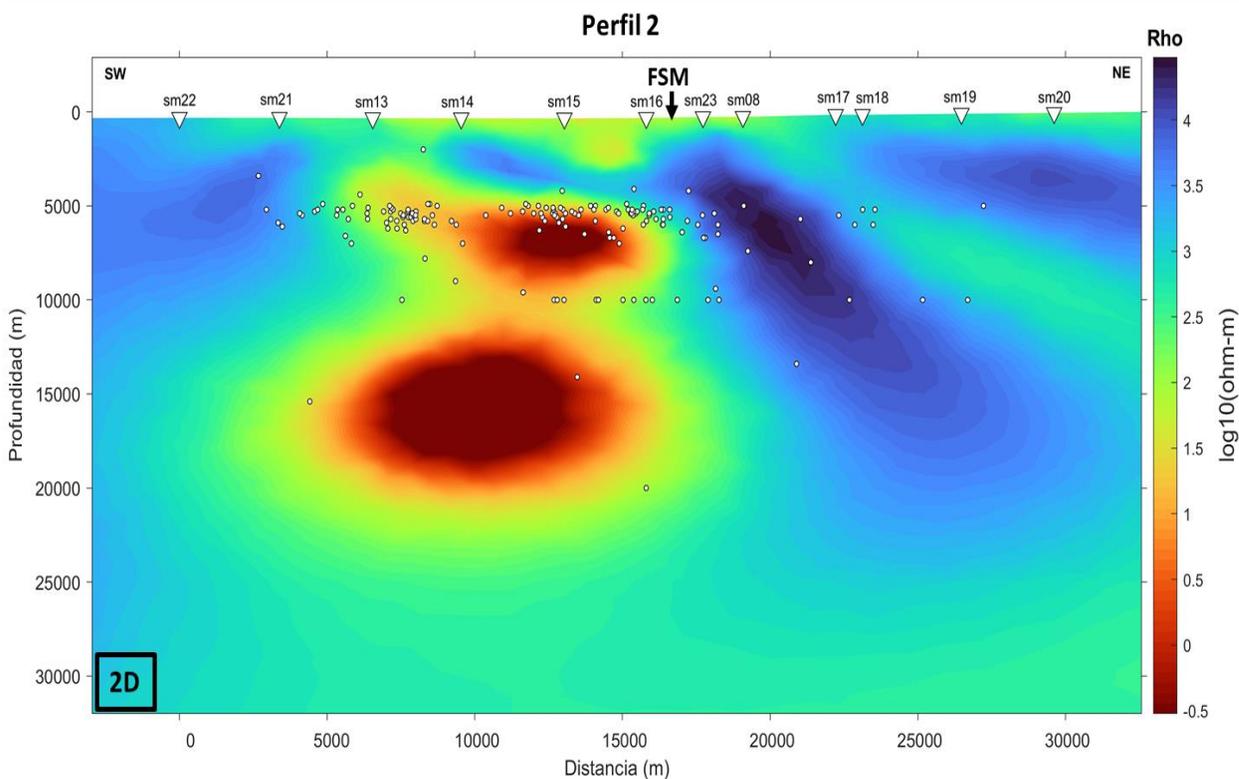
### 5.3.2 Integración de sismicidad en modelos 2D

La Figura 44 presenta el modelo 2D del perfil 1 con la sismicidad integrada. Los sismos considerados abarcan un rango de  $\pm 5$  km alrededor del perfil, sumando un total de 103 eventos. La distribución de la sismicidad se concentra principalmente entre la Falla Ojos Negros y la Falla San Miguel, con la mayoría de los eventos ocurriendo entre profundidades de 5 y 10 km. La sismicidad disminuye significativamente por debajo de los 10 km. Estos sismos se localizan en su mayoría en la zona resistiva y en el límite entre una zona conductora y una zona resistiva.

Por otra parte, la Figura 45 muestra el modelo 2D del perfil 2, también con la sismicidad integrada en un rango similar al del perfil 1, observándose un total de 171 eventos sísmicos. En este perfil, la mayor parte de la actividad sísmica se concentra entre los 5 y 10 km de profundidad, con escasa sismicidad a profundidades mayores a 10 km. La distribución de los sismos en el perfil 2 se ubica principalmente en el límite entre una zona conductora y una zona resistiva, así como en zonas de resistividad moderada. A diferencia de la distribución del perfil 1, en este perfil los sismos rodean a la zona conductora y no caen dentro de esta.



**Figura 44.** Integración de datos sísmicos en el modelo 2D del perfil 1 (Ojos Negros), con orientación SW-NE. Los sísmos se indican con cirulos blancos. Las fallas a lo largo del perfil se señalan con flechas negras.



**Figura 45.** Integración de datos sísmicos en el modelo 2D del perfil 2 (San Miguel), con orientación SW-NE. Los sísmos se indican con cirulos blancos. Las fallas a lo largo del perfil se señalan con flechas negras.

### 5.3.3 Integración de sismicidad en modelos 3D

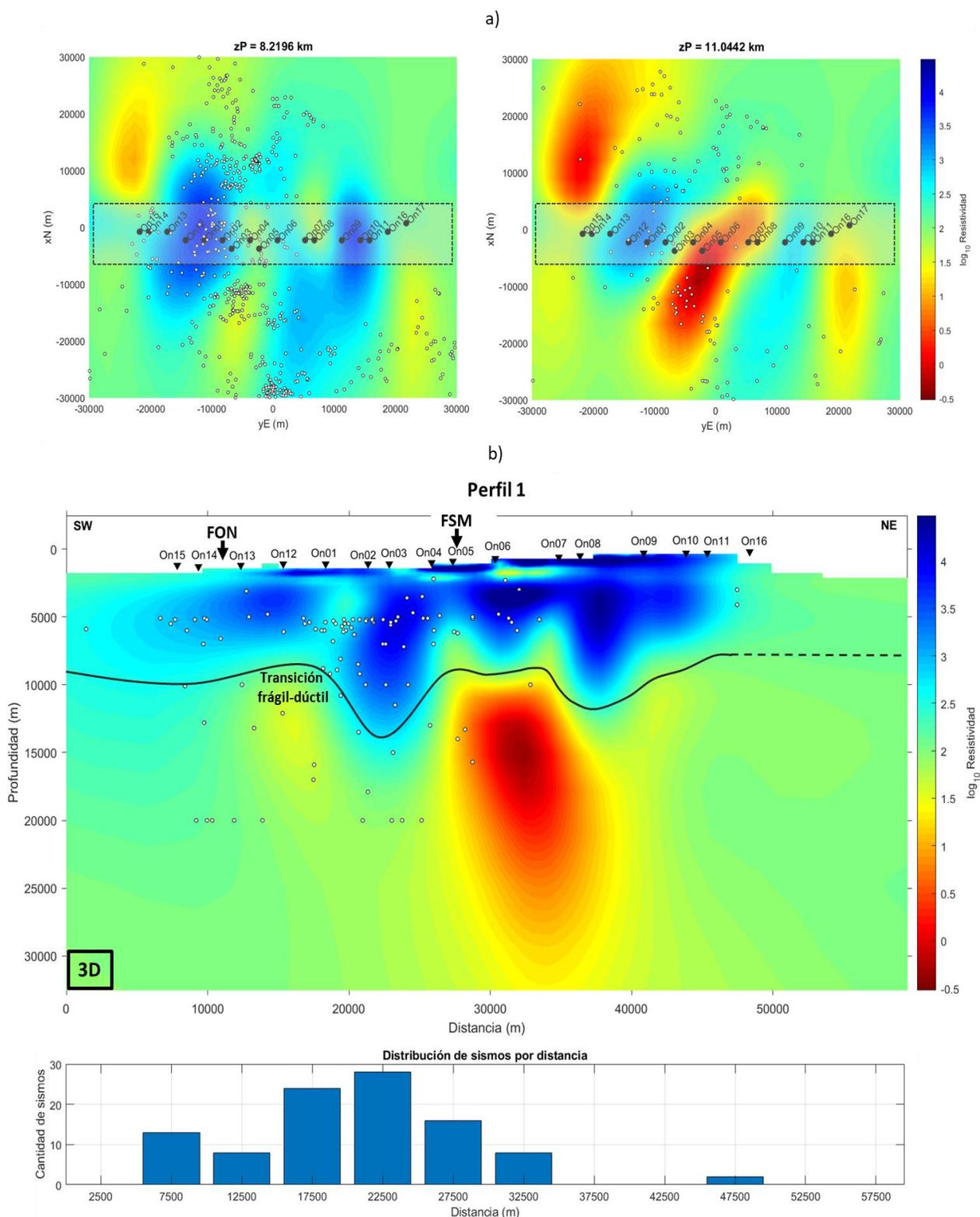
La Figura 46 muestra la distribución de sismicidad en vista en planta a 8 y 15 km de profundidad, así como la sismicidad integrada en la sección a profundidad. Al igual que en los modelos 2D, se consideró un rango de  $\pm 5$  km alrededor del perfil, observándose un total de 147 eventos sísmicos. A los 8 km en la vista en planta se observa que la sismicidad se concentra en el límite entre una zona conductora y una zona resistiva, así como en zonas de resistividad moderada, y muy pocos sismos caen en zonas resistivas. A los 15 km, la actividad sísmica disminuye considerablemente.

Por otra parte, en la sección a profundidad, la sismicidad se concentra principalmente entre los 5 y 10 km de profundidad, en el área comprendida entre la Falla Ojos Negros y Falla San Miguel. Aunque no se distingue con claridad un patrón específico que indique zonas de mayor concentración sísmica, es notable que los sismos no se ubican dentro de las zonas conductoras, manteniéndose en áreas adyacentes de resistividad moderada o alta.

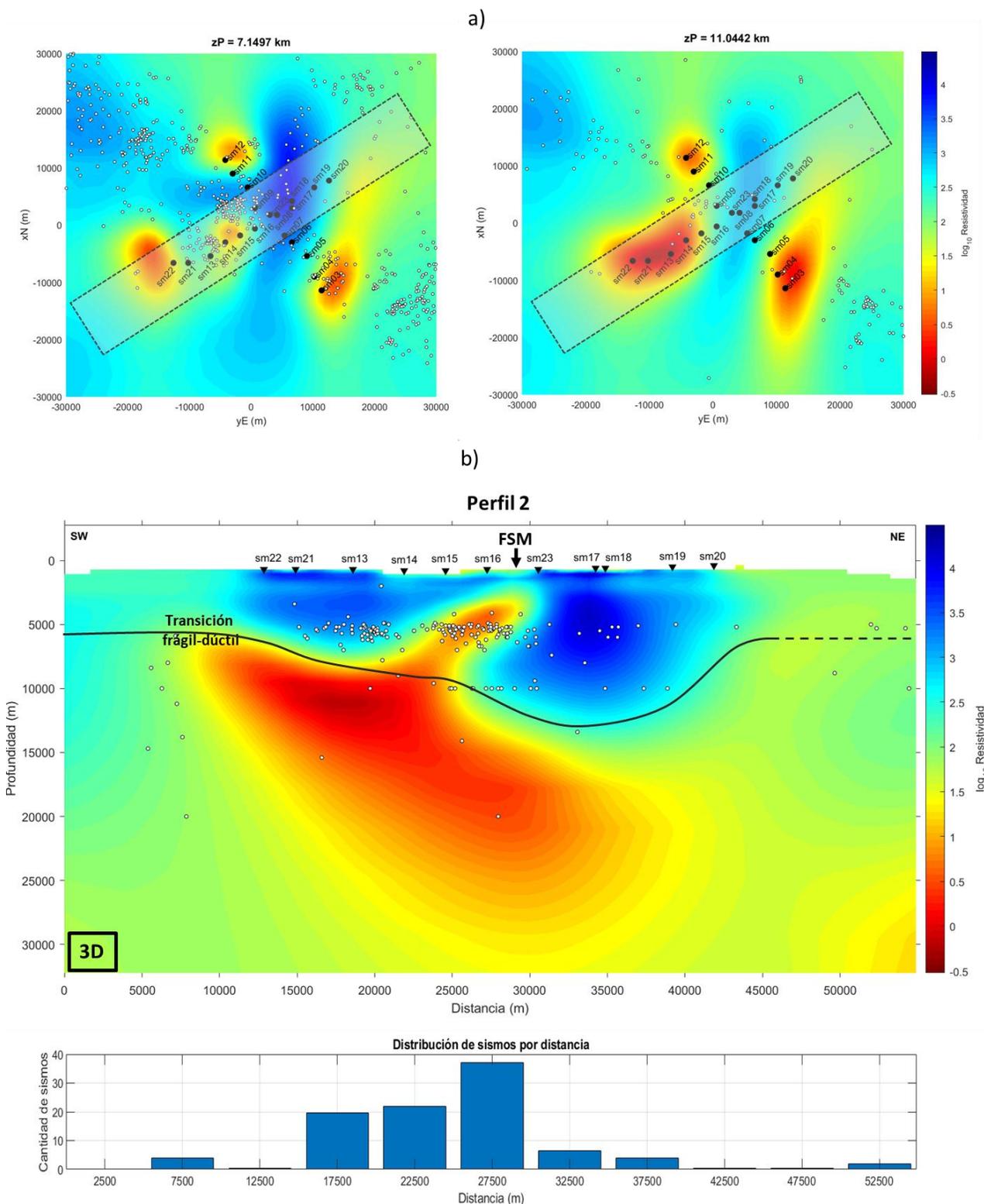
En el caso del modelo San Miguel (perfil 2 y 3), se presentan vistas en planta a profundidades de 7 y 11 km, así como secciones a profundidad de cada perfil con la sismicidad integrada en un rango de  $\pm 5$  km alrededor del perfil. La Figura 47 y Figura 48 muestran la vista en planta y destacan con un recuadro punteado negro las áreas donde se integraron los sismos en las secciones a profundidad de los perfiles 2 y 3. En la vista en planta, la sismicidad se concentra en el límite entre zonas conductoras y resistivas.

En la sección a profundidad del perfil 2, que incluye 205 sismos, se observa una tendencia similar a la de la vista en planta, con la particularidad de que los sismos rodean la gran zona conductora. Por otra parte, en la sección a profundidad del perfil 3 se identifican 302 eventos sísmicos, que también tienden a rodear la zona conductas, concentrándose en los límites entre áreas conductoras y resistivas, con muy pocos eventos dentro de las zonas resistivas. En ambos perfiles, la mayor concentración de sismicidad ocurre entre los 5 y 10 km de profundidad.

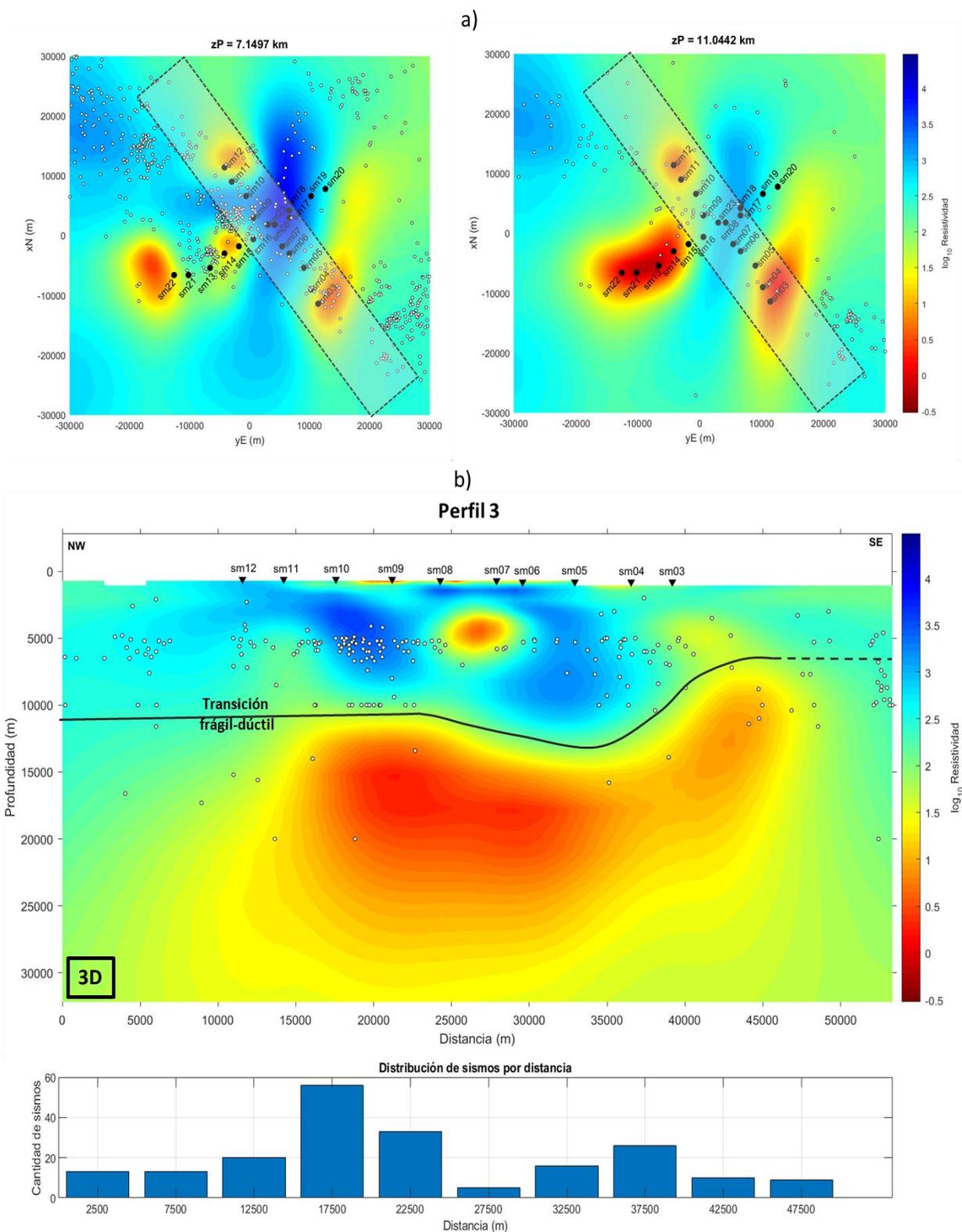
Con base en la sismicidad integrada en los tres perfiles, se observa que los sismos tienden a concentrarse en los límites entre zonas resistivas y conductoras, así como en zonas de resistividad moderada y esporádicamente en zonas resistivas. En todos los perfiles, la mayoría de los sismos se localizan entre 5 km y 10 km de profundidad, lo que sugiere que la interfaz dúctil-frágil de la corteza se encuentra alrededor de los 10 km.



**Figura 46.** Integración de la sismicidad en el modelo 3D del perfil 1 (Ojos Negros). (a) Vista en planta a profundidades de 8 km y 15 km, donde se muestra la sismicidad integrada en el dominio del modelo. Las áreas de sismos incluidas en la sección a profundidad del perfil ( $\pm 5$  km) están delimitadas por cuadros con líneas punteadas negras. (b) Sección en profundidad del perfil 1 de Ojos Negros, con orientación SW-NE, con la sismicidad integrada. Se incluye además un gráfico de barras que muestra la cantidad de sismos en intervalos de 2500 m de distancia a lo largo del perfil. Las fallas están indicadas con flechas negras.



**Figura 47.** Integración de la sismicidad en el modelo 3D del perfil 2 (San Miguel). (a) Vista en planta a profundidades de 7 km y 11 km, donde se muestra la sismicidad integrada en el dominio del modelo. Las áreas de sismos incluidas en la sección a profundidad del perfil ( $\pm 5$  km) están delimitadas por cuadros con líneas punteadas negras. (b) Sección en profundidad del perfil 2 de San Miguel, con orientación SW-NE, con la sismicidad integrada. Se incluye además un gráfico de barras que muestra la cantidad de sismos en intervalos de 2500 m de distancia a lo largo del perfil. Las fallas están indicadas con flechas negras.



**Figura 48.** Integración de la sismicidad en el modelo 3D del perfil 3 (San Miguel). (a) Vista en planta a profundidades de 7 km y 11 km, donde se muestra la sismicidad integrada en el dominio del modelo. Las áreas de sismos incluidas en la sección a profundidad del perfil ( $\pm 5$  km) están delimitadas por cuadros con líneas punteadas negras. (b) Sección en profundidad del perfil 3 de San Miguel, con orientación NW-SE, con la sismicidad integrada. Se incluye además un gráfico de barras que muestra la cantidad de sismos en intervalos de 2500 m de distancia a lo largo del perfil.

## 5.4 Relación entre la sismicidad y la conductividad eléctrica

Diversos estudios han explorado la relación entre la conductividad eléctrica de las rocas y la sismicidad, identificando factores que pueden incrementar la conductividad en ciertas zonas de la corteza terrestre. Entre estos factores destaca la presencia de fluidos en zonas de falla y áreas sometidas a deformación tectónica, donde la fracturación de las rocas facilita la acumulación y el movimiento de fluidos, aumentando así la conductividad eléctrica en dichas áreas. Además, ciertos minerales, como el grafito, la pirita y algunos tipos de arcillas, que se encuentran comúnmente en rocas metamórficas o en zonas de deformación tectónica, también contribuyen a la alta conductividad. Otro aspecto relevante es la alteración hidrotermal: en regiones de actividad hidrotermal, como en zonas volcánicas o cerca de fuentes termales, los fluidos calientes alteran las rocas circundantes, generando así zonas conductoras (Hyndman, 1988; Unsworth & Bedrosian, 2004; Becken et al., 2011; Aizawa et al., 2017).

Aizawa et al. (2017) realizaron un estudio sobre la relación entre conductividad eléctrica y sismicidad en Kumamoto, Japón, en el cual asocian una zona conductora con fluidos magmáticos de alta temperatura. Esta región se identifica como una zona dúctil de alta temperatura y se destaca que la mayor parte de la actividad sísmica ocurre en áreas donde hay interacción entre zonas conductoras y resistivas. De manera similar, Unsworth et al. (1997) mencionan que en un sector de la Falla de San Andrés, la generación de sismos está estrechamente relacionada con la penetración de fluidos en la falla, ocurriendo en el límite entre una zona resistiva y una zona conductora. En otro estudio, Unsworth & Bedrosian (2004) asocian las zonas conductoras principalmente con la presencia de fluidos en las rocas, observando que la mayoría de los sismos se producen en los límites entre zonas de alta y baja resistividad. Esto sugiere que la migración de fluidos desde áreas conductoras hacia regiones más resistivas podría ser un factor relevante en la actividad sísmica.

Los resultados de este estudio sugieren que, al igual que en la Falla de San Andrés, los sismos en nuestra área de estudio tienden a ocurrir en los límites entre zonas conductoras y resistivas. No obstante, también se observan eventos en áreas de resistividad moderada y, en menor medida, en zonas de alta resistividad. En todos los modelos de resistividad obtenidos, tanto en 2D como en 3D, los sismos rodean las zonas conductoras; sin embargo, en el perfil 1, los sismos presentan una distribución más dispersa, lo que dificulta identificar un patrón claro.

En el perfil 1, las zonas conductoras más someras sugieren la presencia de fluidos que probablemente se infiltran y circulan a través de la falla, generando un calentamiento debido a la interacción con las rocas.

Juárez-Reyes (2023), analiza la geoquímica de fluidos en manantiales cercanos a la zona y concluye que estos no son de origen magmático, como lo demuestra la relación isotópica de helio y la proporción  $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ . En contraste, las zonas conductoras más profundas también se asocian a la presencia de fluidos, sin embargo, en este caso se infiere que las temperaturas son más elevadas debido al gradiente geotérmico, lo cual contribuye a reducir la resistividad. A diferencia de las zonas someras, es posible que estos fluidos profundos sean de origen magmático, ya que en el modelo de Ojos Negros (perfil 1), se observa que la zona conductora somera no tiene conexión directa con la zona conductora profunda. Por otra parte, en el modelo San Miguel (perfil 2 y 3), se observa conexión entre las zonas conductoras someras y profundas, sin embargo, a diferencia de Ojos Negros, en esta zona no se han realizado análisis geoquímicos de manantiales cercanos, por lo cual se infiere que los fluidos podrían ser de origen magmático.

En cuanto a la distribución vertical de la sismicidad, se observa que la mayoría de los eventos ocurren entre los 5 y 10 km de profundidad, lo que sugiere que la transición frágil-dúctil de la corteza se sitúa aproximadamente a los 10 km de profundidad. Además, los sismos se localizan generalmente por encima de las zonas conductoras, lo cual puede indicar que, al migrar los fluidos hacia zonas menos permeables (más resistivas), como las rocas granitoides, aumenta la presión de poros, generando actividad microsísmica.

## Capítulo 6. Conclusiones

---

Con base en las inversiones realizadas en 2D y 3D, se concluye que los modelos 3D ofrecen ciertas ventajas sobre los 2D, ya que simulan la variación de la resistividad en todas las direcciones, lo cual ayuda a obtener un modelo más realista. Esto reduce las distorsiones que suelen presentarse en los modelos 2D.

Todos los modelos, tanto 2D como 3D, logran identificar las zonas conductoras, que son las características más notables en los resultados. Los modelos 3D, en particular, muestran de manera clara la transición de una zona resistiva a una zona conductora. En el caso de la interpretación del modelo de San Miguel, es importante considerar que las zonas conductoras actúan como barreras, limitando la capacidad de detección a mayor profundidad y reduciendo la confiabilidad del modelo a profundidades superiores a los 20 km, debido a la disminución de sensibilidad.

Los cuerpos resistivos identificados se asocian con rocas granitoides (plutónicas) del Cinturón Batolítico Peninsular, mientras que las zonas conductoras están relacionadas con la presencia de fluidos o minerales conductores. Esto podría señalar áreas propensas a la deformación y al deslizamiento. Los fluidos asociados a las zonas conductoras someras no parecen ser de origen magmático, como lo indica el estudio de Juárez-Reyes (2023), respaldado por la relación isotópica de helio y la proporción de  $^4\text{He}/^{20}\text{Ne}$ . En cambio, estas zonas someras estarían asociadas con fluidos que se infiltran y circulan a través de la falla. Por otro lado, las zonas conductoras más profundas podrían estar vinculadas a fluidos de origen magmático y tener altas temperaturas, lo cual contribuye a la disminución significativa de resistividad en estas áreas.

La mayoría de los sismos se localizan entre 5 y 10 km de profundidad, lo que sugiere que la interfaz frágil-dúctil de la corteza se encuentra alrededor de los 10 km. La sismicidad tiende a concentrarse en los límites entre zonas conductoras y resistivas, así como en áreas de resistividad intermedia. Generalmente, los eventos sísmicos se localizan por encima de las zonas conductoras, lo que puede indicar que, al migrar los fluidos hacia zonas menos permeables (más resistivas), como las rocas granitoides, aumenta la presión de poros, generando actividad microsísmica.

## Literatura citada

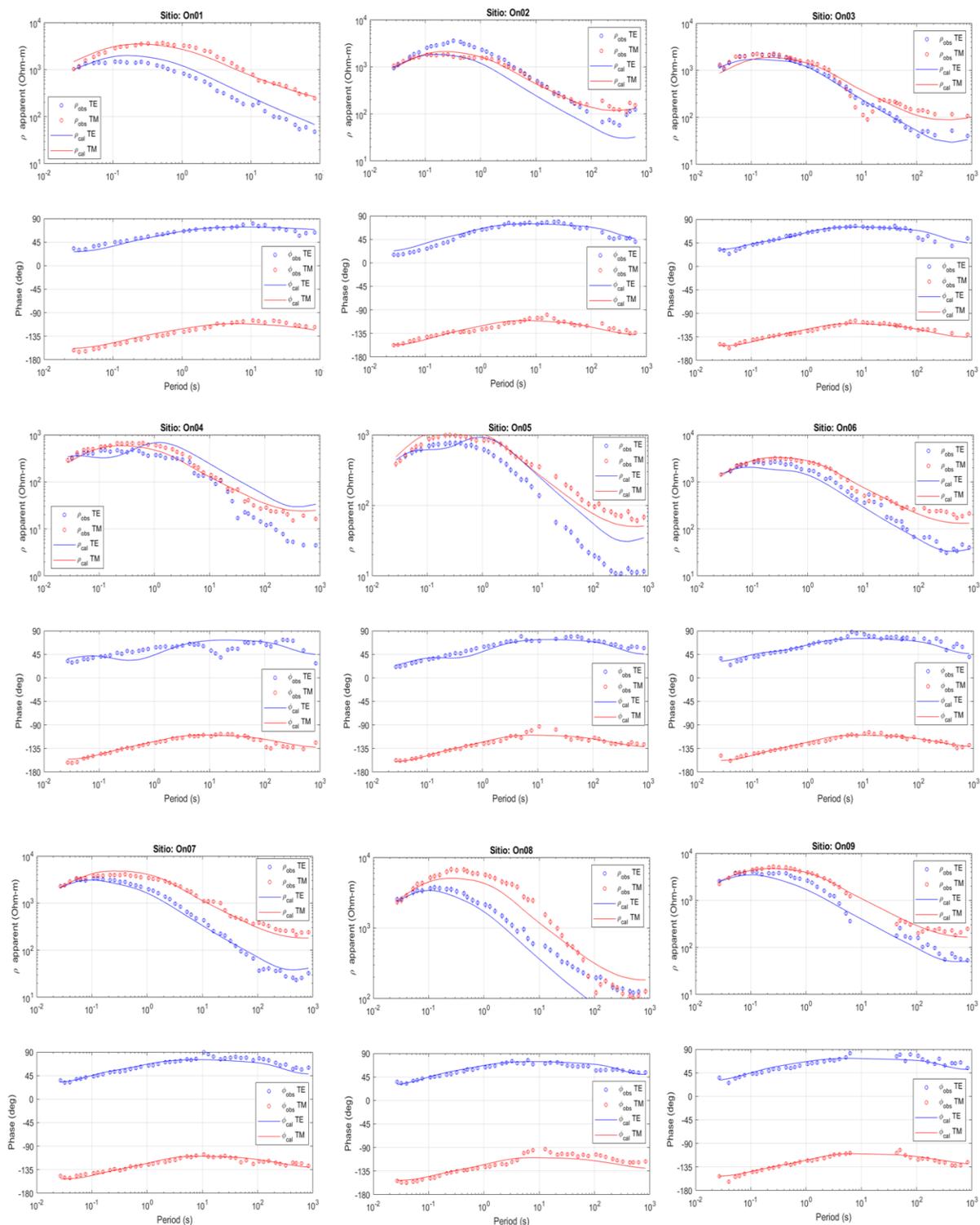
- Aizawa, K., Asaue, H., Koike, K., Takakura, S., Utugi, M., Inoue, H., Yoshimura, R., Yamazaki, K., Komatsu, S., Uyeshima, M., Koyama, T., Kanda, W., Shiotani, T., Matsushima, N., Hata, M., Yoshinaga, T., Uchida, K., Tsukashima, Y., Shito, A., ... Shimizu, H. (2017). Seismicity controlled by resistivity structure: The 2016 Kumamoto earthquakes, Kyushu Island, Japan. *Earth, Planets and Space*, 69(1), 1-10. <https://doi.org/10.1186/s40623-016-0590-2>
- Allen, C. R., Amand, P. St., Richter, C. F., & Nordquist, J. M. (1965). Relationship between seismicity and geologic structure in the Southern California region. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 55(4), 753-797. <https://doi.org/10.1785/BSSA0550040753>
- Antonio-Carpio, R., Romo, J. M., Frez, J., Gómez-Treviño, E., Suárez-Vidal, F. (2011). Electrical resistivity imaging of a seismic region in northern Baja California, México. *Geofísica Internacional*, 50(1), 22-39. <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.2011.50.1.120>
- Becken, M., Ritter, O., Bedrosian, P. A., & Weckmann, U. (2011). Correlation between deep fluids, tremor and creep along the central San Andreas fault. *Nature*, 480(7375), 87-90. <https://doi.org/10.1038/nature10609>
- Begum, S.K. (2017). Electrical Conductivity and Aftershock Activity in Seismically Active Region of Chamoli, Lesser Himalayas. *Open Journal of Earthquake Research*, 06(2), 117-134. <https://doi.org/10.4236/ojer.2017.62007>
- Brune, J. N., Simons, R. S., Rebolgar, C. & Reyes, A. (1979). Seismicity and faulting in northern Baja California. In P. L. Abbot & W. J. Elliott (Eds.), *Earthquakes and Other Perils, San Diego Region* (pp. 83-100). San Diego Association of Geologists. <https://www.nrc.gov/docs/ML1929/ML19290D444.pdf>
- Cagniard, L. (1953). Basic theory of the magneto-telluric method of geophysical prospecting. *Geophysics*, 18(3), 605-635. <https://doi.org/10.1190/1.1437915>
- Chave, A.D., & Jones, A.G. (Eds.). (2012). *The Magnetotelluric Method: Theory and Practice*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9781139020138>
- Cid-Villegas, C., Mendoza, C., Ferrari, L. (2017). Mexico Quaternary Fault Database. *Terra digitalis*, 1(1), 1-9. <https://doi.org/10.22201/igg.terradigitalis.2017.1.3>
- Constable, S.C., Parker, R. L., & Constable, C.G. (1987). Occam's inversion: A practical algorithm for generating smooth models from electromagnetic sounding data. *Geophysics*, 52(3), 289-300. <http://dx.doi.org/10.1190/1.1442303>
- Cruz Castillo, M. (2002). Catálogo de las fallas regionales activas en el norte de Baja California, México. *GEOS, Unión Geofísica Mexicana*, 22(1), 37-42. <https://www.ugm.org.mx/publicaciones/geos/pdf/geos02-1/Cruz-Castillo02-1.pdf>
- De Barros, L., Wynants-Morel, N., Cappa, F., & Danré, P. (2021). Migration of fluid-induced seismicity reveals the seismogenic state of faults. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 126(11), 1-15. <https://doi.org/10.1029/2021JB022767>

- Dixon, T., Decaix, J., Farina, F., Furlong, K., Malservisi, R., Bennett, R., Suarez-Vidal, F., Fletcher, J., & Lee, J. (2002). Seismic cycle and rheological effects on estimation of present-day slip rates for the Agua Blanca and San Miguel–Vallecitos faults, northern Baja California, Mexico. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 107(B10), ETG 5-1–ETG 5-23. <https://doi.org/10.1029/2000JB000099>
- Doser, D. I. (1992). Faulting processes of the 1956 San Miguel, Baja California, earthquake sequence. *Pure and applied geophysics*, 139, 3-16. <https://doi.org/10.1007/BF00876824>
- Frez, J., González, J. J., Acosta, J. G., Nava, F. A., Méndez, I., Carlos, J., García-Arthur, R.E., & Alvarez, M. (2000). A Detailed Microseismicity Study and Current Stress Regime in the Peninsular Ranges of Northern Baja California, Mexico: The Ojos Negros Region. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 90(5), 1133-1142. <https://doi.org/10.1785/0119990164>
- Gastil, R. G., Phillips, R. P., & Allison, E. C. (1975). Reconnaissance geology of the state of Baja California. *Geological Society of America Memoirs*, 140, 1–201. <https://doi.org/10.1130/MEM140>
- Gómez-Treviño, E., Romo, J. M., & Esparza, F. J. (2014). Quadratic solution for the 2-D magnetotelluric impedance tensor distorted by 3-D electro-galvanic effects. *Geophysical Journal International*, 198(3), 1795-1804. <https://doi.org/10.1093/gji/ggu238>
- González-Escobar, M. (1987). *Estudio detallado del sismo de Pino Solo, Baja California, México, del 8 de mayo de 1985* [Tesis de Maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California]. Repositorio institucional. <https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1007/1396>
- Groom, R. W., & Bailey, R. C. (1989). Decomposition of magnetotelluric impedance tensors in the presence of local three-dimensional galvanic distortion. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 94(B2), 1913-1925. <https://doi.org/10.1029/JB094iB02p01913>
- Hirabayashi, C. K., Rockwell, T. K., Wesnousky, S. G., Stirling, M. W., & Suárez-Vidal, F. (1996). A neotectonic study of the San Miguel-Vallecitos fault, Baja California, Mexico. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 86(6), 1770-1783. <https://doi.org/10.1785/BSSA0860061770>
- Hyndman, R. D. (1988). Dipping seismic reflectors, electrically conductive zones, and trapped water in the crust over a subducting plate. *Journal of Geophysical Research: Solid Earth*, 93(B11), 13391-13405. <https://doi.org/10.1029/JB093iB11p13391>
- Johnson, T. L., Madrid, J., & Koczyński, T. (1976). A study of microseismicity in Northern Baja California, Mexico. *Bulletin of Seismological Society of America*, 66(6), 1921-1929. <https://doi.org/10.1785/BSSA0660061921>
- Juárez-Reyes, M. (2023). *Caracterización geoquímica e isotópica de fluidos asociados al sistema de falla San Miguel-Vallecitos, Baja California* [Tesis de Maestría en Ciencias. Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California]. Repositorio institucional. <https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1007/3910>
- Kelbert, A., Meqbel, N., Egbert, G. D., & Tandon, K. (2014). ModEM: A modular system for inversion of electromagnetic geophysical data. *Computers & Geosciences*, 66, 40-53. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2014.01.010>

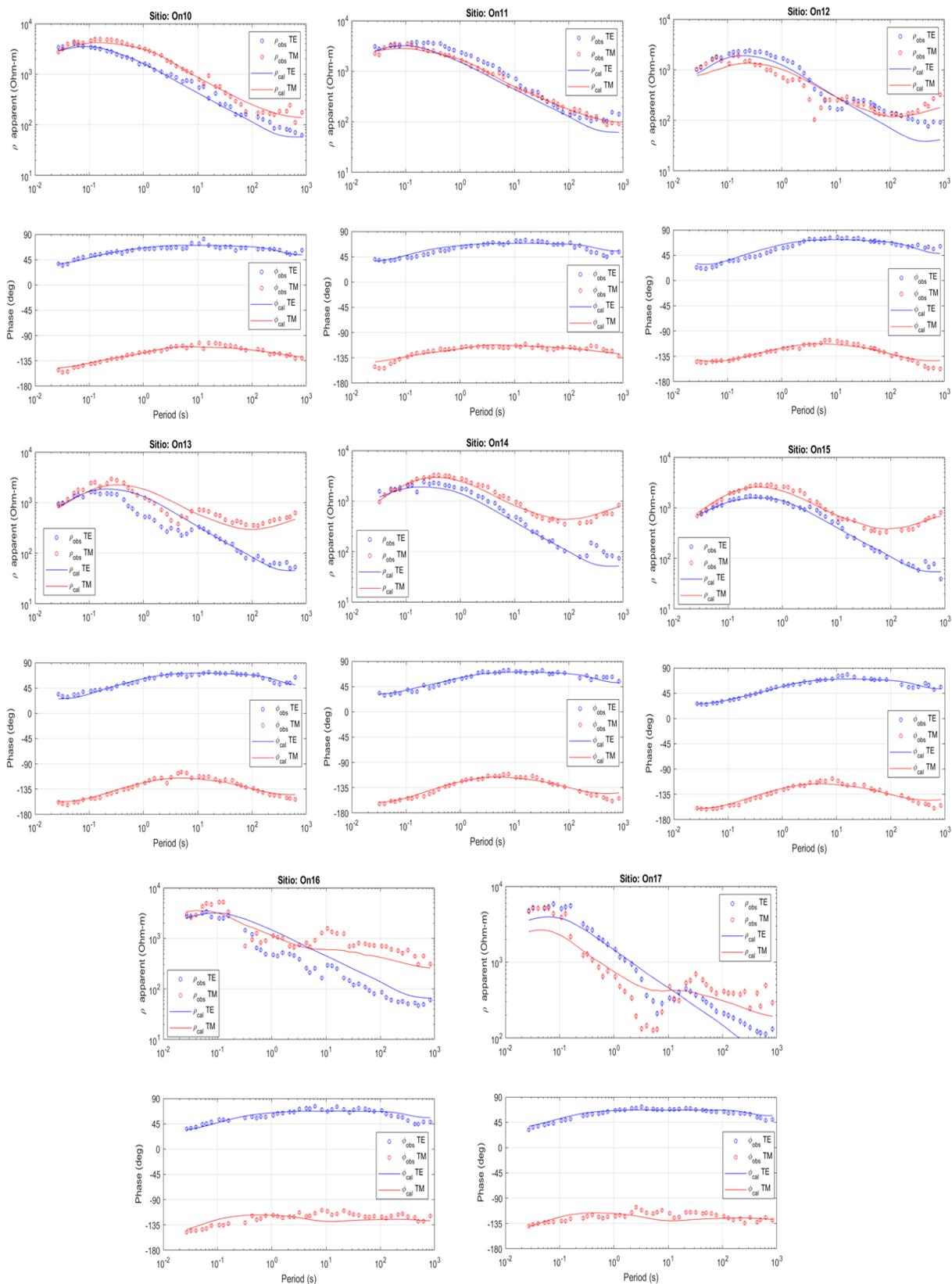
- Key, K. (2016). MARE2DEM: a 2-D inversion code for controlled-source electromagnetic and magnetotelluric data. *Geophysical Journal International*, 207(1), 571-588. <https://doi.org/10.1093/gji/ggw290>
- Key, K., & Owall, J. (2011). A parallel goal-oriented adaptive finite element method for 2.5-D electromagnetic modelling. *Geophysical Journal International*, 186(1), 137-154. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246X.2011.05025.x>
- Kováčiková, S., Logvinov, I., & Taraov, V. (2019). The relation of the seismicity in the eastern part of the Ukrainian Carpathians and the distribution of electrical conductivity in the Earth's crust. *Geologica Carpathica*, 70(6), 483-493. <https://doi.org/10.2478/geoca-2019-0028>
- Lin, W., Yang, B., Han, B., & Hu, X. (2023). A Review of Subsurface Electrical Conductivity Anomalies in Magnetotelluric Imaging. *Sensors*, 23(4), 1803. <https://doi.org/10.3390/s23041803>
- Oliver, F. M. (2004). *Correlación entre conductividad eléctrica y actividad sísmica en la falla de San Miguel, Ensenada, B. C.* [Tesis de Maestría, Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Baja California]. Repositorio institucional. <https://cicese.repositorioinstitucional.mx/jspui/handle/1007/3210>
- Rebollar, C. J., & Reichle, M. S. (1987). Analysis of the seismicity detected in 1982-1984 in the northern Peninsular Ranges of Baja California. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 77(1), 173-183. <https://doi.org/10.1785/BSSA0770010173>
- Reyes, A., Brune, J., Barker, T., Canales, L., Madrid, J., Rebollar, J., & Munguia, L. (1975). A microearthquake survey of the San Miguel fault zone, Baja California, Mexico. *Geophysical Research Letters*, 2(2), 56-59. <https://doi.org/10.1029/GL002i002p00056>
- Romo, J. M., Gómez-Treviño, E., & Esparza, F. J. (2005). Series and parallel transformations of the magnetotelluric impedance tensor: theory and applications. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 150(1-3), 63-83. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2004.08.021>
- Shor, G. G., & Roberts, E. (1958). San Miguel, Baja California Norte, earthquakes of February, 1956: A field report. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 48(2), 101-116. <https://doi.org/10.1785/BSSA0480020101>
- Simpson, F. & Bahr, K. (2005). *Practical Magnetotellurics*. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511614095>.
- Soares, J. J. (1981). *Estudio de microsismicidad a lo largo de dos sectores de la falla de San Miguel* [Tesis de Licenciatura, Universidad Autónoma de Baja California]. Repositorio Institucional. <https://hdl.handle.net/20.500.12930/8574>
- Stein, R. S. (2003). Earthquake conversations. *Scientific American*, 288(1), 72-79. <https://www.jstor.org/stable/26060128>
- Streich, R. (2009). 3D finite-difference frequency-domain modeling of controlled-source electromagnetic data: Direct solution and optimization for high accuracy. *Geophysics*, 74(5), F95-F105. <https://doi.org/10.1190/1.3196241>
- Suárez-Vidal F., Armijo R., Morgan G., Bodin P., Gastil R.G. (1991). Framework of Recent and Active Faulting in Northern Baja California. In J.P. Dauphin & B. Simoneit (Eds.), *The Gulf and Peninsular*

- Province of the Californias* (pp. 285-300). American Association of Petroleum Geologists. <https://doi.org/10.1306/M47542C16>
- Unsworth, M. J., Malin, P. E., Egbert, G. D., & Booker, J. R. (1997). Internal structure of the San Andreas fault at Parkfield, California. *Geology*, 25(4), 359-362. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(1997\)025%3C0359:ISOTSA%3E2.3.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(1997)025%3C0359:ISOTSA%3E2.3.CO;2)
- Unsworth, M., & Bedrosian, P. A. (2004). On the geoelectric structure of major strike-slip faults and shear zones. *Earth Planets Space*, 56(11), 1177–1184. <https://doi.org/10.1186/BF03353337>
- Vozoff, K. (1972). The magnetotelluric method in the exploration of sedimentary basins. *Geophysics*, 37(1), 98-141. <https://doi.org/10.1190/1.1440255>
- Vozoff, K. (1991). The Magnetotelluric Method. In M. N. Nabighian (Ed.), *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics: Volume 2, Application, Parts A and B* (pp. 641-712). Society of Exploration Geophysicists <https://doi.org/10.1190/1.9781560802686.ch8>
- Ward, S. H., & Hohmann, G. W. (1988). Electromagnetic Theory for Geophysical Applications. In M. N. Nabighian (Ed.), *Electromagnetic methods in applied geophysics: Volume 1, Theory* (pp. 130–311). Society of Exploration Geophysicists. <https://doi.org/10.1190/1.9781560802631.ch4>
- Wong O., V., Legg, M., & Suárez V., F. (1987). Sismicidad y tectónica de la margen continental del sur de California (USA) y Baja California Norte (México). *Geofísica Internacional*, 26(3), 459–478. <https://doi.org/10.22201/igeof.00167169p.1987.26.3.1315>

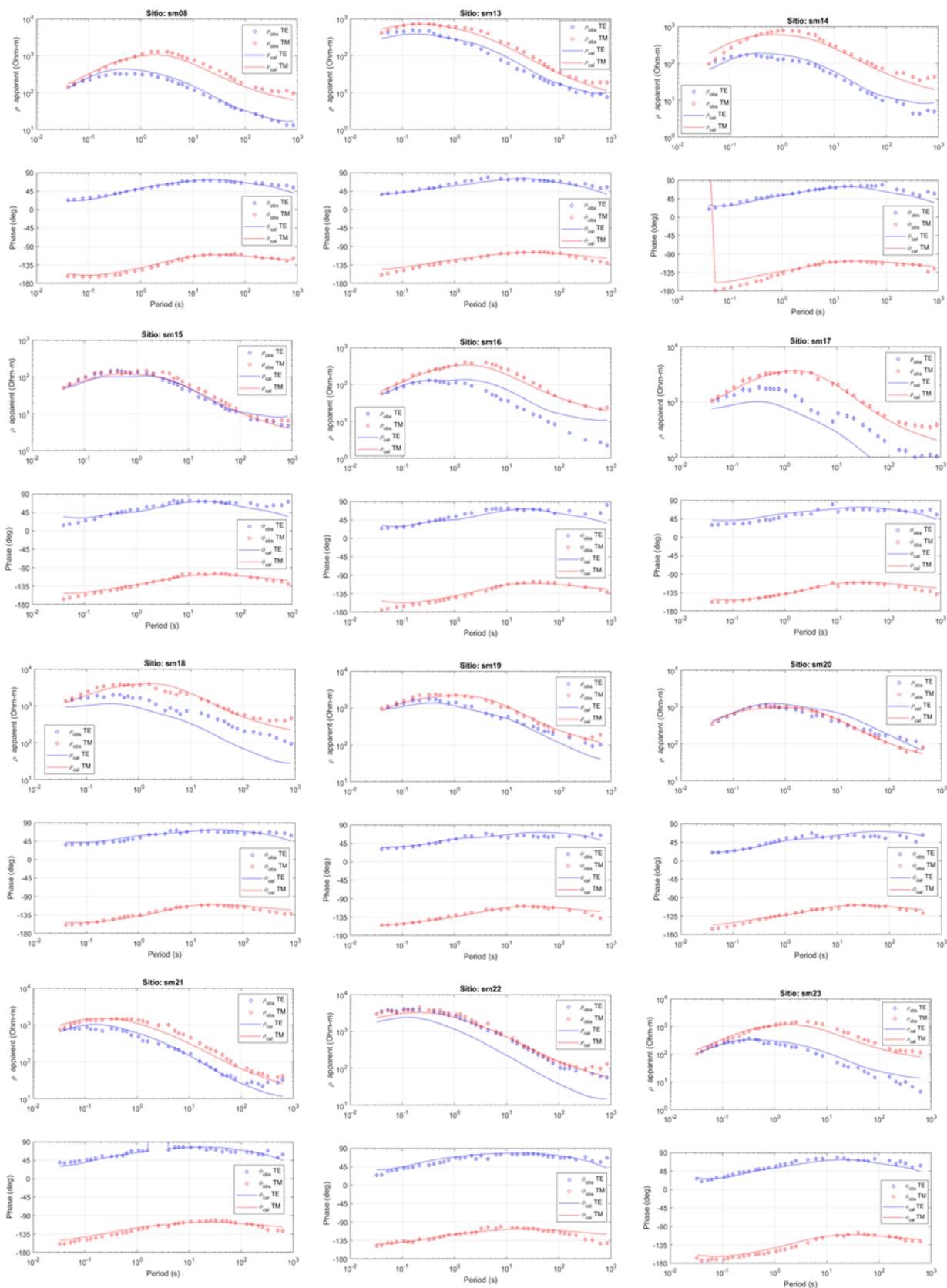
## Anexos



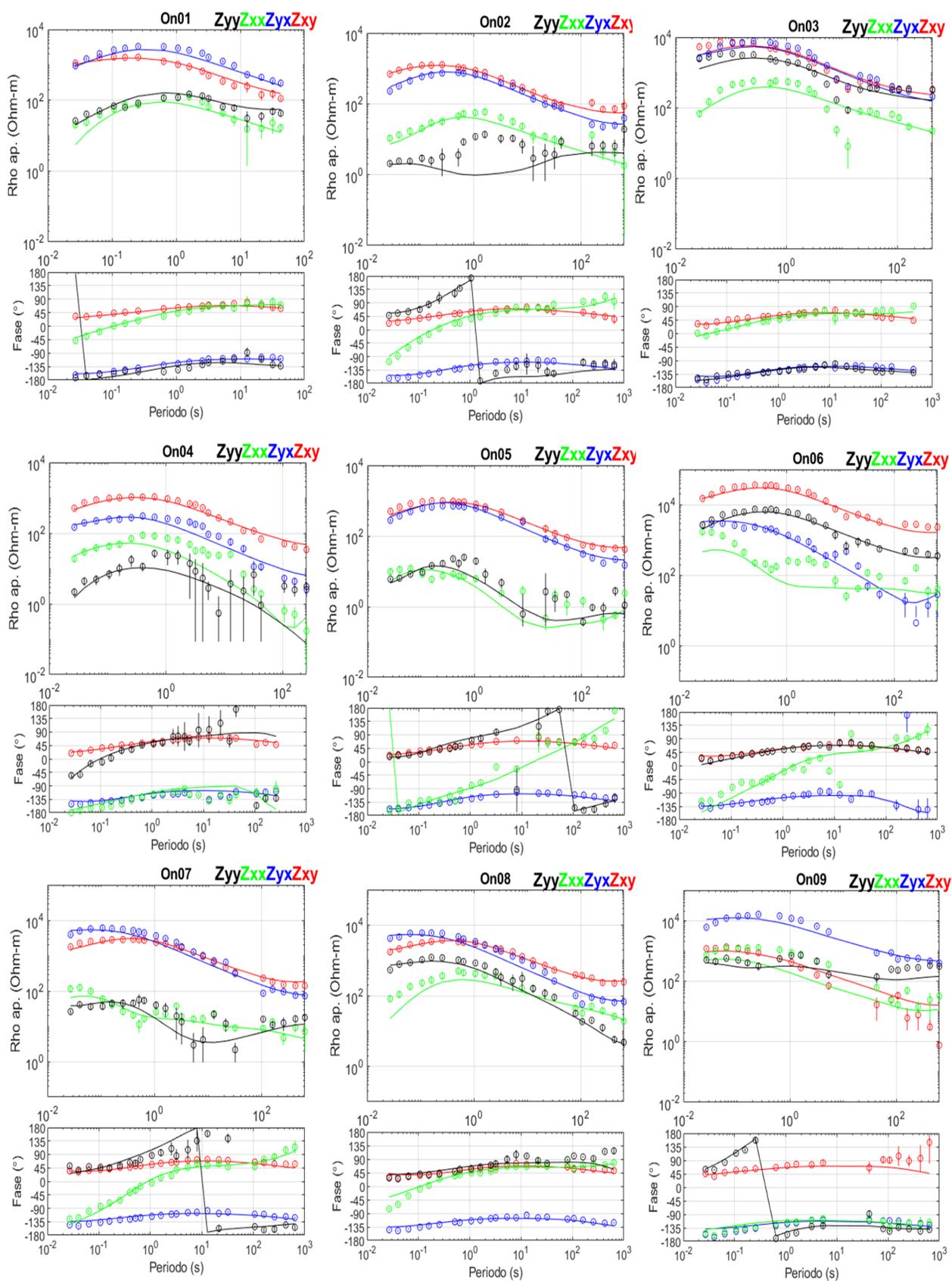
**Figura 49.** Ajuste de los datos de inversión 2D para los sitios On01 a On09 del perfil 1. Los círculos representan los datos observados, mientras que las líneas continuas muestran los datos calculados mediante el proceso de inversión.



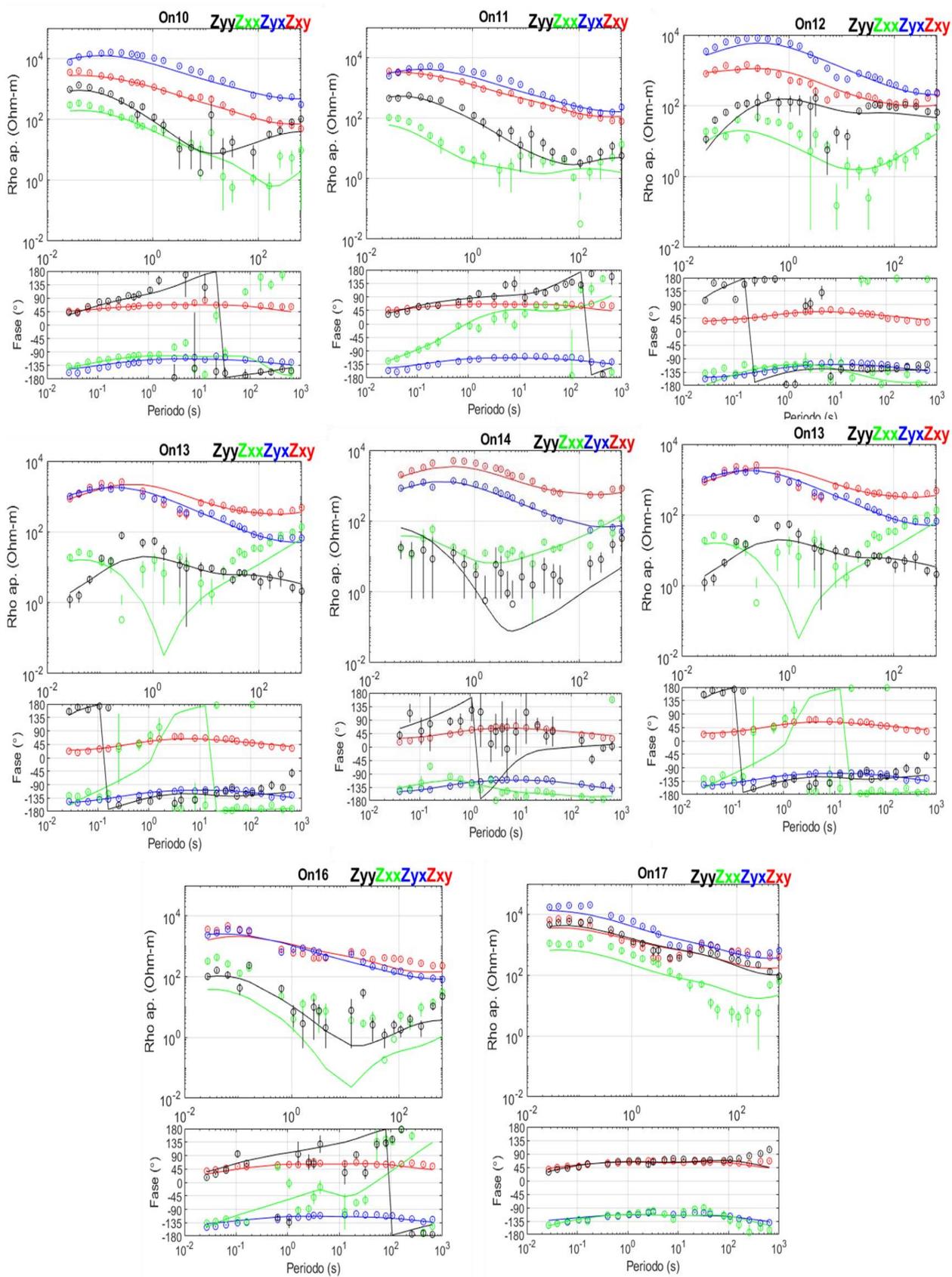
**Figura 50.** Ajuste de los datos de inversión 2D para los sitios On10 a On17 del perfil 1. Los círculos representan los datos observados, mientras que las líneas continuas muestran los datos calculados mediante el proceso de inversión.



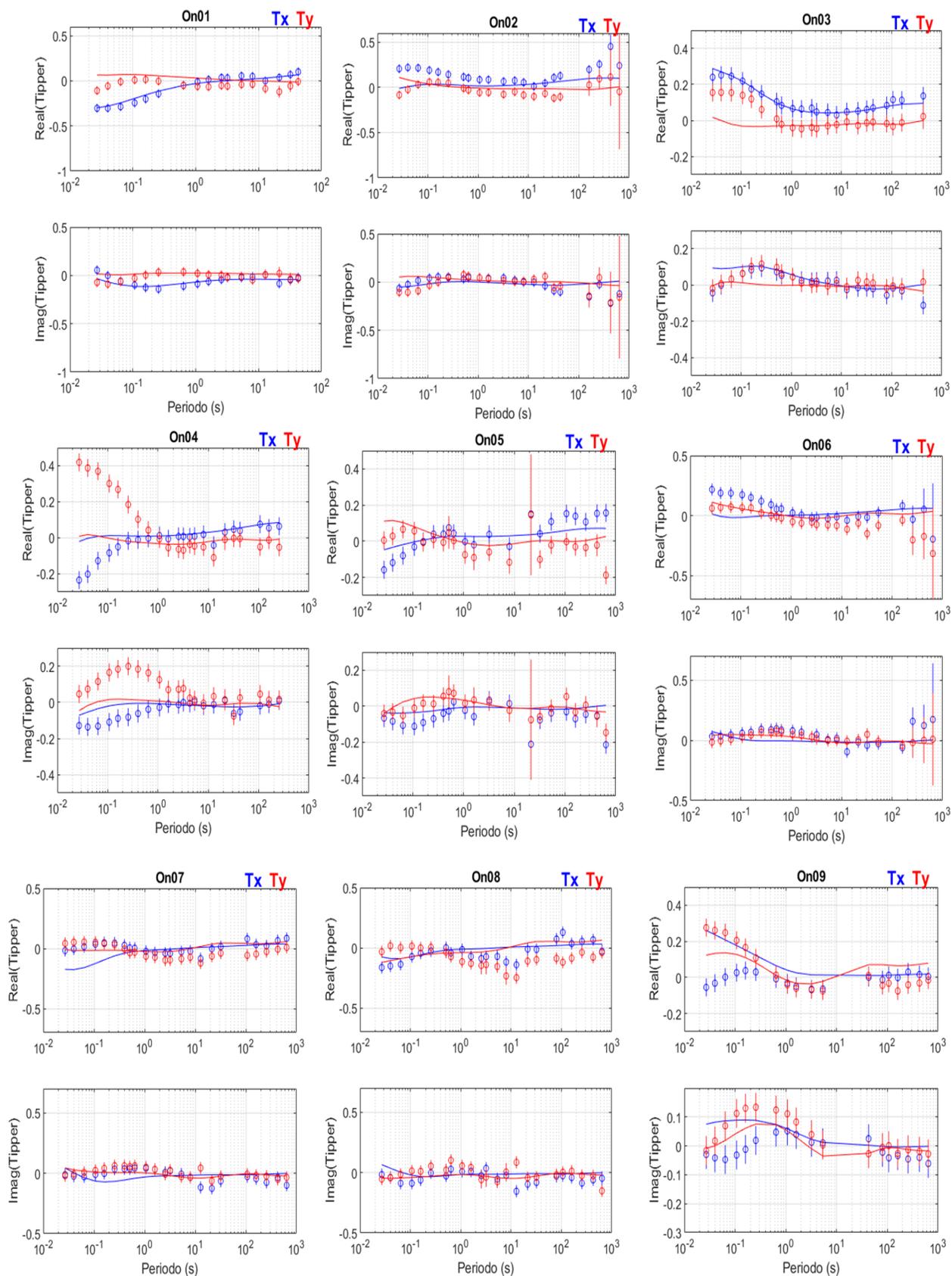
**Figura 51.** Ajuste de los datos de inversión 2D para todos los sitios del perfil 2. Los círculos representan los datos observados, mientras que las líneas continuas muestran los datos calculados mediante el proceso de inversión.



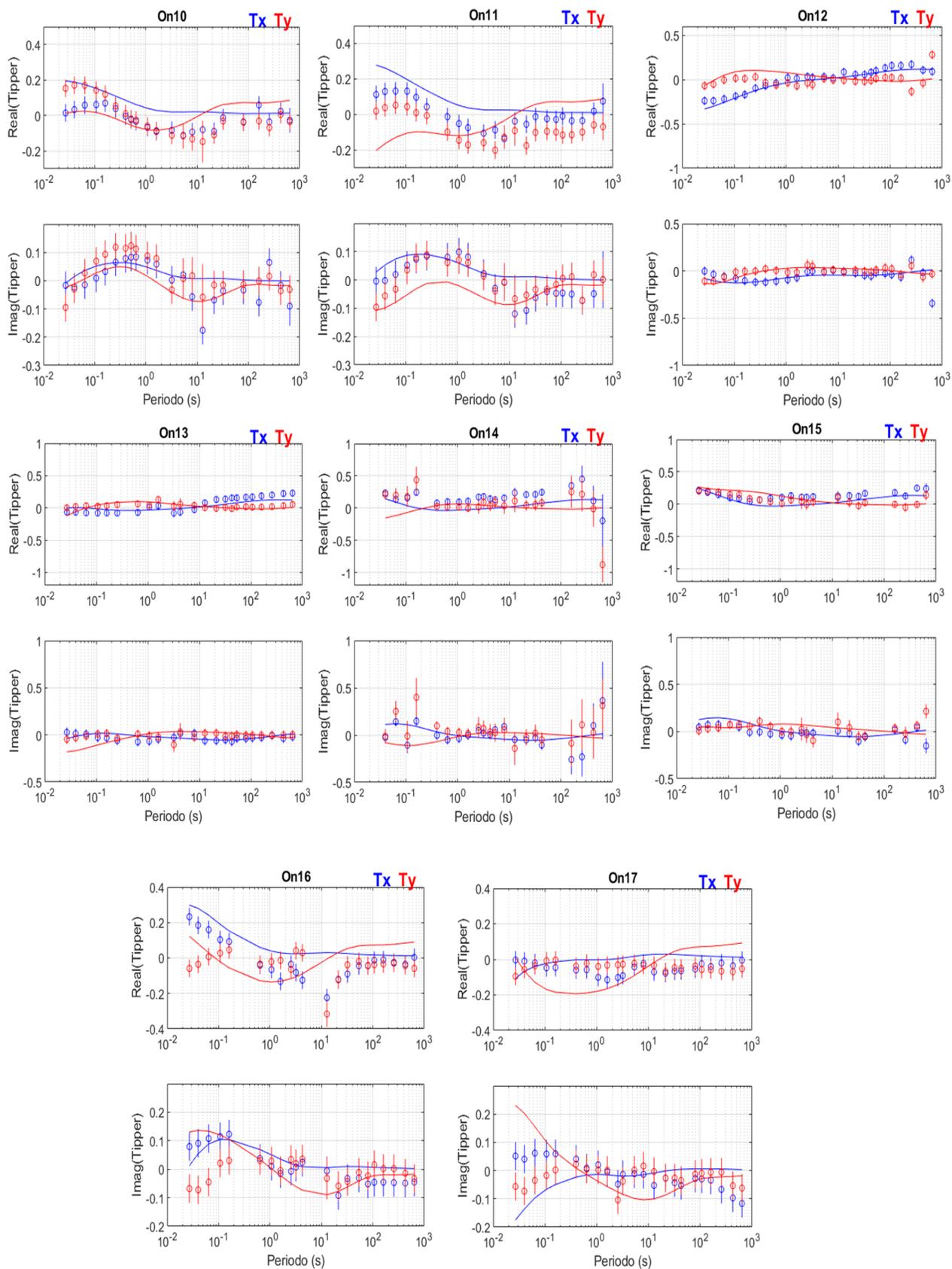
**Figura 52.** Ajuste de los datos de inversión 3D para los sitios On01 a On09 del perfil 1. Los círculos representan los datos observados, mientras que las líneas continuas muestran los datos calculados mediante el proceso de inversión.



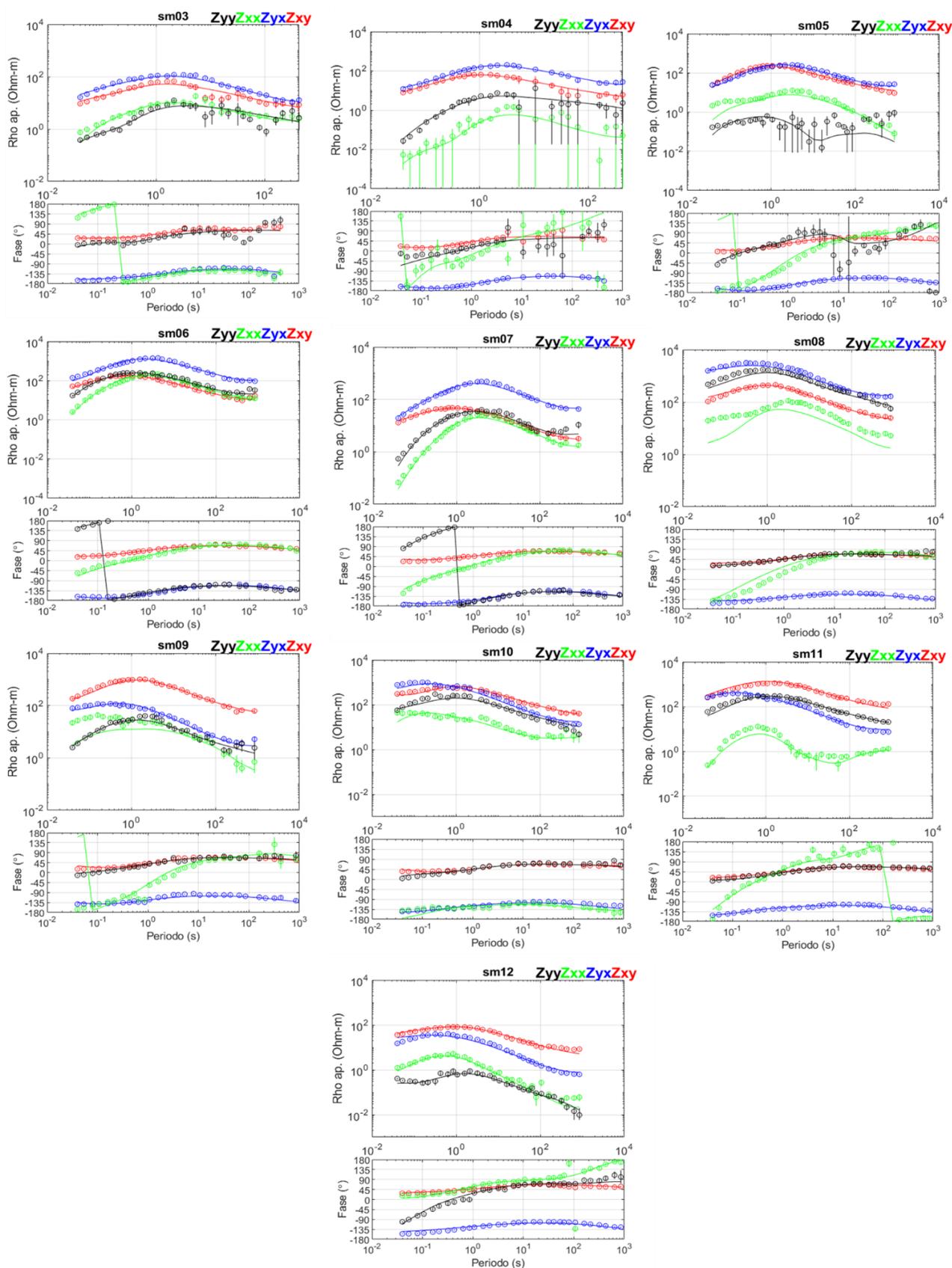
**Figura 53.** Ajuste de los datos de inversión 3D para los sitios On01 a On09 del perfil 1. Los círculos representan los datos observados, mientras que las líneas continuas muestran los datos calculados mediante el proceso de inversión.



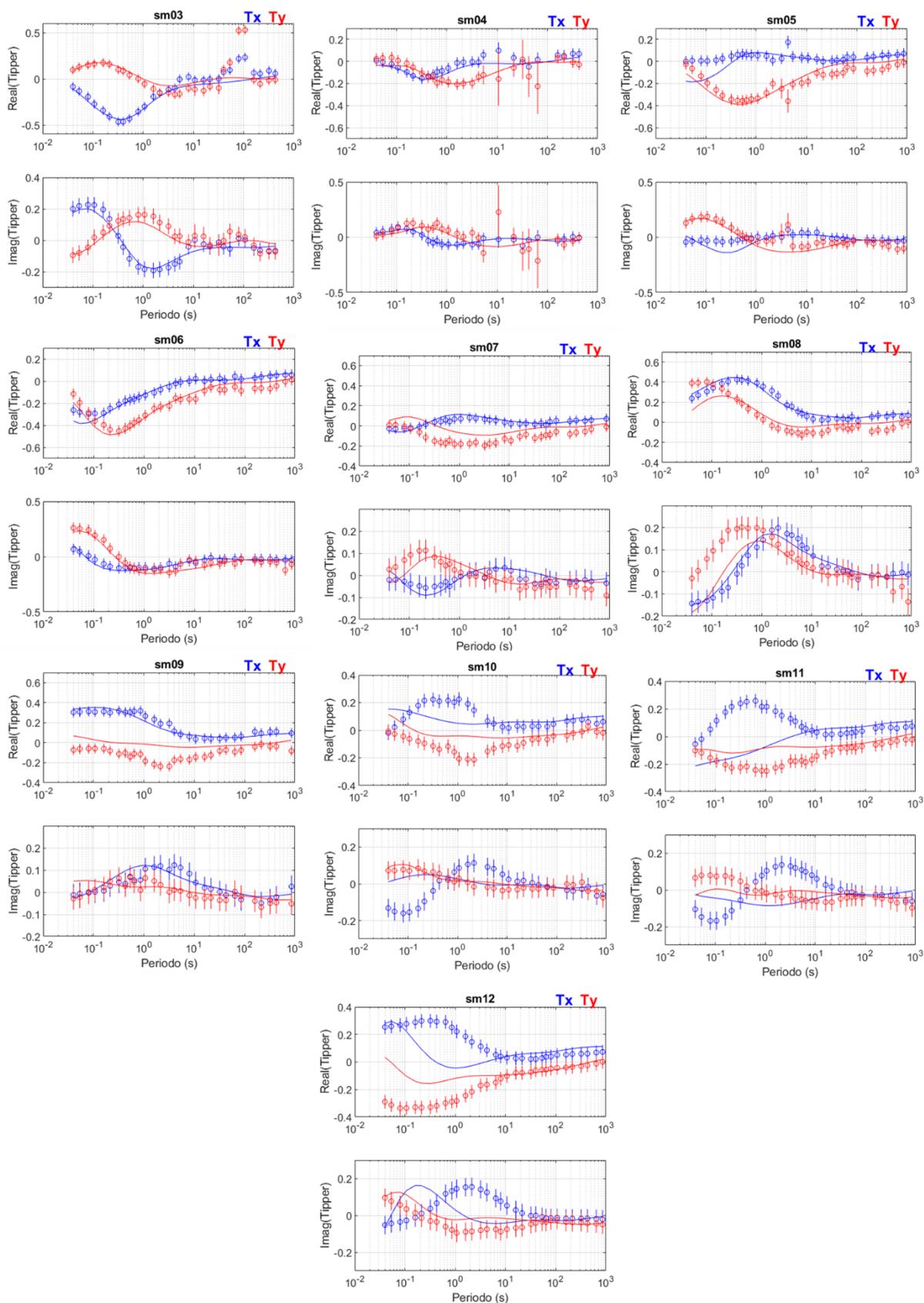
**Figura 54.** Curvas de ajustes del tipper para los sitios On01 a On09 del perfil 1. Los círculos corresponden a los datos observados en campo, mientras que las líneas continuas muestran los valores estimados a partir de la inversión.



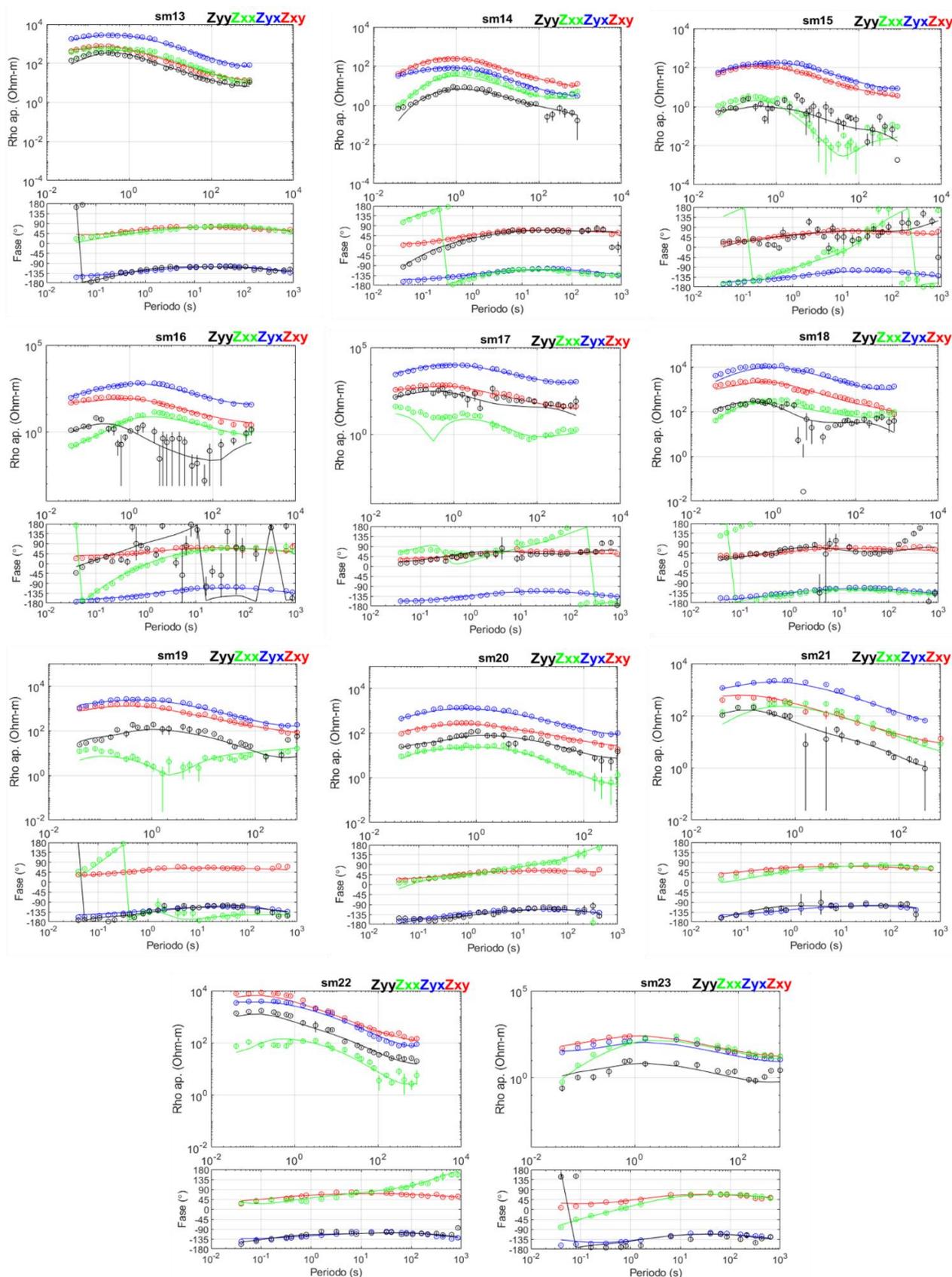
**Figura 55.** Curvas de ajustes del tipper para los sitios On10 a On17 del perfil 1. Los círculos corresponden a los datos observados en campo, mientras que las líneas continuas muestran los valores estimados a partir de la inversión.



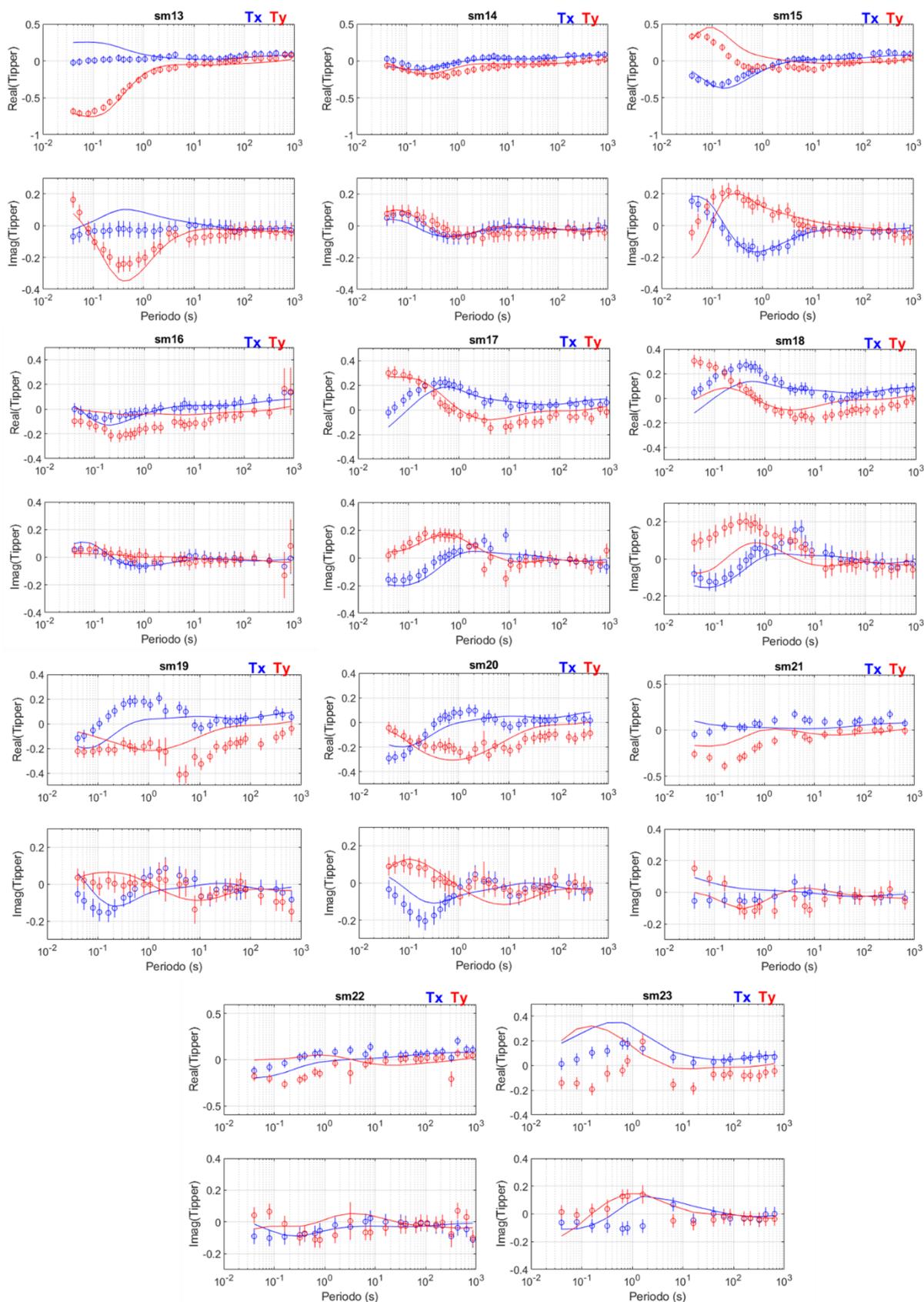
**Figura 56.** Ajuste de los datos de inversión 3D para los sitios sm03 a sm12 del perfil 3. Los círculos representan los datos observados, mientras que las líneas continuas muestran los datos calculados mediante el proceso de inversión.



**Figura 57.** Curvas de ajustes del tipper para los sitios sm01 a sm12 del perfil 3. Los círculos corresponden a los datos observados en campo, mientras que las líneas continuas muestran los valores estimados a partir de la inversión.

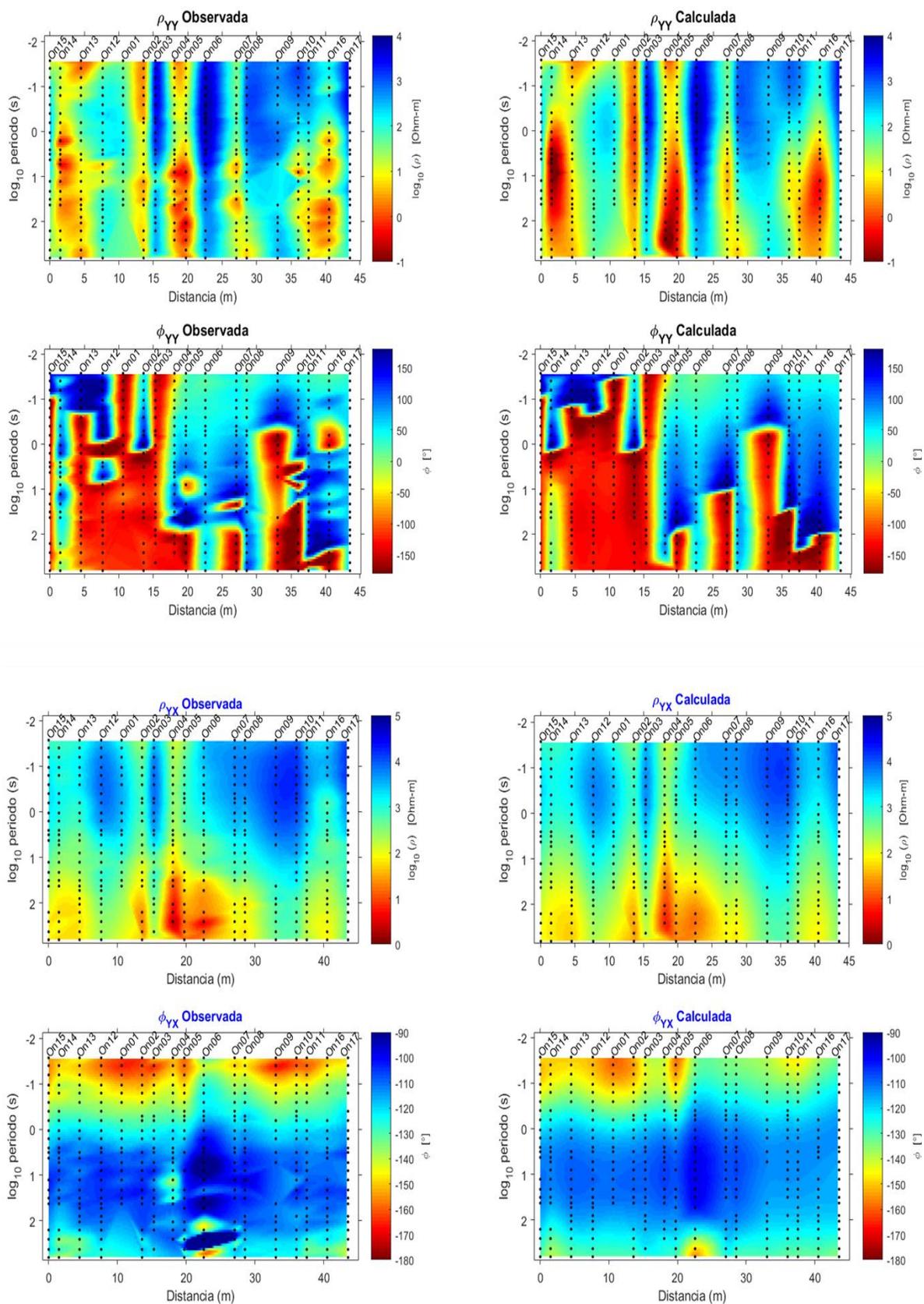


**Figura 58.** Ajuste de los datos de inversión 3D para los sitios sm13 a sm23 del perfil 2. Los círculos representan los datos observados, mientras que las líneas continuas muestran los datos calculados mediante el proceso de inversión.



**Figura 59.** Curvas de ajustes del tipper para los sitios sm13 a sm23 del perfil 2. Los círculos corresponden a los datos observados en campo, mientras que las líneas continuas muestran los valores estimados a partir de la inversión.





**Figura 61.** Seudosecciones de las componentes YY y YX del modelo 3D del perfil 1 (Ojos Negros).

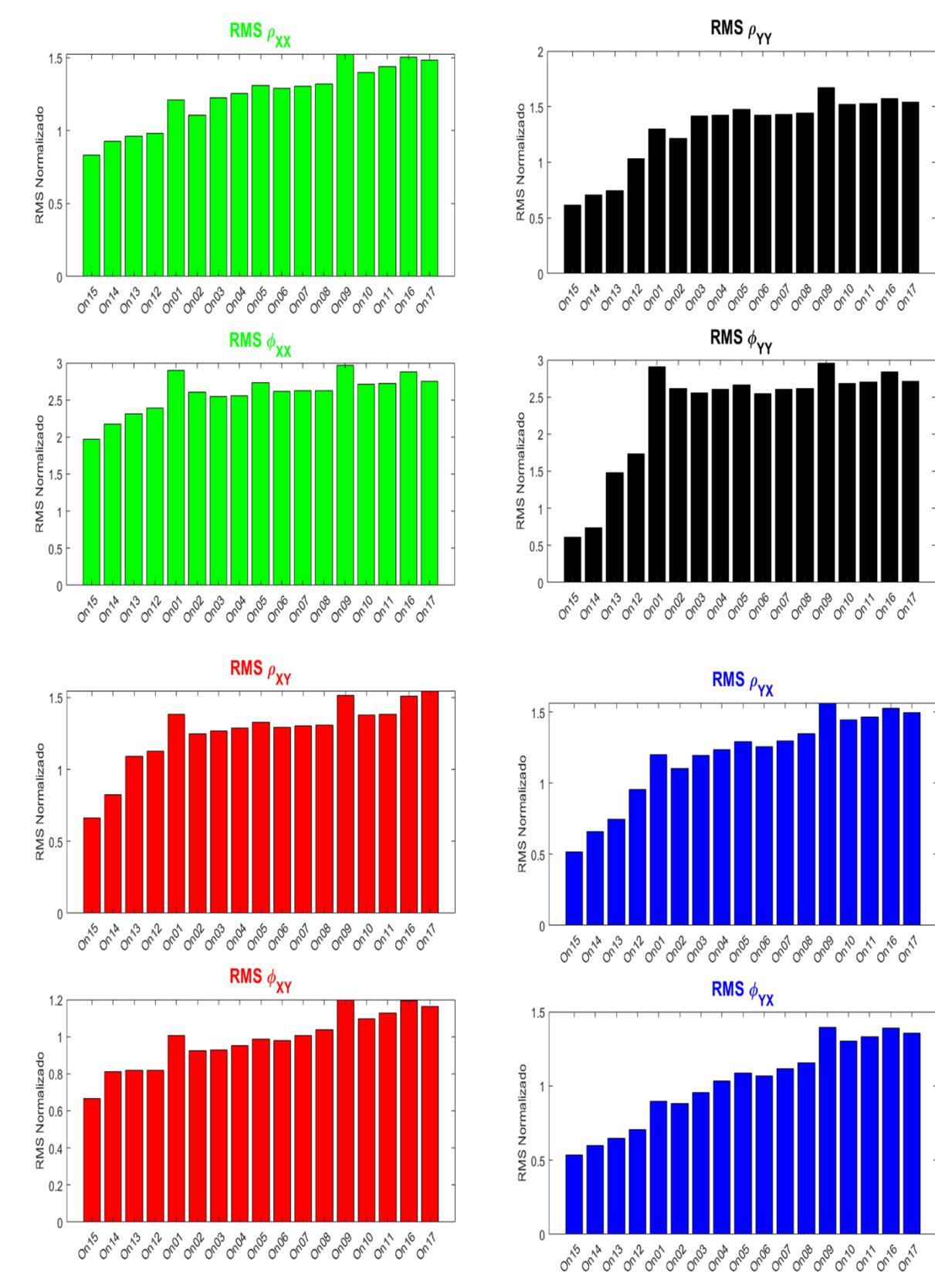


Figura 62. RMS normalizado por sitio del perfil 1 (Ojos Negros) del modelo 3D, detallado para cada componente.

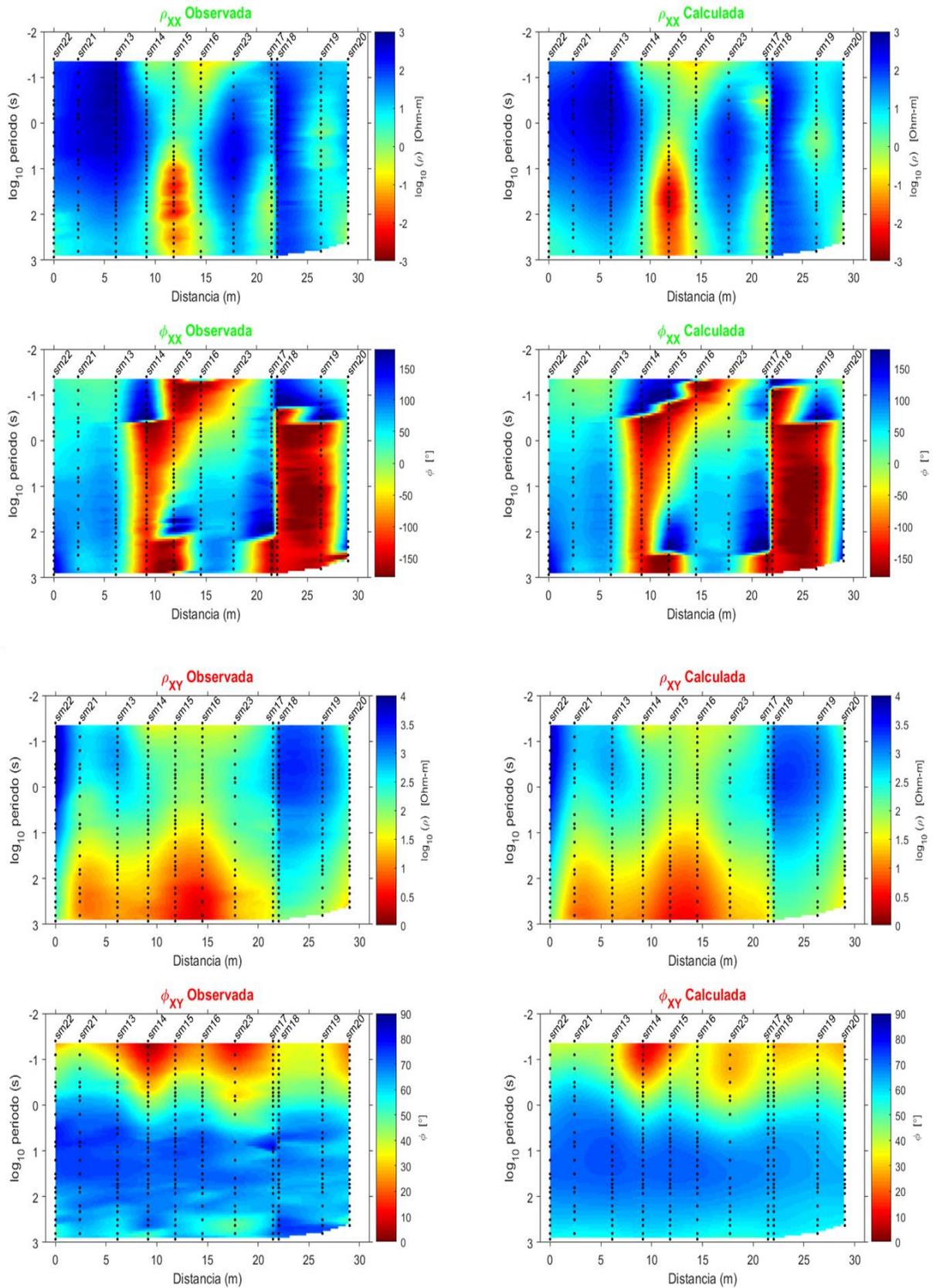


Figura 63. Seudosecciones de las componentes XX y XY del modelo 3D del perfil 2 (San Miguel).

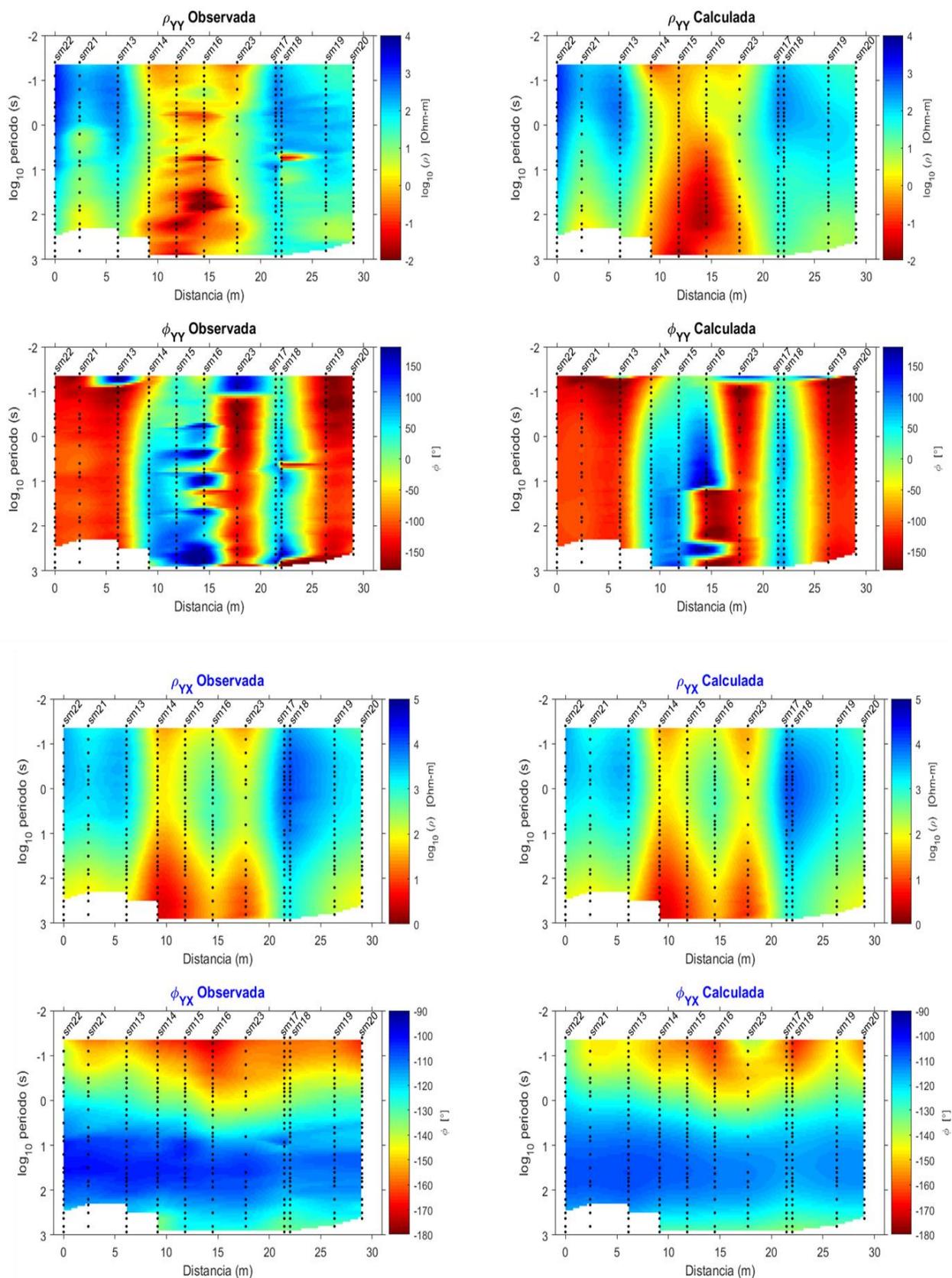
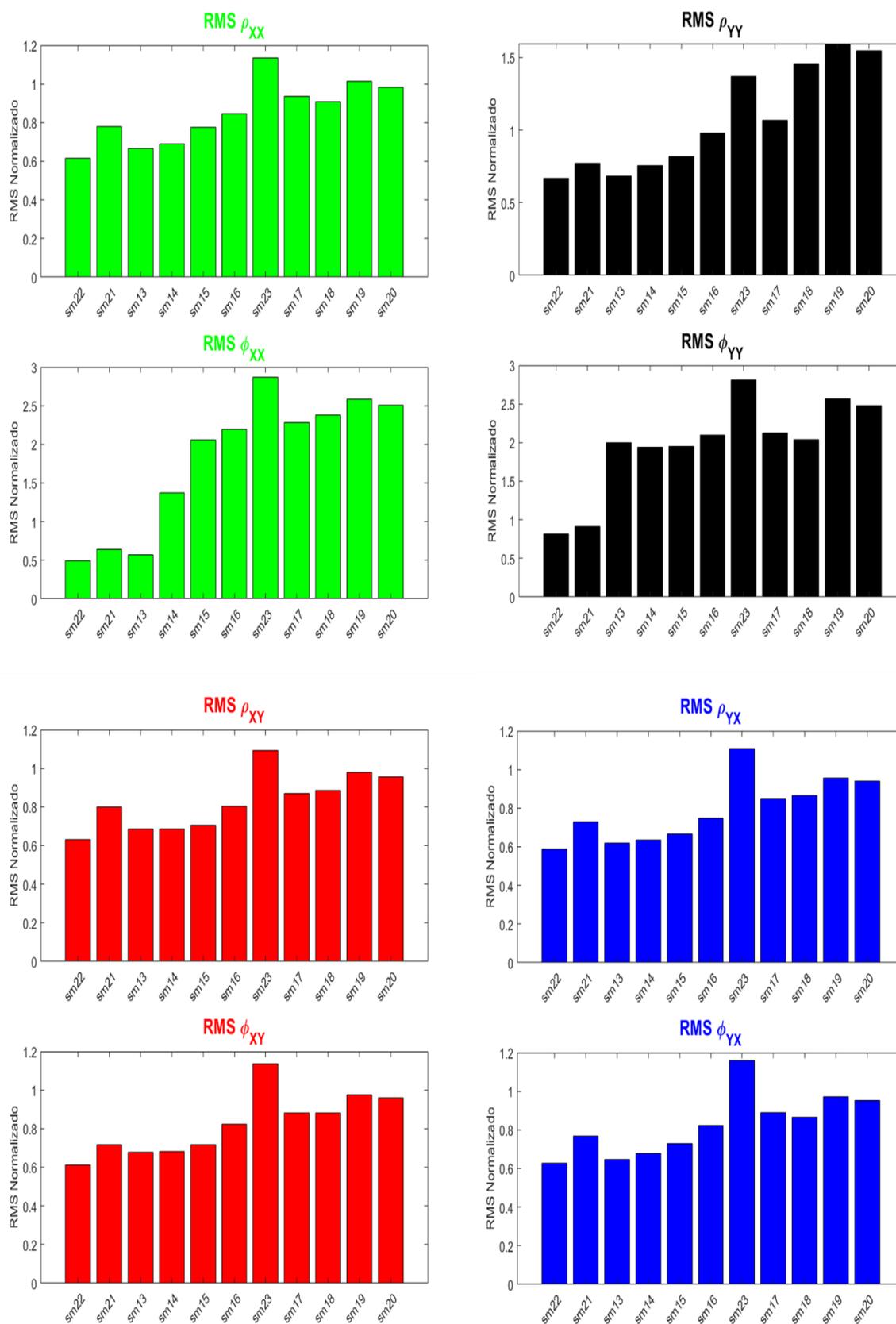


Figura 64. Seudosecciones de las componentes YY y YX del modelo 3D del perfil 2 (San Miguel).



**Figura 65.** RMS normalizado por sitio del perfil 2 (San Miguel) del modelo 3D, detallado para cada componente.

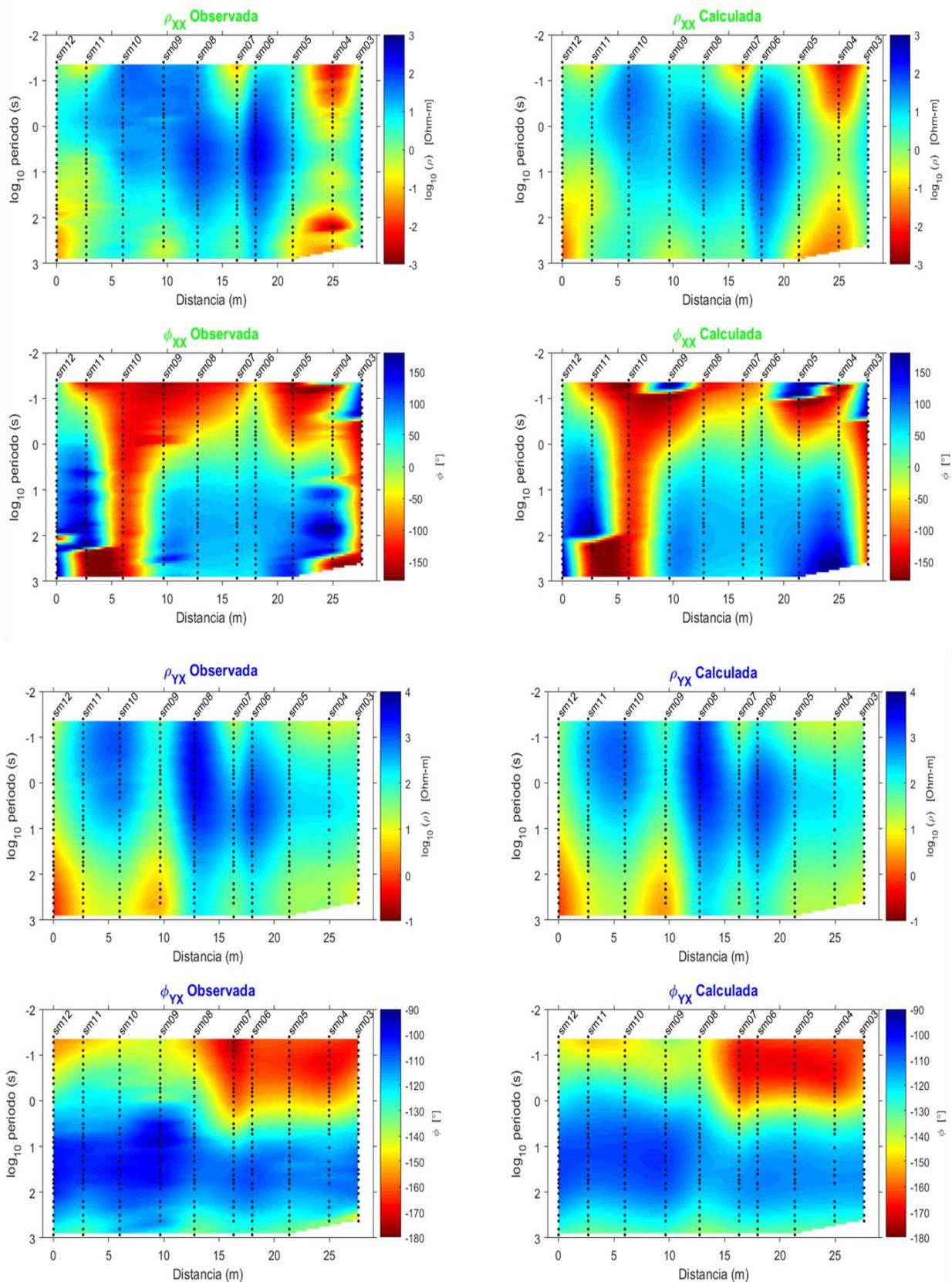


Figura 66. Seudosecciones de las componentes XX y XY del modelo 3D del perfil 3 (San Miguel).

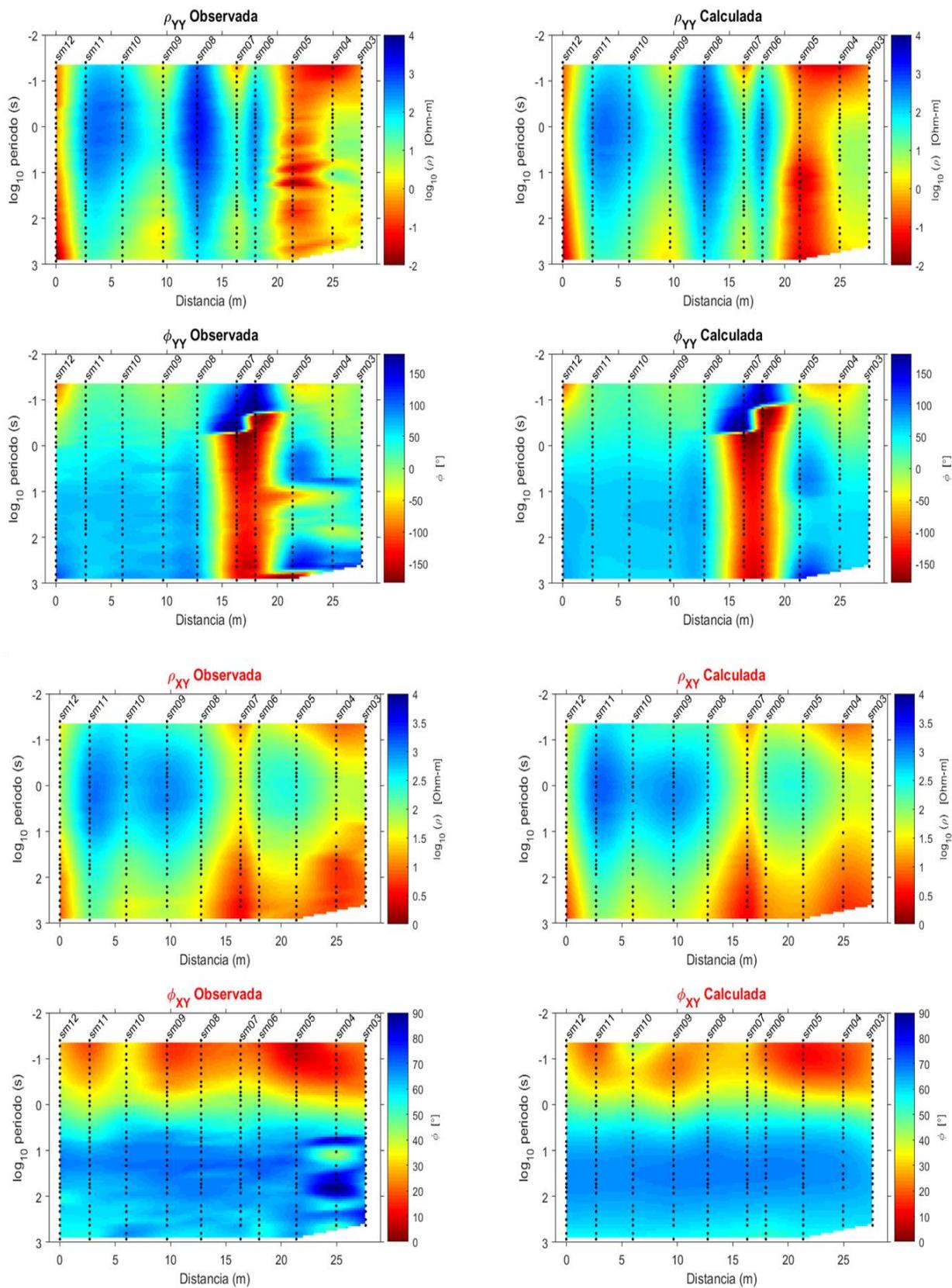


Figura 67. Seudosecciones de las componentes YY y YX del modelo 3D del perfil 2 (San Miguel).

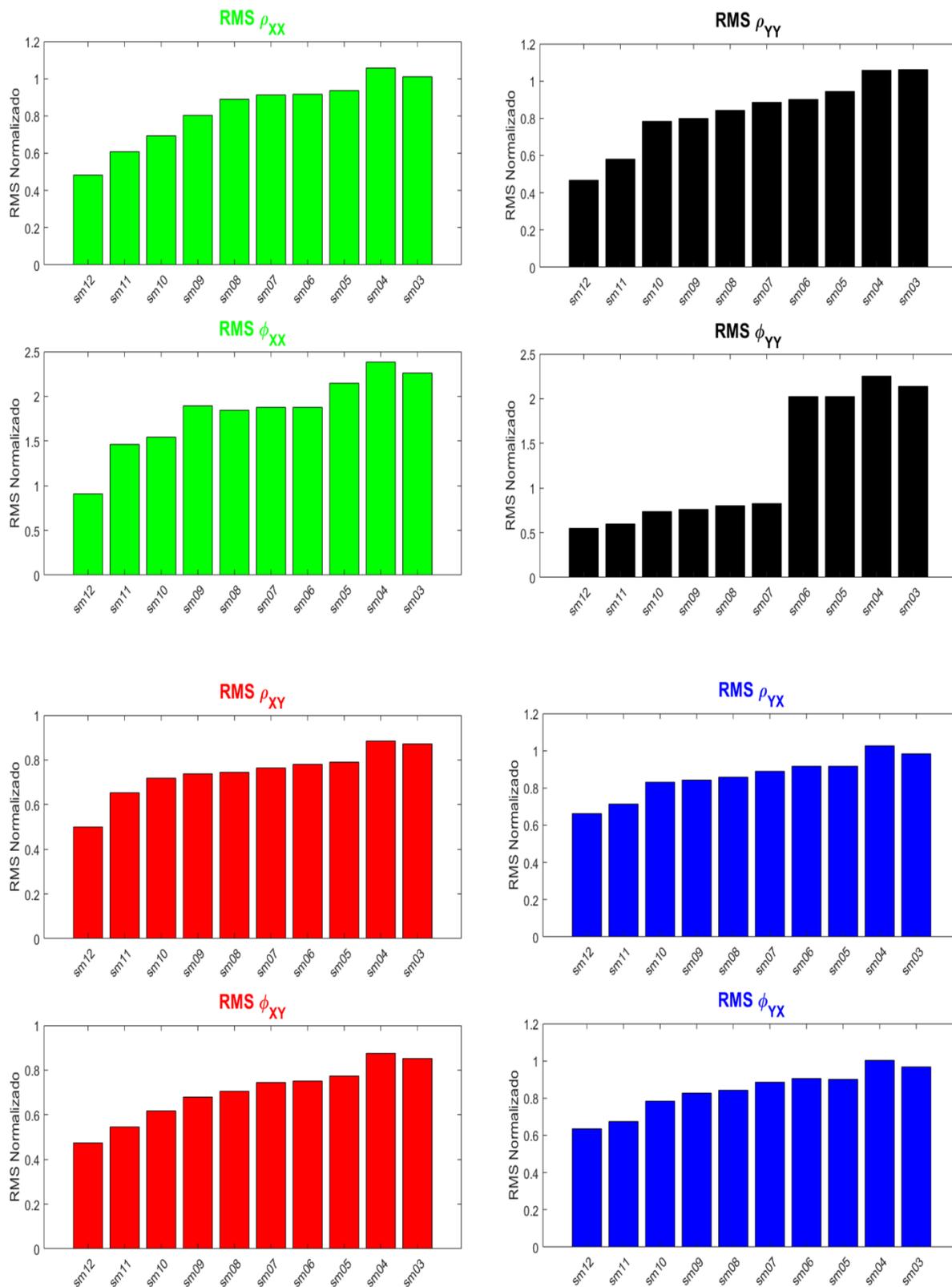


Figura 68. RMS normalizado por sitio del perfil 3 (San Miguel) del modelo 3D, detallado para cada componente.