

Integración multifísica para la corrección del desplazamiento estático en métodos eléctricos y
disminución de la incertidumbre en los modelos del subsuelo

Daniela Quintero Madariaga

Trabajo de Grado para Optar al Título de Geóloga

Director

Yesid Paul Goyes Peñafiel

Geólogo, PhD (c) en Ciencias de la Computación

Codirector

Efrain Andrés Laverde Mera

Mgtr. en Geofísica

Universidad Industrial de Santander

Facultad de Ingenierías Físicoquímicas

Escuela de Geología

Bucaramanga

2025

Dedicatoria

A mi madre Yesenia Madariaga por su esfuerzo y apoyo incondicional a lo largo de todo mi estudio.

A mi padrino Geancarlos Consuegra y mi tía Ángela Ojeda por brindarme su apoyo en los momentos que más necesité.

A mi hermano Juan Diego por ser mi inspiración de vida.

Agradecimientos

A PhD (c) Yesid Paul Goyes Peñafiel, por dirigir con dedicación y esfuerzo este trabajo de investigación en cada una de sus etapas.

Al Mgtr Efrain Andrés Laverde Mera, por codirigir este trabajo de investigación y por sus aportes significativos en la aplicación de esta investigación en el campo laboral.

A los Geólogos y estudiantes de maestría Ana Gabriela Mantilla Dulcey, Nicolás Córdoba Castillo y Andrés Felipe Guevara, por sus observaciones y comentarios, tanto en el libro como en la presentación de la tesis, que mejoraron sustancialmente esta investigación.

Al PhD (c) Sait Khurama Velásquez, por evaluar el plan de investigación de esta tesis que ayudaron a aclarar el rumbo de la investigación.

Al Semillero de Investigación en Geofísica Aplicada y Computacional (SIGAC) por brindarme el apoyo y los recursos necesarios para desarrollar esta investigación, como los datos geofísicos utilizados en este proyecto y el desarrollo de la investigación.

A los profesores de la Escuela de Geología por su dedicación y compromiso con mi aprendizaje.

A la Escuela de Física, por el préstamo de los equipos geofísicos para la toma de algunos datos utilizados en este trabajo.

A la Universidad Industrial de Santander por contribuir en mi formación académica y profesional, brindando los espacios y herramientas de calidad.

Tabla de contenido

		Pág.
	Introducción.....	13
1.	Planteamiento y justificación del problema	14
2.	Objetivos	17
2.1.	Objetivo General.....	17
2.2.	Objetivos Específicos.....	17
3.	Marco teórico.....	18
3.1.	Multifísica	18
3.2.	Métodos eléctricos	19
3.3.	Desplazamiento estático en MT y SEV	25
4.	Metodología.....	28
4.1.	Fase 1. Modelamiento computacional de la respuesta geofísica de los métodos eléctricos SEV, MT y SEDT en diferentes escenarios geológicos, para observar el desplazamiento estático. 28	
4.2.	Fase 2. Evaluación de la incertidumbre en los modelos del subsuelo invertidos, debido al desplazamiento estático en los datos SEV y MT.	29
4.3.	Fase 3. Desarrollo e implementación de un flujo de trabajo para corregir el desplazamiento estático en SEV y MT mediante un enfoque multifísico, integrando los datos de SEDT. 29	
5.	Resultados	31

5.1.	Modelamiento computacional de la respuesta geofísica de los métodos eléctricos SEV, MT y SEDT en diferentes escenarios geológicos, para observar el desplazamiento estático.	
		31
5.1.1.	Modelos del subsuelo de exploración geológica	31
5.1.2.	Modelamiento computacional de los datos	33
5.1.3.	Desplazamiento estático	35
5.2.	Evaluación de la incertidumbre en los modelos del subsuelo invertidos, debido al desplazamiento estático en los datos SEV y MT	38
5.2.1.	Inversión de los datos MT y SEV	38
5.2.2.	Incertidumbre en los modelos del subsuelo invertidos	40
5.3.	Desarrollo e implementación de un flujo de trabajo para corregir el desplazamiento estático en SEV y MT mediante un enfoque multifísico, integrando los datos de SEDT.	42
5.3.1.	Revisión del estado del arte de los métodos computacionales para corregir el desplazamiento estático	43
5.3.2.	Desarrollo de un flujo de trabajo para corregir los datos MT	46
5.3.3.	Desarrollo de un flujo de trabajo para corregir los datos SEV	48
5.3.4.	Implementación del flujo de trabajo para corregir los datos MT	50
5.3.5.	Implementación del flujo de trabajo para corregir los datos SEV	53
5.3.6.	Corrección del desplazamiento estático en datos de campo	54
6.	Conclusiones.....	64
7.	Recomendaciones y trabajo futuro	66
8.	Repositorio y acceso a datos	66

Referencias68

Lista de Tablas

	Pág.
Tabla 1 Algunas aplicaciones de la integración multifísica	18
Tabla 2 Ventajas y limitaciones de los métodos computacionales para corregir el desplazamiento en los datos SEV y MT	45

Lista de Figuras

	Pág.
Figura 1 a) Representación esquemática de la adquisición de SEV. b) Datos SEV en resistividad aparente sobre AB/2.....	20
Figura 2 Representación esquemática de la adquisición de SEDT. a) Se genera el campo magnético primario, b) el cual produce corrientes secundarias y c) estas generan el campo magnético secundario.....	22
Figura 3 Datos SEDT en resistividad aparente sobre el tiempo.....	23
Figura 4 a) Representación esquemática de la adquisición de MT. b) Datos MT en resistividad aparente y fase para cada periodo muestreado	24
Figura 5 SEDT como medición de referencia para estimar visualmente el desplazamiento estático (s) antes y después de corregirlo, en datos a) MT y b) SEV	26
Figura 6 Ejemplo esquemático de la incertidumbre asociada a los modelos invertidos con desplazamiento estático.....	27
Figura 7 Esquema de la metodología del proyecto de investigación.....	30
Figura 8 Modelos del subsuelo de exploración geológica, a) hidrogeológico y b) geotérmico...33	33
Figura 9 Datos simulados en el modelo hidrogeológico.....	34
Figura 10 Datos simulados en el modelo geotérmico.....	35
Figura 11 Desplazamiento estático en los datos SEV.....	36
Figura 12 Desplazamiento estático en los datos MT	37

Figura 13 Modelos del subsuelo MT invertidos de los datos teóricos (azul), de los datos desplazados con un factor de desplazamiento de 5 (verde) y de 0.2 (rojo).....	39
Figura 14 Modelos del subsuelo SEV invertidos de los datos teóricos (azul), de los datos desplazados con un factor de desplazamiento de 5 (verde) y de 0.2 (rojo).....	40
Figura 15 Gráficos de dispersión de la incertidumbre en los modelos del subsuelo invertidos debido al desplazamiento estático en los datos a) MT y b) SEV.....	42
Figura 16 Flujo de trabajo para corregir los datos MT	48
Figura 17 Flujo de trabajo para corregir los datos SEV.....	50
Figura 18 Resultados de la implementación del flujo de trabajo para corregir datos MT en datos desplazados por un factor $s = 5$. a) Resultado de inversión conjunta y modelamiento MT y b) ajuste de la curva observada a la calculada	52
Figura 19 Resultados de la implementación del flujo de trabajo para corregir datos SEV en datos desplazados por un factor $s = 5$. a) Resultado de inversión SEDT y modelamiento SEV y b) ajuste de la curva observada a la calculada	54
Figura 20 a) Datos MT y SEDT y b) Transformación de los datos SEDT a MT donde se observa la presencia de desplazamiento en los datos MT	55
Figura 21 Resultados de la implementación del flujo de trabajo para corregir datos MT en datos de campo. a) Resultado de inversión conjunta y modelamiento MT y b) ajuste de la curva observada a la calculada	57
Figura 22 Corrección del desplazamiento estático de los datos MT por el SGC. a) Inversión del sondeo TEM. b) Ajuste de la resistividad aparente MT a la del SEDT	58

- Figura 23** a) Modelos MT obtenidos del esquema del flujo de trabajo propuesto (Conjunta MT-SEDT) y de los datos sin corregir (MT). b) Comparación de los modelos MT con el modelo SEDT obtenido por el SGC.....60
- Figura 24** a) Datos SEV y SEDT y b) Transformación de los datos SEDT a SEV donde se observa la presencia de desplazamiento en los datos SEV61
- Figura 25** Resultados de la implementación del flujo de trabajo para corregir datos SEV en datos de campo. a) Resultado de inversión SEDT y modelamiento SEV y b) ajuste de la curva observada a la calculada.....62
- Figura 26** Modelos SEV obtenidos de los datos corregidos mediante el flujo de trabajo propuesto y de los datos sin corregir. b) Comparación de los modelos SEV con el modelo SEDT obtenido por el equipo de campo ABEM WalkTEM.....64

Resumen

Título: Integración multifísica para la corrección del desplazamiento estático en métodos eléctricos y disminución de la incertidumbre en los modelos del subsuelo *

Autor: Daniela Quintero Madariaga **

Palabras Clave: Integración multifísica, desplazamiento estático, SEV, SEDT, MT, Geotermia, Hidrogeología

Descripción: Los métodos eléctricos Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) y Magnetotelúrico (MT) son importantes para la exploración de los recursos del subsuelo, como las aguas subterráneas y los reservorios geotérmicos. Sin embargo, los datos SEV y MT sufren del desplazamiento estático, el cual es un tipo de distorsión galvánica que desplaza las curvas de resistividad aparente por un factor de escala desconocido. Este desplazamiento aumenta significativamente la incertidumbre en los modelos del subsuelo invertidos, provocando interpretaciones erróneas acerca del subsuelo. Para resolver estos problemas, en este trabajo se propone un enfoque de integración multifísica para corregir el desplazamiento de los datos SEV y MT, utilizando el Sondeo Electromagnético en el Dominio del Tiempo (SEDT) como observación de referencia. Este método no sufre del desplazamiento estático, ya que basa en las mediciones del campo magnético. A partir de modelamiento geofísico y relaciones de escalamiento de datos, se determinó que la integración de datos SEDT permite identificar el desplazamiento estático en los datos SEV y MT. En el caso de los datos MT, el desplazamiento estático se evidencia cuando las curvas de resistividad aparente MT y SEDT no coinciden en los periodos más bajos. Para los datos SEV, este desplazamiento se identifica cuando las curvas de resistividad aparente SEV y SEDT no coinciden en las longitudes de $AB/2$ más altas. Mediante inversiones de datos desplazados, se determinó que los desplazamientos hacia arriba ($s > 1$), provocan un aumento en las resistividades obtenidas en el modelo, mientras que los desplazamientos hacia abajo ($s < 1$), generan una disminución en las resistividades en comparación con el modelo teórico. Se detectaron rangos de desplazamiento en los que la interpretación de los modelos es confiable: entre 0.7 y 1.5 para los datos MT, y entre 0.7 y 2.5 para los SEV. Finalmente, se propusieron dos flujos de trabajo para corregir el desplazamiento, uno para los datos MT y otro para los SEV, y se implementaron tanto en datos sintéticos como en datos reales, donde se demostró que con el enfoque multifísico basado en la integración de datos SEDT, se observa, cuantifica y corrige el desplazamiento estático en los datos y se evidencia una disminución de la incertidumbre en los modelos del subsuelo obtenidos.

* Trabajo de Grado

** Facultad de Ingenierías Físicoquímicas. Escuela de Geología. Director: Yesid Paul Goyes Peñafiel. PhD (c) en Ciencias de la Computación. Codirector: Efraín Andrés Laverde Mera. Mgtr. en Geofísica.

Abstract

Title: Multiphysics integration for static shift correction in electrical methods and uncertainty reduction in subsurface models*

Autor: Daniela Quintero Madariaga**

Key Words: Multiphysics integration, static shift, VES, TDEM, MT, Geothermal, Hidrogeology

Description: The electrical methods Vertical Electrical Sounding (VES) and Magnetotelluric (MT) are important for the exploration of subsurface resources such as groundwater and geothermal reservoirs. However, both VES and MT data are affected by static shift, a type of galvanic distortion that vertically displaces the apparent resistivity curves by an unknown scaling factor. This shift significantly increases the uncertainty in the inverted subsurface models, leading to potential misinterpretations of the subsurface structure. To address these issues, this work proposes a multiphysics integration approach to correct the static shift in VES and MT data using Time-Domain Electromagnetic Sounding (TDEM) as a reference observation. This method is not affected by static shift, as it is based on magnetic field measurements. Based on geophysical modeling and data scaling relationships, it was determined that the integration of TDEM data allows for the identification of static shift in VES and MT data. In the case of MT data, the static shift is evident when the apparent resistivity curves of MT and TDEM do not match at the lowest periods. For VES data, the shift is identified when the apparent resistivity curves of VES and TDEM do not coincide at the largest AB/2 spacings. Through inversion of shifted data, it was determined that upward shifts ($s > 1$) lead to an increase in the resistivities obtained in the model, while downward shifts ($s < 1$) result in a decrease in resistivities compared to the theoretical model. Ranges of shift were identified within which model interpretation is reliable: between 0.7 and 1.5 for MT data, and between 0.7 and 2.5 for VES data. Finally, two workflows were proposed to correct the static shift, one for MT data and another for VES data. These were implemented on both synthetic and real data, demonstrating that with the multiphysics approach based on TDEM data integration, the static shift in the data can be observed, quantified, and corrected, resulting in a reduction of uncertainty in the resulting subsurface models.

* Bachelor Thesis

** Faculty of Physicochemical Engineering. Department of Geology. Advisor: Yesid Paul Goyes Peñafiel. PhD Candidate in Computer Science. Coadvisor: Efraín Andrés Laverde Mera. Mgtr. in Geophysics.

Introducción

En la exploración geofísica, comprender la geología del subsuelo en zonas complejas suele requerir la interpretación combinada de diferentes datos geofísicos. Esto se debe a que cada método presenta limitaciones inherentes, que pueden solucionarse mediante la aplicación complementaria de otro método geofísico. Además, algunos métodos pueden tener una respuesta limitada ante cierta configuración del subsuelo (Lyrio et al., 2020a). Los métodos que se basan en la medición del campo eléctrico, como el sondeo eléctrico vertical (SEV) y el magnetotelúrico (MT), sufren de una distorsión en los datos adquiridos conocida como desplazamiento estático. Esta distorsión se genera debido a heterogeneidades de la resistividad en las estructuras someras del subsuelo y se manifiesta como un desplazamiento vertical de la curva de resistividad aparente, multiplicada por un factor desconocido. Este efecto es independiente de la frecuencia y no afecta la fase, en el caso de MT (Santilano et al., 2018). La presencia de esta distorsión afecta la precisión de los modelos invertidos, lo cual conlleva a interpretaciones erróneas del subsuelo. Una solución para corregir esta distorsión es utilizando la multifísica, la cual integra distintos métodos geofísicos para mejorar la calidad y confiabilidad de los modelos. La multifísica es una herramienta ampliamente utilizada para diversas aplicaciones, como la exploración de hidrocarburos, geotermia, hidrogeología y minería (Deok Kim et al., 2020a; Martínez-Moreno et al., 2017a; Ogunbo et al., 2018a), debido a que proporciona información más completa del subsuelo y mejora la precisión del modelo. Asimismo, permite superar las limitaciones que se presentan en algunos métodos por la naturaleza del subsuelo, como la dispersión en imágenes sísmicas y el desplazamiento estático en los datos SEV y MT (Colombo et al., 2016a; Pellerin & Hohmann, 1990).

En este contexto, el objetivo de este trabajo de investigación se centra en la observación, cuantificación y corrección del desplazamiento estático presente en los datos SEV y MT, utilizando un enfoque multifísico. Para ello, se realizó el modelamiento computacional de los datos, usando modelos del subsuelo que representan diferentes escenarios de exploración geológica, a los cuales se les indujo sintéticamente el desplazamiento estático. Se evaluó el impacto del desplazamiento en los modelos del subsuelo invertidos, comparándolos con los modelos teóricos, mediante métricas de evaluación de la incertidumbre. Posteriormente, se desarrollaron e implementaron dos flujos de trabajo para corregir el desplazamiento estático en los datos SEV y MT, utilizando el método SEDT como observación de referencia, dado que no se ve afectado por este efecto. Finalmente, se aplicaron los flujos de trabajo propuestos en datos reales para validar su efectividad.

1. Planteamiento y justificación del problema

Los datos geofísicos son medidos a partir de diferentes métodos, como lo son los gravimétricos, magnéticos, sísmicos y eléctricos. Cada uno permite estimar la distribución de una propiedad física en el subsuelo. No obstante, cada método presenta sus propias ventajas y limitaciones. En particular, los métodos eléctricos permiten estimar la resistividad de las capas y permiten explorar desde profundidades someras hasta profundidades del manto, dependiendo del método utilizado. A través del proceso de inversión de los datos, se obtienen los modelos del subsuelo, que son importantes para la exploración geofísica de los recursos del subsuelo como los

reservorios geotérmicos, las aguas subterráneas, los hidrocarburos, los minerales y para aplicaciones en geología ambiental o geotecnia.

Uno de los factores que afecta la precisión de los modelos del subsuelo es el efecto denominado desplazamiento estático, una distorsión que se manifiesta como un desplazamiento vertical de la curva de resistividad aparente. Este efecto ocurre en los métodos que se basan en la medición del campo eléctrico en la superficie del terreno, siendo los datos magnetotelúricos y de resistividad de corriente continua los comúnmente más afectados. El problema consiste en que la presencia, magnitud y dirección del desplazamiento no pueden determinarse directamente a partir de los datos obtenidos con un único método. En el estado del arte, se ha propuesto el uso del sondeo electromagnético en el dominio del tiempo (SEDT) como método de referencia, porque que sus mediciones no se ven afectadas por el desplazamiento estático, ya que se basan en el campo magnético secundario. Sin embargo, en la mayoría de los estudios, los datos SEDT se emplean únicamente para corregir los datos afectados, sin aprovechar el potencial de las mediciones complementarias de este método y sin considerar los costos logísticos y económicos que implica realizar mediciones en el mismo punto con otro método geofísico. También se han propuesto métodos estadísticos como el 1) filtrado espacial (Berdichevsky et al., 1980), que agrupa curvas de medición similares por zonas, calcula el promedio logarítmico de resistividades aparentes por zona, y ajusta las curvas individuales con base en esa curva promedio. 2) Descomposición del tensor de impedancia (Groom & Bailey, 1989), en el que se descompone el tensor observado en un componente de distorsión y otro sin distorsión y 3) Corrección por fase (Tournerie et al., 2007), que utiliza la fase – no afectada por el desplazamiento estático - para modelar la resistividad corregida, basándose en la relación espacial entre las resistividades aparentes y las fases de

estaciones cercanas. No obstante, estos métodos son poco precisos y costosos computacionalmente. Por lo tanto, ha tomado fuerza el enfoque multifísico, que integra distintos datos como una estrategia más robusta para la corrección del desplazamiento estático (Árnason et al., 2010; Genedi et al., 2021; Pellerin & Hohmann, 1990).

Con base en lo anterior, en este trabajo de investigación se planteó la pregunta: ¿cómo observar, cuantificar y corregir el desplazamiento estático presente en los datos SEV y MT, integrando los datos SEDT como observación de referencia, para disminuir la incertidumbre en los modelos del subsuelo mediante software libre? La hipótesis planteada es que, mediante un enfoque multifísico que combine la física de los datos SEV y MT con la del SEDT - no afectados por desplazamiento estático - es posible identificar este desplazamiento y corregirlo con mayor confiabilidad.

Esta investigación surge de la necesidad de disponer de datos geofísicos más precisos, que permitan obtener modelos del subsuelo más confiables. Al combinar datos multifísicos en un flujo de trabajo, las ventajas de un método pueden compensar las limitaciones de otro, lo que permite una disminución de la incertidumbre y una mejor caracterización de las propiedades del subsuelo que la que se lograría con un solo método.

2. Objetivos

2.1. Objetivo General

Integrar los datos de los sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo (SEDT) con los del sondeo eléctrico vertical (SEV) y magnetotelúricos (MT), utilizando un enfoque multifísico, para la corrección del desplazamiento estático y disminución de la incertidumbre en los modelos del subsuelo.

2.2. Objetivos Específicos

Modelar computacionalmente la respuesta geofísica de los métodos eléctricos SEV, MT y SEDT en diferentes escenarios geológicos, para observar el desplazamiento estático.

Evaluar la incertidumbre en los modelos del subsuelo invertidos, debido al desplazamiento estático en los datos SEV y MT.

Desarrollar e implementar un flujo de trabajo para corregir el desplazamiento estático en SEV y MT mediante un enfoque multifísico, integrando los datos SEDT.

3. Marco teórico

3.1. Multifísica

La multifísica se refiere a la interpretación integrada de múltiples conjuntos de datos geofísicos, con el propósito de visualizar y caracterizar de manera más precisa el subsuelo, que es el objeto principal de estudio en la investigación geofísica. La esencia de la integración multifísica es utilizar y combinar información complementaria de dos o más conjuntos de datos geofísicos. El enfoque multifísico incluye la integración directa de diferentes conjuntos de datos, inversiones conjuntas de diferentes conjuntos de datos y aplicaciones en aprendizaje automático. El objetivo es producir modelos del subsuelo que brinden más información, tengan mayor resolución y presenten menor incertidumbre (Sun et al., 2020). Este enfoque puede aplicarse en múltiples escalas y aplicaciones. En la Tabla 1 se resumen diferentes casos de estudio donde se ha aplicado un enfoque de integración multifísica para aplicaciones tales como: eliminar la dispersión en imágenes sísmicas, identificar la intrusión de agua de mar en un acuífero costero, exploración de hidrocarburos y exploración minera.

Tabla 1

Algunas aplicaciones de la integración multifísica

Datos geofísicos utilizados	Aplicación	Referencia
Sísmicos y HTEM	Eliminar la dispersión en imágenes sísmicas, producida por anomalías de velocidad cercanas a la superficie (como karst, enjambres de fallas, <i>wadis</i>), mediante inversión conjunta con datos electromagnéticos transitorios transportados por helicóptero (HTEM), para obtener modelos de velocidad de alta resolución de la superficie cercana con objetivos de exploración de hidrocarburos en Arabia Saudita.	(Colombo et al., 2016b)

Datos geofísicos utilizados	Aplicación	Referencia
Sísmicos, gravedad, magnetismo y resistividad.	Construir un mapa de anomalías multifísicas, mediante la fusión de datos geofísicos de diferentes métodos. Se extraen las anomalías más importantes de cada conjunto de datos (asumiendo la misma fuente geológica) y se resaltan las regiones de alta correlación, que se interpretan con alta probabilidad de ocurrencia del objetivo.	(Lyrio et al., 2020b)
TRE y SEDT	Identificar la intrusión de agua de mar en acuíferos costeros del sur de Portugal, mediante inversión conjunta cuasi-2D de datos de tomografía de resistividad eléctrica (TRE) y sondeos electromagnéticos en el dominio del tiempo (SEDT). Mostraron que los resultados de las inversiones simples no coinciden con la información del pozo, mientras que los de la inversión conjunta sí.	(Martínez-Moreno et al., 2017b)
Sísmicos y SEDF	Exploración de hidrocarburos mediante la inversión conjunta del tiempo de propagación sísmica y de datos aéreos electromagnéticos en el dominio de la frecuencia (SEDF) para reconstruir un modelo de velocidad del subsuelo más confiable que el obtenido únicamente con las inversiones de tiempo de viaje.	(Ogunbo et al., 2018b)
Magnéticos y gravimétricos	Exploración minera en el centro de Columbia Británica mediante la inversión conjunta de datos magnéticos y de gravedad aerotransportados. Los resultados de la inversión conjunta demostraron ser confiables, ya que son consistentes con la información geológica previa de las unidades del área de estudio.	(Deok Kim et al., 2020b)

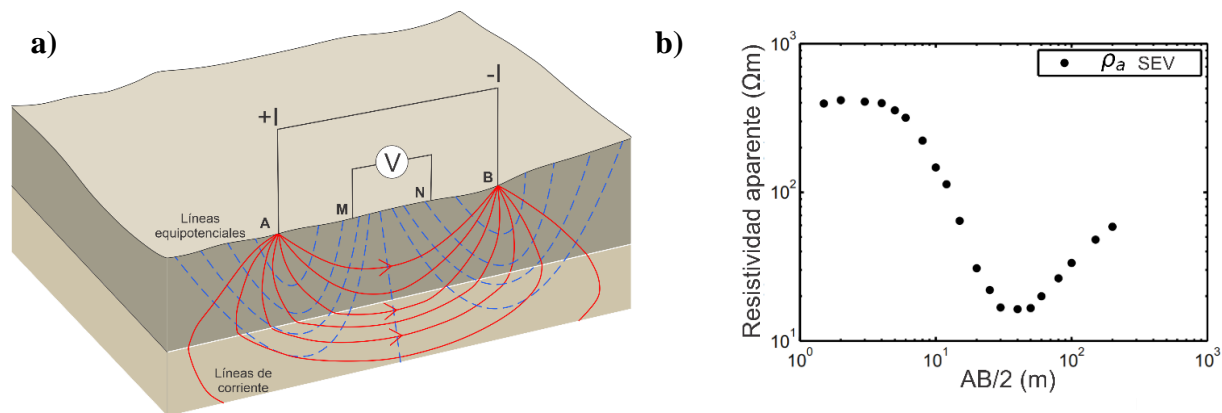
3.2. Métodos eléctricos

Los métodos eléctricos se utilizan para mapear la estructura de resistividad del subsuelo. Las aplicaciones pueden ser de cualquier escala: un estudio detallado de la resistividad para trazar la afluencia de agua de mar conductiva a un acuífero resistivo, un estudio de sondeos electromagnéticos en dominio del tiempo de alta potencia para trazar el espesor de volcanes resistivos sobre sedimentos conductivos posiblemente petrolíferos, o un estudio magnetotelúrico para detectar un manto conductivo anómalo para una disertación (Swift, 1988). A continuación, se describe brevemente cada método geofísico analizado en este trabajo de investigación.

El método Sondeo Eléctrico Vertical (SEV) es una técnica activa que utiliza un campo eléctrico para obtener la estructura de resistividad del subsuelo. Se inyecta corriente eléctrica en el subsuelo por medio de los electrodos A y B, la cual genera un campo eléctrico. Este campo eléctrico induce un potencial eléctrico, cuya diferencia se mide entre los electrodos M y N (Figura 1a). Los datos medidos se utilizan para calcular la resistividad aparente, que se obtiene suponiendo que el subsuelo está compuesto de capas homogéneas. La resistencia es voltaje sobre corriente (V/I) y multiplicado por el factor geométrico (k), se obtiene la resistividad aparente en función del $AB/2$ (Suriyapor, 2020) como se observa en la Figura 1b. El factor geométrico es un coeficiente que describe la disposición de las distancias de los cuatro electrodos en campo. Este método explora el subsuelo poco profundo, la profundidad de penetración aproximada es de $1/6 AB$ y ha sido aplicado principalmente para exploración de aguas subterráneas (Golovko et al., 2012).

Figura 1

a) Representación esquemática de la adquisición de SEV. b) Datos SEV en resistividad aparente sobre $AB/2$

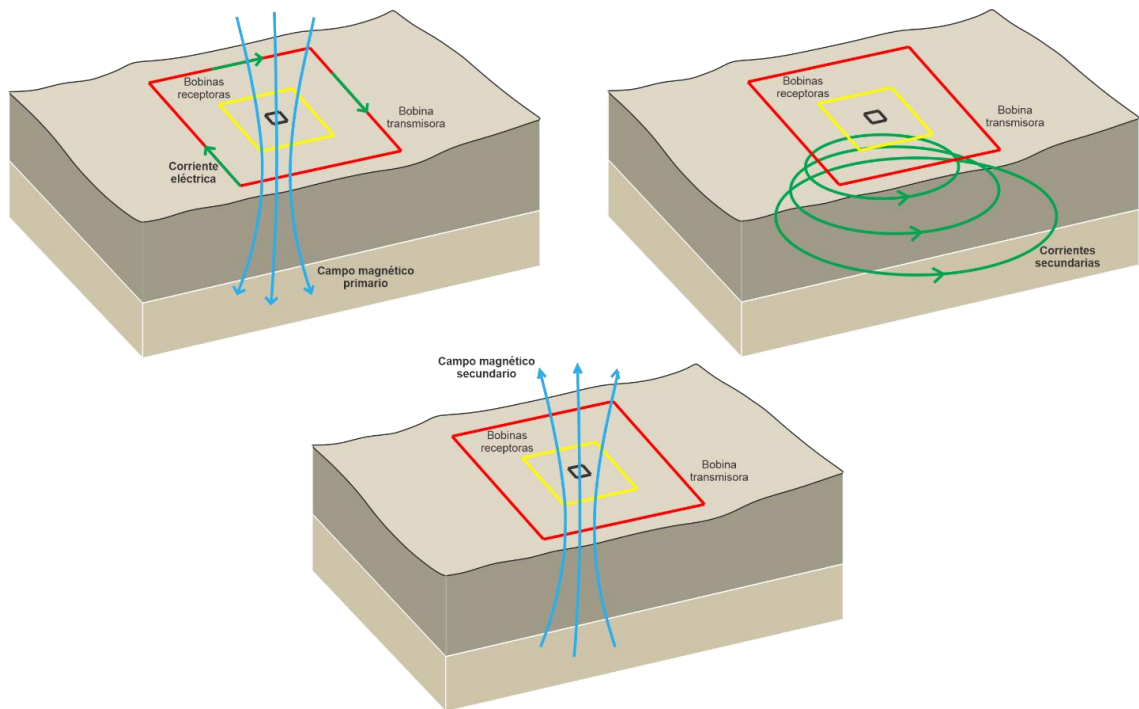


Nota. a) Modificado de “Métodos eléctricos y electromagnéticos aplicados a estudios paleolimnológicos: dos ejemplos de lagos desecados en la cuenca de México” (p. 284) por Bücker et al., 2017 *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. b) Modificado de “Inversión conjunta VES/TEM 1D mediante el uso del algoritmo de búsqueda aleatoria controlada (CRS)” (p. 165), por Bortolozzo et al., 2015, *Journal of Applied Geophysics*.

El método Sondeo Electromagnético en el Dominio del Tiempo (SEDT) es una técnica activa que utiliza la difusión de un campo electromagnético transitorio para estimar la conductividad del subsuelo. Se transmite una corriente eléctrica en la bobina transmisora, la cual genera un primer campo magnético transitorio en el subsuelo (Figura 2a). Este campo magnético cambiante produce un campo eléctrico en la tierra, que a su vez crea una corriente eléctrica (Figura 2b). Esas corrientes eléctricas secundarias crean un segundo campo magnético que se propaga hacia la superficie de la tierra (Figura 2c). Cuando el campo magnético secundario llega a la superficie, induce una fuerza electromotriz en las bobinas receptoras (McNeill, 1994). A partir de la medición de esta fuerza electromotriz se puede obtener la resistividad aparente en función del tiempo como se muestra en la Figura 3. Este método explora desde decenas de metros hasta profundidades de miles de metros y ha sido aplicado para exploración de aguas subterráneas (El-Kaliouby*, 2015), estudios ambientales (Martínez-Moreno et al., 2017b) y minería.

Figura 2

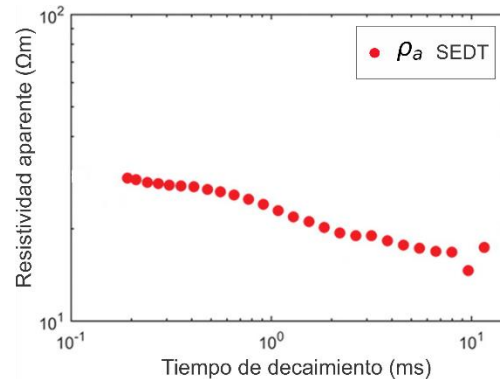
Representación esquemática de la adquisición de SEDT. a) Se genera el primer campo magnético transitorio, b) el cual produce corrientes secundarias y c) estas generan el campo magnético secundario



Nota. Modificado de “Métodos eléctricos y electromagnéticos aplicados a estudios paleolimnológicos: dos ejemplos de lagos desecados en la cuenca de México” (p. 284) por M. Bücker et al., 2017, *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*.

Figura 3

Datos SEDT en resistividad aparente sobre el tiempo.



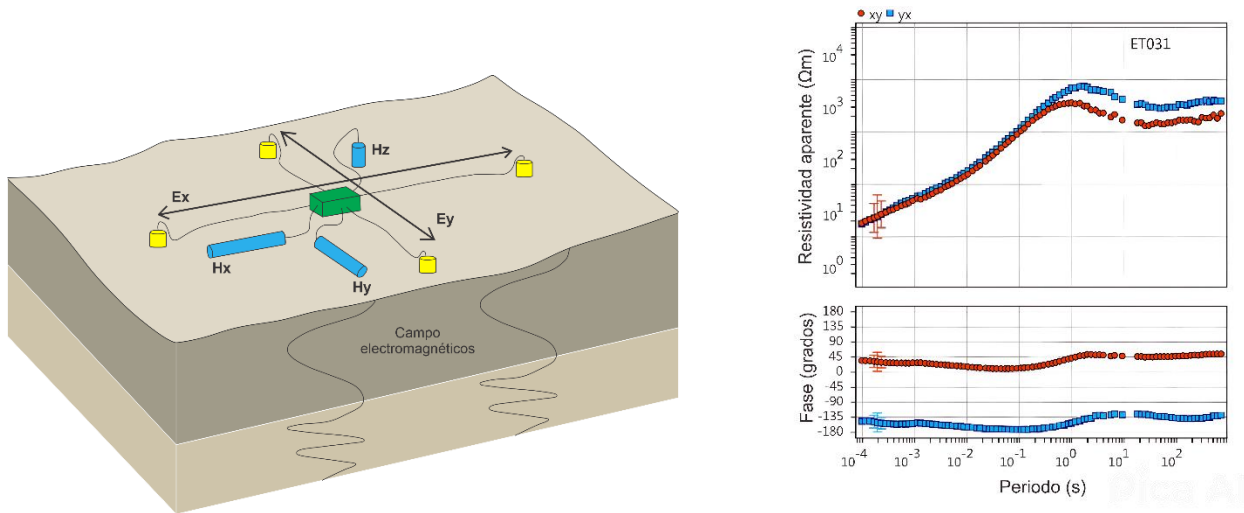
Nota. Modificado de “Modelado de velocidad de alta resolución mediante inversión conjunta TEM sísmico-aéreo: una nueva perspectiva para la caracterización cercana a la superficie” (p. 979) por Colombo et al., 2016, *The Leading Edge*.

El método Magnetotelúrico (MT) es una técnica pasiva que utiliza las variaciones del campo electromagnético que se genera de forma natural en la ionósfera y por tormentas eléctricas, para investigar la conductividad del subsuelo. Cuando los campos electromagnéticos llegan a la superficie terrestre, la mayor parte de su energía se refleja y una pequeña parte se propaga verticalmente hacia el interior de la Tierra (Vozoff, 1991). Los datos de campo se adquieren midiendo las variaciones de los campos eléctricos y magnéticos en la superficie terrestre, mediante electrodos y magnetómetros. Los componentes del campo magnético B_x , B_y y B_z están orientados en direcciones norte-sur, este-oeste y vertical, mientras que los electrodos E_x y E_y están orientados en direcciones norte-sur y este-oeste (Figura 4a). A partir de las series temporales registradas de los campos eléctricos y magnéticos se calcula el tensor de impedancia, que depende de la frecuencia (o periodo) y generalmente se presenta en términos de la resistividad aparente y la fase. Los valores de resistividad aparente y fase derivados de los datos MT contienen información sobre

la conductividad eléctrica del subsuelo a diversas profundidades, dependiendo de la frecuencia registrada (Figura 4b): los datos de alta frecuencia detectan las capas más superficiales, mientras que las bajas frecuencias las capas más profundas (Meqbel, 2021). Este método explora desde decenas de metros hasta cientos de kilómetros y ha sido aplicado para exploración en geotermia (Árnason et al., 2010b), hidrocarburos (Berdichevsky et al., 2015) y minería (Jiang et al., 2022a).

Figura 4

a) Representación esquemática de la adquisición de MT. b) Datos MT en resistividad aparente y fase para cada periodo muestreado



Nota. a) Modificado de “Métodos eléctricos y electromagnéticos aplicados a estudios paleolimnológicos: dos ejemplos de lagos desecados en la cuenca de México” (p. 284) por Búcker et al., 2017, *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*. b) Modificado de “Aplicación de datos magnetotelúricos multiescala a la exploración minera: un ejemplo de la región de East Tennant, en el norte de Australia” (p. 1632) por (Jiang et al., 2022b) *Geophysical Journal International*.

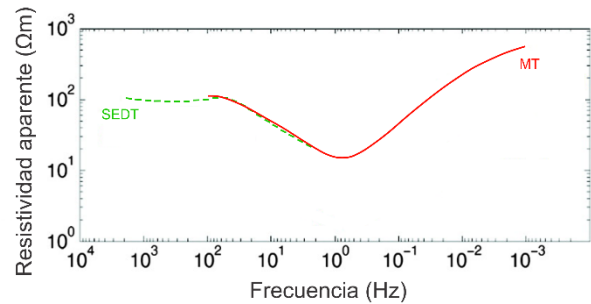
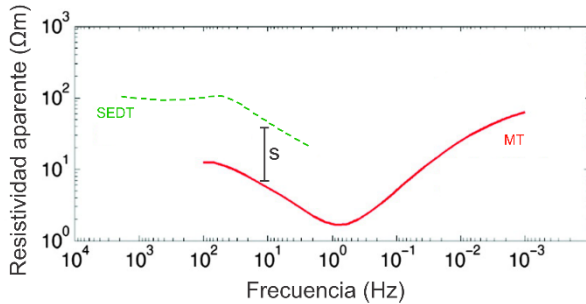
3.3. Desplazamiento estático en MT y SEV

El desplazamiento estático (*static shift*, en inglés) es un efecto de distorsión galvánica que desplaza las curvas de resistividad aparente por un factor de escala desconocido s (Irfan et al., 2010). El desplazamiento estático se observa comúnmente en los estudios MT (Figura 5a) y también ocurre en todos los métodos que utilizan mediciones del campo eléctrico para sondear el subsuelo (Caldwell et al., 2004) como lo es el SEV (Figura 5b). El fenómeno desplazamiento estático es causado por la falta de homogeneidad de las resistividades de las capas cerca de la superficie. Cuando hay una estructura conductora a poca profundidad, las ondas electromagnéticas propagadas causan una acumulación de cargas en la superficie del cuerpo que resulta en la distorsión del campo eléctrico. Esto puede conducir a una disminución del campo eléctrico medido en la superficie de la tierra y, por lo tanto, produce un cambio en el valor de la resistividad aparente con respecto al valor real (Meju, 2005a). El efecto de esto es un desplazamiento independiente de la frecuencia, para el caso de MT, de la curva de resistividad aparente por un multiplicador desconocido (Jones, 1988). La relación de fase entre los vectores de campo eléctrico y magnético no se verá afectada si la distorsión es galvánica. Es decir, la relación de fase será la misma que se observaría en ausencia de la distorsión (Caldwell et al., 2004).

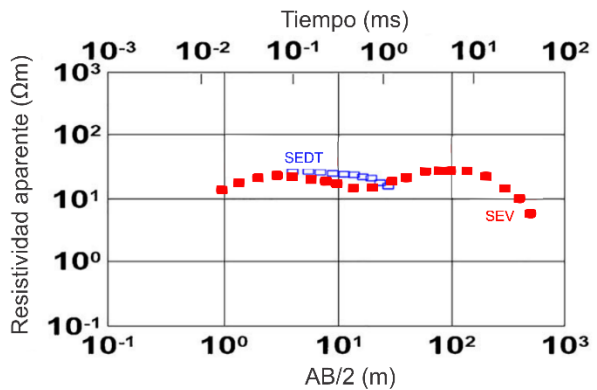
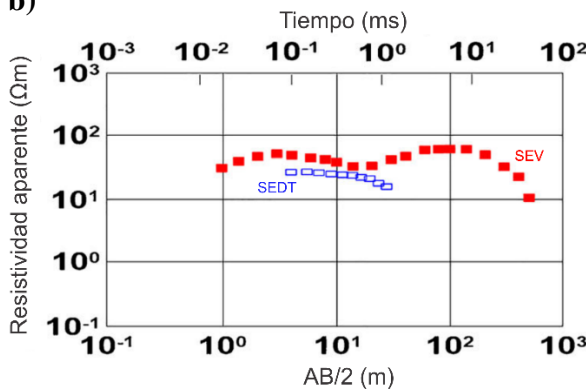
Figura 5

SED como medición de referencia para estimar visualmente el desplazamiento estático (s) antes y después de corregirlo, en datos a) *MT* y b) *SEV*

a)



b)



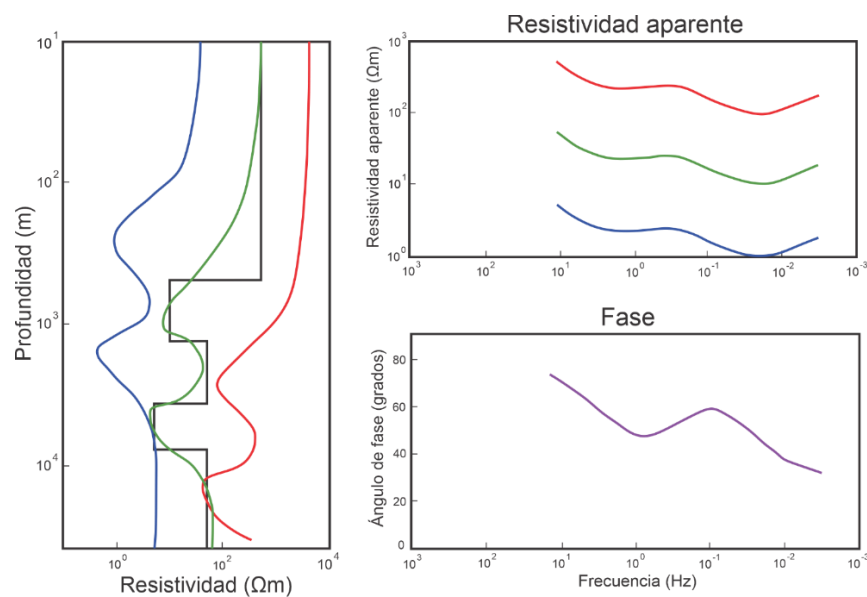
Nota. a) Modificado de “Optimización de enjambre de partículas para el análisis simultáneo de datos magnetotelúricos y electromagnéticos en el dominio del tiempo” (p. E155) por Santilano et al., 2018, *Geophysics*. b) Modificado de “Inversión conjunta de datos DC/TDEM: un estudio de caso del problema del desplazamiento estático en el área norte de la ciudad de Tenth of Ramadan, Egipto” (p. 7) por Genedi et., 2021, *Arabian Journal os Geosciences*.

La inversión de las curvas de resistividad aparente sin la corrección del desplazamiento estático produce modelos del subsuelo que no representan el modelo verdadero, con una incertidumbre alta. Este desplazamiento estático en los datos provoca cambios significativos en la resistividad y el espesor de las capas del subsuelo respecto a las del modelo verdadero. Un ejemplo

de esto para el caso de MT se muestra en la Figura 6, tomado de (GeoSci Developers, 2018). El modelo de resistividad real se muestra en negro (Figura 6a). La resistividad aparente (en verde) y la fase (en violeta) para este modelo se muestra en la Figura 6b. Se asume un desplazamiento estático que multiplica la resistividad aparente por 10 (mostrada en rojo en la Figura 6b). Si se invierten estos datos, la inversión recupera un modelo (rojo en la Figura 6a) que no representa el modelo verdadero. De manera similar, si el desplazamiento reduce la resistividad aparente en 0.1 (mostrado en azul en la Figura 6b), entonces la inversión recupera un modelo que es demasiado conductivo en comparación con el modelo verdadero (azul en la Figura 6a). Por lo tanto, para recuperar un modelo que se acerque al modelo verdadero, es necesario corregir los datos.

Figura 6

Ejemplo esquemático de la incertidumbre asociada a los modelos invertidos con desplazamiento estático.



Nota. Adaptado de EM GeoSci, por GeoSci Developers, 2018, https://em.geosci.xyz/content/geophysical_surveys/mt/practical_considerations.html

4. Metodología

Para el cumplimiento de los objetivos de esta investigación, se definieron tres fases, cada una con actividades específicas para cumplir cada objetivo. A continuación, se describen las actividades de cada fase y en la Figura 7 se muestra un esquema simplificado de la metodología utilizada.

4.1. Fase 1. Modelamiento computacional de la respuesta geofísica de los métodos eléctricos SEV, MT y SEDT en diferentes escenarios geológicos, para observar el desplazamiento estático.

Actividad 1.1. Construir modelos del subsuelo que representen diferentes escenarios de exploración geológica como hidrogeología, geotermia y/o yacimientos minerales.

Actividad 1.2. Modelar los datos de cada uno de los métodos eléctricos en los modelos del subsuelo de la actividad 1.1, mediante paquetes del lenguaje de programación Python para modelado e inversión geofísica como *Python. Geophysical Inversion and Modelling Library (pyGIMLi¹)* o *Simulation and Parameter Estimation in Geophysics (SimPEG²)*.

Actividad 1.3. Inducir el desplazamiento estático en los datos modelados por medio de factores controlados de desplazamiento y realizar el escalamiento de tiempo a espacio para los datos del SEV y de tiempo a periodo para los datos de MT, para poder observar el desplazamiento utilizando el SEDT como observación de referencia.

¹ <https://www.pygimli.org/>

² <https://simpeg.xyz/>

4.2. Fase 2. Evaluación de la incertidumbre en los modelos del subsuelo invertidos, debido al desplazamiento estático en los datos SEV y MT.

Actividad 2.1. Invertir los datos de la actividad 1.3 para obtener los modelos del subsuelo asociados a la respuesta geofísica afectada por el desplazamiento estático.

Actividad 2.2. Calcular las métricas relacionadas con la incertidumbre de los modelos del subsuelo invertidos, con respecto a los modelos teóricos e identificar los límites máximos de desplazamiento estático para una interpretación confiable del modelo.

4.3. Fase 3. Desarrollo e implementación de un flujo de trabajo para corregir el desplazamiento estático en SEV y MT mediante un enfoque multifísico, integrando los datos de SEDT.

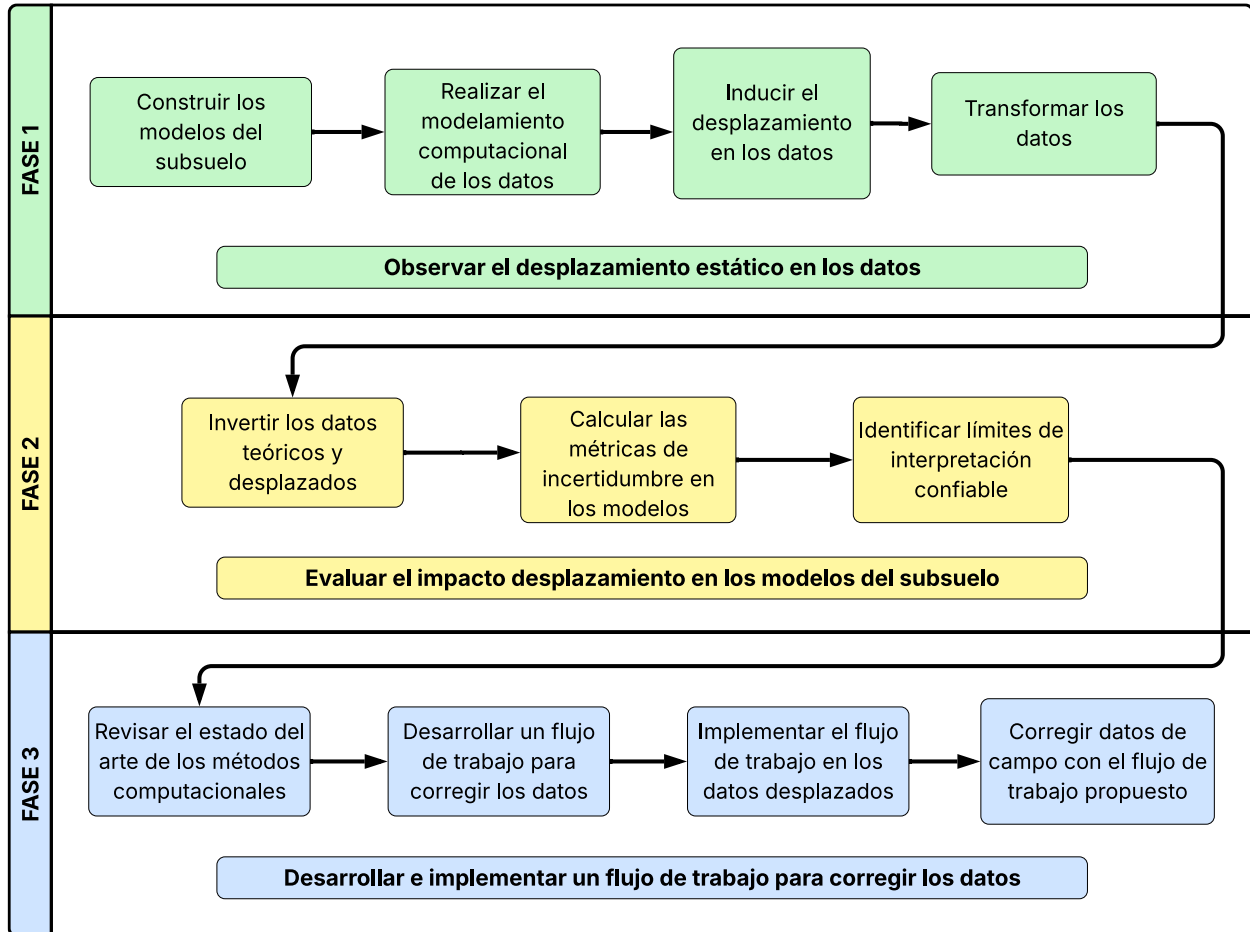
Actividad 3.1. Realizar una revisión sistemática del estado del arte de los métodos computacionales empleados para corregir el desplazamiento estático en los datos, donde utilicen métodos geofísicos complementarios. Analizar los métodos recopilados para identificar sus ventajas y limitaciones computacionales y geofísicas.

Actividad 3.2. Desarrollar un flujo de trabajo para la corrección del desplazamiento estático de los datos del SEV y MT, usando el SEDT como observación de referencia e implementarlo en los datos desplazados de la actividad 1.3.

Actividad 3.3. Extraer y leer datos de campo de SEV, SEDT y MT disponibles en el repositorio de datos geofísicos de la Universidad Industrial de Santander, administrado por el Semillero de Investigación en Geofísica Aplicada y Computacional (SIGAC). Estimar si hay presencia de desplazamiento y corregirla mediante el flujo de trabajo propuesto. Además, evaluar la incertidumbre en los modelos obtenidos de los datos sin corregir.

Figura 7

Esquema de la metodología del proyecto de investigación



5. Resultados

5.1. Modelamiento computacional de la respuesta geofísica de los métodos eléctricos SEV, MT y SEDT en diferentes escenarios geológicos, para observar el desplazamiento estático.

En esta primera fase, se construyeron modelos de exploración hidrogeológica y geotérmica, para simular la adquisición de los datos geofísicos en distintos escenarios geológicos. Se realizó el modelamiento de los datos SEV y SEDT en el modelo hidrogeológico y de MT y SEDT en el modelo geotérmico, con el objetivo de obtener la respuesta geofísica teórica de cada método en los modelos. En ambos modelos, se realizó el modelamiento de los datos SEDT para tenerlos como referencia para el desplazamiento de los datos SEV y MT, ya que este método no se ve afectado por desplazamiento estático. Posteriormente, se indujeron diferentes factores de desplazamiento en los datos SEV y MT para simular el efecto que este fenómeno produce en mediciones reales, debido a las heterogeneidades del subsuelo. Esto permitió obtener tanto la respuesta geofísica ideal del modelo como la respuesta afectada, que es la que comúnmente se obtiene en campo. Finalmente, se aplicaron relaciones de escalamiento de los datos para poder observar el desplazamiento en los datos SEV y MT.

5.1.1. Modelos del subsuelo de exploración geológica

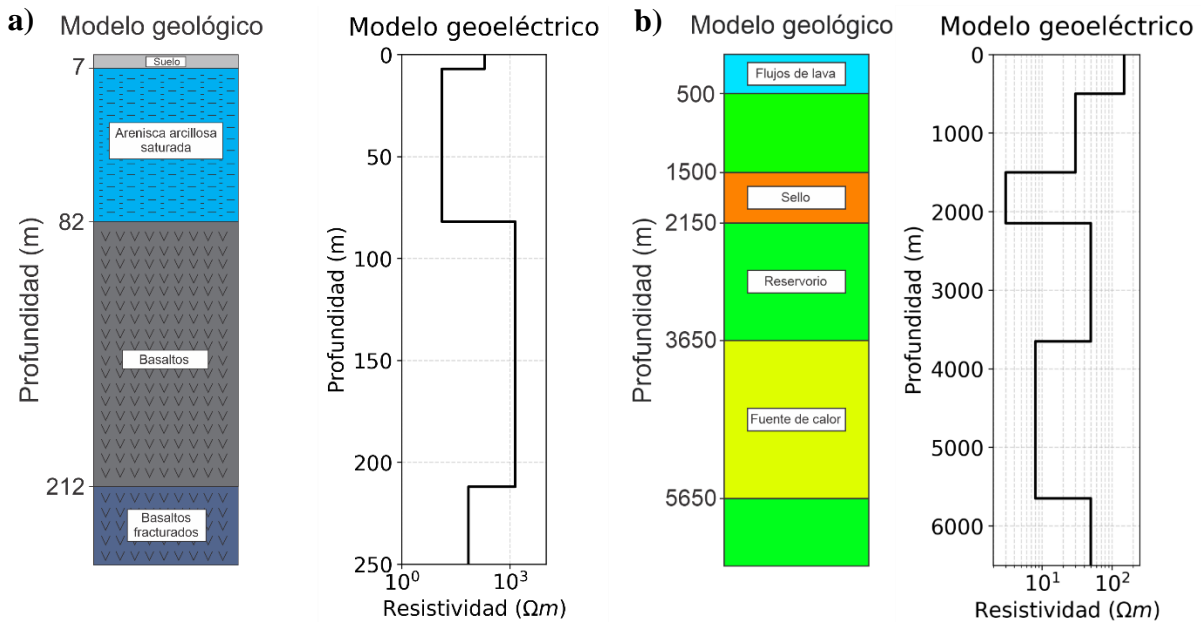
Se construyeron modelos del subsuelo que representan escenarios de exploración geofísica con métodos eléctricos: un modelo hidrogeológico y un modelo geotérmico, tomando en cuenta modelos del subsuelo obtenidos mediante inversión de datos eléctricos adquiridos en dos lugares del planeta.

La Figura 8a representa el modelo de exploración hidrogeológica obtenido en la Cuenca del Paraná, Brasil (Leite et al. 2018). El modelo está constituido por cuatro capas: la primera con un espesor de 7 metros (m), 200 ohmio por metro (Ωm) de resistividad y representa el suelo, la segunda con un espesor de 75 m, 13 Ωm y representa el acuífero compuesto de areniscas arcillosas saturadas de agua, la tercera con un espesor de 130 m y 1400 Ωm y representa basaltos y la cuarta con una resistividad de 70 Ωm y representa basaltos fracturados evidenciado por la disminución de la resistividad.

La Figura 8b representa el modelo de exploración geotérmica obtenido en el Volcán Azufra, Colombia (Rodríguez-Rodríguez, 2018). El modelo está constituido por cinco capas: la primera con 500 m y 150 Ωm de espesor y resistividad, respectivamente y representa flujos de lava poco alterados y fracturados, la segunda con 1000 m y 30 Ωm , la tercera con 650 m y 3 Ωm y representa el sello geotérmico, la cuarta con 1500 m y 50 Ωm y representa el reservorio geotérmico, y la quinta con 2000 m y 8 Ωm y representa la fuente de calor del sistema geotérmico.

Figura 8

Modelos del subsuelo de exploración geológica, a) hidrogeológico y b) geotérmico



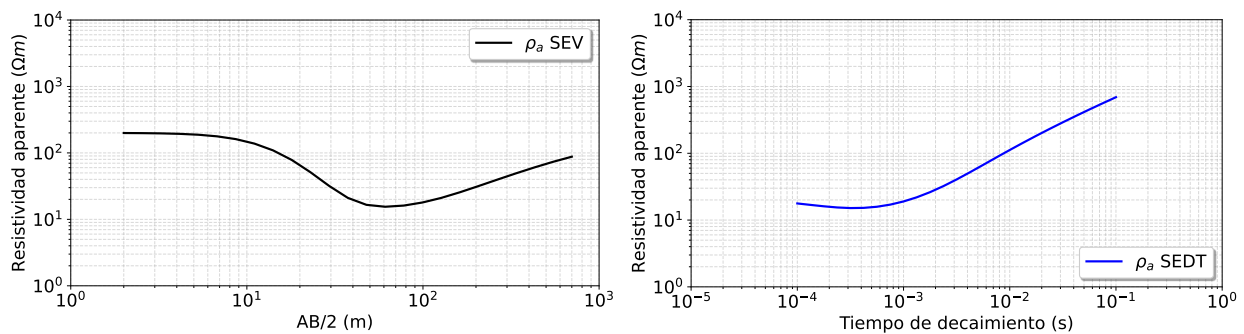
5.1.2. Modelamiento computacional de los datos

Se realizó el modelamiento computacional de los datos SEV, SEDT y MT, los cuales son los métodos seleccionados para el análisis del desplazamiento estático, en los modelos del subsuelo construidos previamente. En el modelo hidrogeológico se realizó el modelamiento de los datos SEV debido a que este método geofísico es el comúnmente utilizado para exploración de aguas subterráneas y por su alcance somero, y para el geotérmico se modelaron los datos MT debido a que este método geofísico es el comúnmente utilizado para exploración de reservorios geotérmicos y por su alcance a profundidades mayores. Finalmente, para ambos modelos se realizó el modelamiento de los datos SEDT, debido a que este método no sufre de desplazamiento estático. El modelamiento directo de los datos se realizó utilizando el lenguaje Python con las librerías SimPEG y Pygimli.

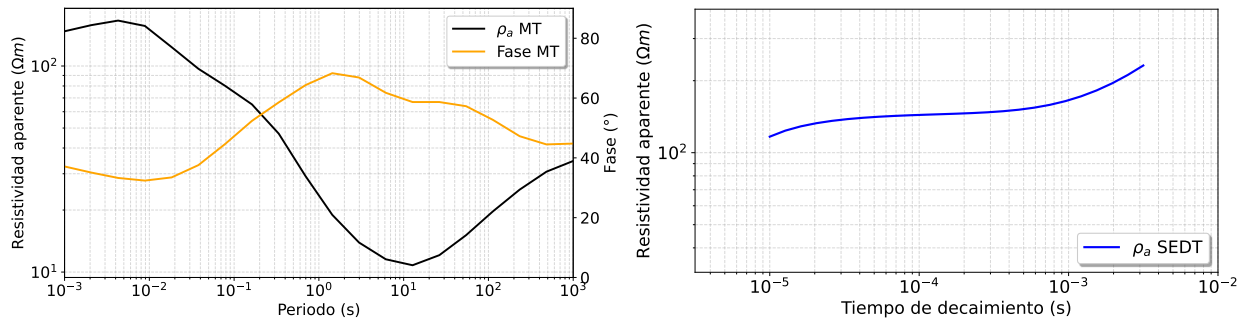
Los datos SEV y SEDT obtenidos en el modelo hidrogeológico se muestran en la Figura 9. Para el modelamiento SEV se utilizaron 25 medidas con un arreglo tipo Schlumberger, AB/2 mínimo de 2 m y máximo de 700 m. Para el SEDT se utilizaron 25 medidas con una antena transmisora cuadrada de 40 m \times 40 m y con tiempos de decaimiento de 10^{-4} segundos (s) a 10^{-1} s. En la Figura 9, la curva de datos SEV muestra dos cambios significativos de resistividad aparente, mientras que la curva de datos SEDT muestra un solo cambio suave en la resistividad aparente.

Figura 9

Datos simulados en el modelo hidrogeológico



Los datos MT y SEDT obtenidos en el modelo geotérmico se muestran en la Figura 10. Para el modelamiento MT se utilizaron 20 medidas con periodos en un rango de 10^{-3} segundos (s) a 10^3 s. Para el SEDT se utilizaron 25 medidas con una antena transmisora cuadrada de 100 m \times 100 m y con tiempos de decaimiento de 10^{-5} s hasta $10^{-2.5}$ s. En la Figura 10, se muestra que la curva de resistividad aparente MT muestra dos cambios significativos, mientras que la curva de resistividad aparente SEDT muestra solo un cambio suave.

Figura 10*Datos simulados en el modelo geotérmico*

5.1.3. Desplazamiento estático

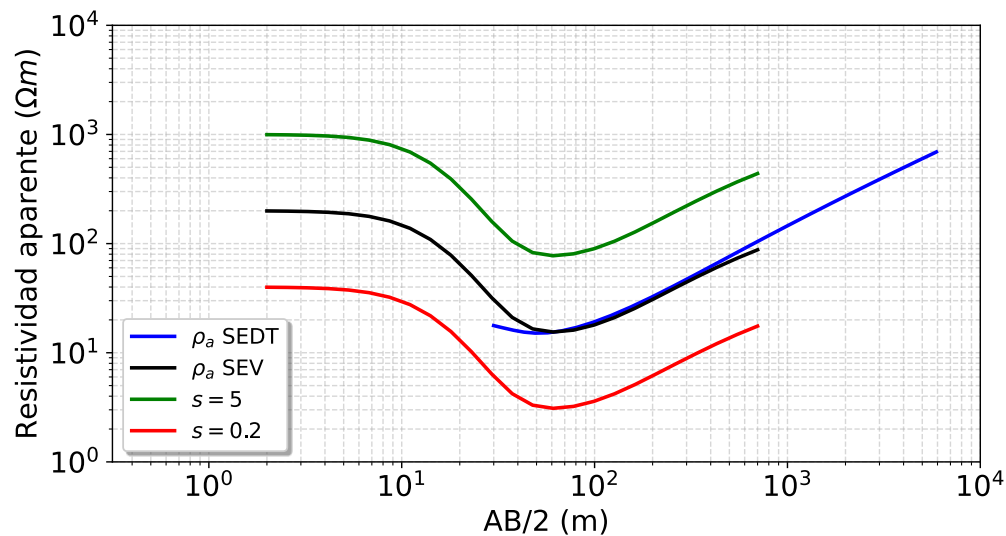
Se indujeron factores de desplazamiento estático con un rango entre $s = 0.2$ a $s = 5$ en los datos modelados SEV y MT, que desplazarán la curva de datos hacia arriba y hacia abajo. Para así obtener de manera sintética la respuesta geofísica afectada de los métodos SEV y MT debido a la presencia de heterogeneidades superficiales de resistividad que producen este efecto. En la práctica, la presencia, magnitud y dirección de este desplazamiento no se puede determinar únicamente a partir de la curva de datos SEV o MT, pero si se puede observar y cuantificar con la curva de datos SEDT, ya que, como se mencionó anteriormente, este método no se ve afectado por el efecto. Pero surge la pregunta de cómo comparar los datos con dos parámetros de adquisición diferentes, como la longitud $AB/2$ y el tiempo de decaimiento, para el caso de SEV y SEDT o la frecuencia y el tiempo de decaimiento, para el caso de MT y SEDT. En el estado del arte, se han propuesto relaciones de escalamiento de los datos, que facilitan la comparación, correlación e integración de datos de dos métodos geofísicos diferentes. Para realizar el escalamiento de tiempo (SEDT) a espacio (SEV) se usó la ecuación $L = 711.8\sqrt{t\rho}$ (m) (Meju, 2005a), donde L es la distancia $AB/2$ que le corresponde a los tiempos de decaimiento SEDT, t es el tiempo de

decaimiento del SEDT (s) y ρ es la resistividad aparente del SEDT (Ωm). Por otro lado, para realizar el escalamiento de tiempo (SEDT) a periodo (MT) se usó la ecuación $T = t / 0.194$ (Sternberg et al., 1988), donde T es el periodo del MT que le corresponde a los tiempos de decaimiento SEDT y t es el tiempo de decaimiento del SEDT (s).

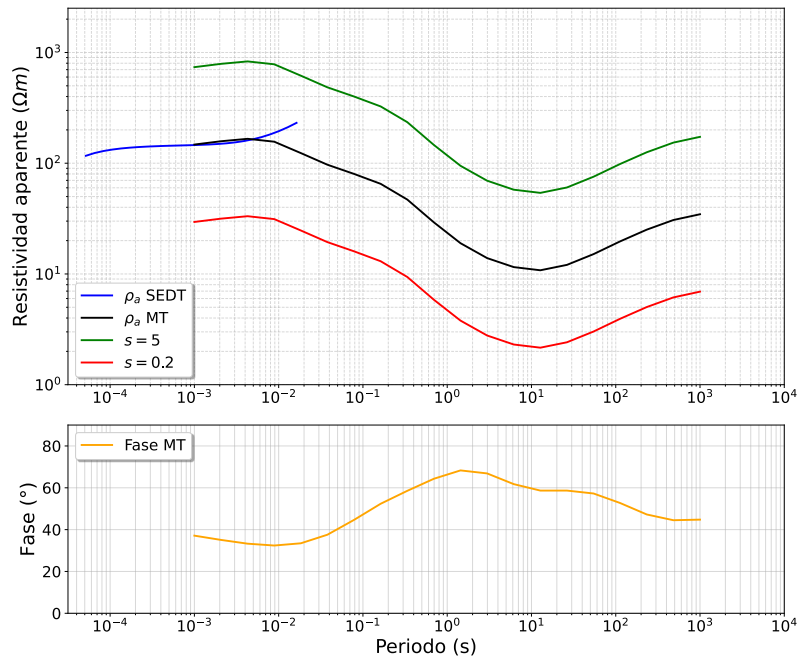
En la Figura 11 se muestran dos de los factores de desplazamiento (s) aplicados a los datos SEV, $s = 5$ para un desplazamiento hacia arriba y de su inverso multiplicativo $s = 0.2$ para un desplazamiento hacia abajo, los cuales son los factores de mayor y menor rango, respectivamente.

Figura 11

Desplazamiento estático en los datos SEV



En la Figura 12 se muestran dos de los factores de desplazamiento (s) aplicados a los datos MT, igualmente fueron $s = 5$ para un desplazamiento hacia arriba y de su inverso multiplicativo $s = 0.2$ para un desplazamiento hacia abajo, que corresponden a los factores de mayor y menor rango, respectivamente. Debido a que la fase MT no se afecta por desplazamiento estático, no es necesario aplicar ningún factor de desplazamiento.

Figura 12*Desplazamiento estático en los datos MT*

Como se observa en las Figura 11 y Figura 12, en ausencia de desplazamiento estático, los datos tanto de SEV y SEDT y de MT y SEDT se superponen, debido a que los datos son modelados en el mismo punto del subsuelo, por lo que la respuesta debe coincidir. La superposición de las curvas SEDT y MT ocurre solo para los periodos más largos de la curva SEDT, debido a la menor profundidad de investigación con respecto a la de MT. La de SEV y SEDT ocurre solo para los espacios de los electrodos AB más largos de la curva SEV, debido a la menor profundidad de investigación con respecto a la de SEDT. Por otro lado, en presencia de desplazamiento estático se puede observar que los datos no se superponen, lo que evidencia el desplazamiento de los datos.

5.2. Evaluación de la incertidumbre en los modelos del subsuelo invertidos, debido al desplazamiento estático en los datos SEV y MT.

Para la segunda fase, se realizó la inversión de los datos SEV y MT teóricos y desplazados, con el objetivo de evaluar el impacto del desplazamiento estático de los datos en los modelos del subsuelo invertidos, respecto a los modelos del subsuelo producto de la inversión de los datos teóricos. Para evaluar la incertidumbre en los modelos se calculó el *Mean Square Error* (MSE), que es una métrica estándar utilizada en la evaluación de modelos (Hodson, 2022), que cuantifica la diferencia cuadrática promedio entre los valores de resistividad del modelo invertido y los valores de resistividad del modelo teórico.

5.2.1. Inversión de los datos MT y SEV

Las inversiones de los datos MT y SEV se realizaron utilizando el lenguaje Python con la librería SimPEG, en donde la inversión se formula como un problema de optimización iterativo basado en el método Gauss-Newton, donde se minimiza el desajuste entre los datos observados y modelados, junto con un término de regularización para estabilizar la solución del modelo (Cockett et al., 2015). Las inversiones fueron tipo *smooth* en las cuales solo se invierten los parámetros de la resistividad sin tener en cuenta los espesores de las capas. En las Figura 13 y Figura 14 se muestra un ejemplo de los resultados de la inversión MT y SEV, respectivamente, de los datos desplazados por el factor de desplazamiento de mayor rango ($s = 5$), por el de menor rango ($s = 0.2$) y de los datos no desplazados. En color azul se muestra el modelo obtenido a partir de los datos teóricos, en color verde el obtenido a partir de los datos desplazados por el factor de mayor rango y en rojo los desplazados por el factor de menor rango. Cabe destacar que las inversiones de todos los conjuntos de datos MT y SEV se realizaron en las mismas condiciones, es decir, con los

mismos parámetros de inversión (modelo inicial, arreglo de adquisición, ruido de los datos, algoritmo de optimización, directivas, criterios de parada, entre otros) para que los modelos invertidos fueran comparables.

Figura 13

Modelos del subsuelo MT invertidos de los datos teóricos (azul), de los datos desplazados con un factor de desplazamiento de 5 (verde) y de 0.2 (rojo)

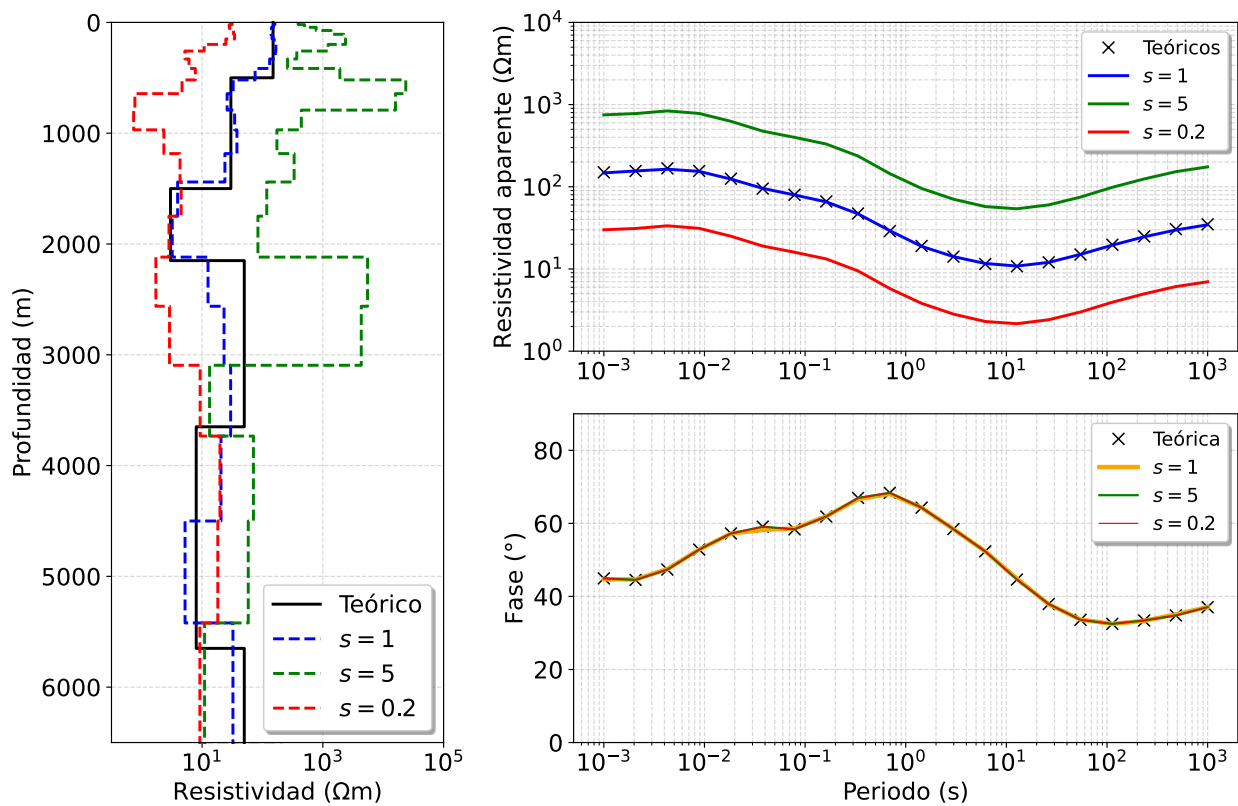
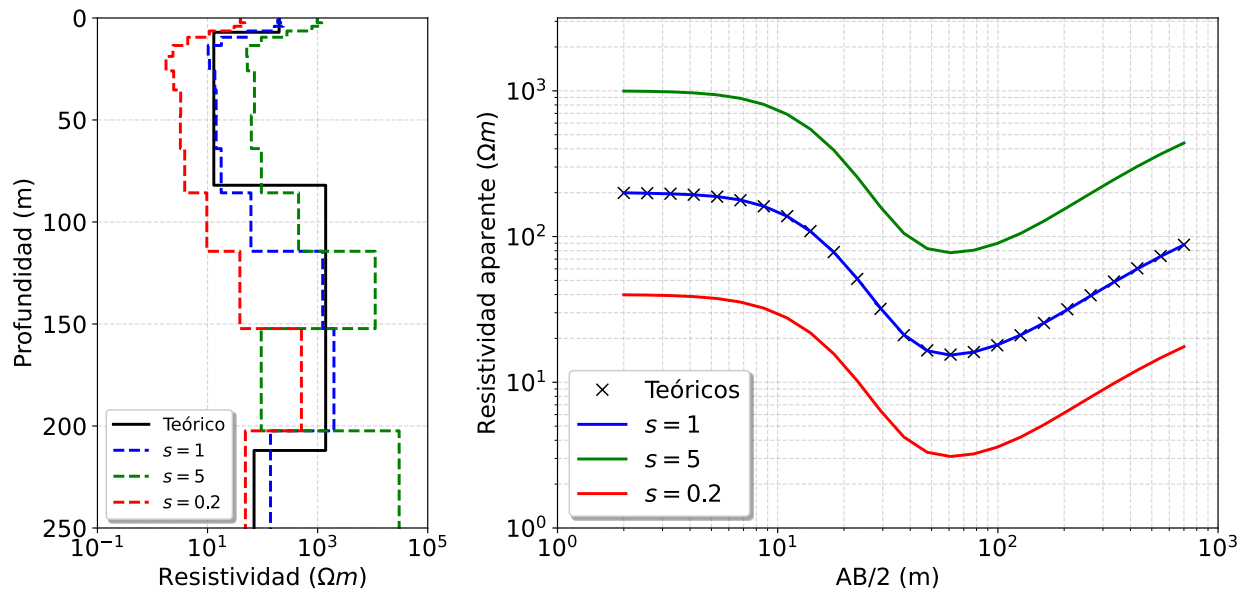


Figura 14

Modelos del subsuelo SEV invertidos de los datos teóricos (azul), de los datos desplazados con un factor de desplazamiento de 5 (verde) y de 0.2 (rojo)



5.2.2. Incertidumbre en los modelos del subsuelo invertidos

En las Figura 13 y Figura 14 se puede observar que cuando la curva de datos está desplazada hacia arriba, las resistividades del modelo aumentan significativamente y, por el contrario, cuando la curva de datos está desplazada hacia abajo las resistividades del modelo disminuyen. Esto se debe, de acuerdo con la teoría, a que cuando el cuerpo anómalo cercano a la superficie es conductivo se genera una acumulación de carga del campo eléctrico y por tanto disminuye la medición de la resistividad aparente adquirida en superficie. También se observa que, en presencia del mismo factor de desplazamiento en datos MT y SEV, son los modelos MT lo que se ven más afectados en comparación con los modelos SEV. Para el modelo MT de los datos con desplazamiento $s = 5$ se obtuvo un valor de MSE igual a 1.78, mientras que de los datos con desplazamiento $s = 0.2$ se obtuvo un MSE de 0.89. Por otro lado, para el modelo SEV de los datos

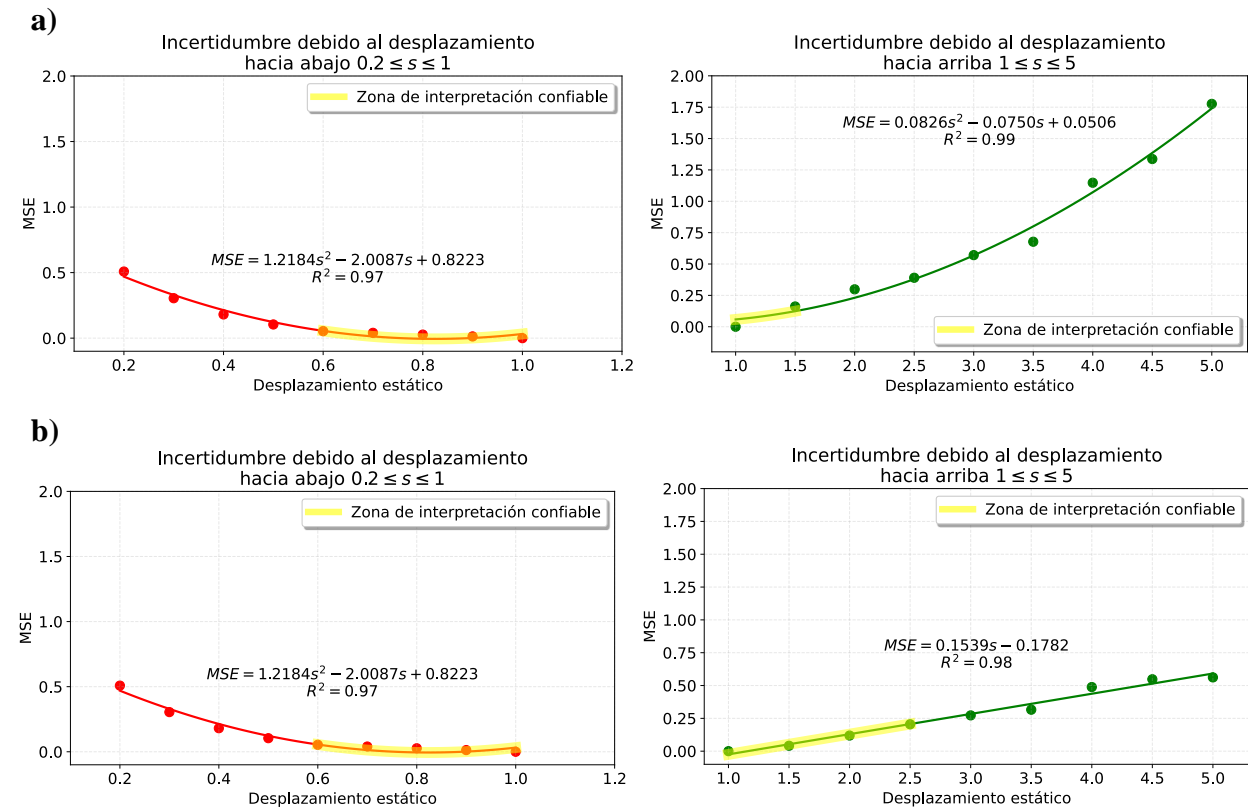
con desplazamiento $s = 5$ se obtuvo un valor de MSE igual a 0.56 y para los datos con desplazamiento $s = 0.2$ se obtuvo un MSE de 0.51. Además, con las inversiones de los datos MT desplazados, se evidencia que la fase no se ve afectada por desplazamiento estático, debido a que la estimación de la fase producto de las inversiones de los datos desplazados, se ajusta a la curva de fase teórica, comprobando así que la fase no sufre del desplazamiento estático.

Teniendo en cuenta objetivos de exploración hidrogeológica o geotérmica, en presencia de desplazamiento estático de los datos SEV y MT adquiridos, las resistividades de los modelos obtenidos pueden variar en órdenes de magnitud con respecto a las reales, pudiendo descartar la presencia de aguas subterráneas o de reservorios geotérmicos.

En la Figura 15 se muestran los resultados del cálculo de la incertidumbre en los modelos MT (Figura 15a) y en los modelos SEV (Figura 15b) para todos los factores de desplazamiento estático inducidos. Para el caso de MT, se observa que la incertidumbre aumenta de forma cuadrática tanto si el desplazamiento aumenta hacia arriba o hacia abajo. Además, la incertidumbre es mayor cuando la curva se desplaza hacia arriba que cuando se desplaza hacia abajo. Para el caso de SEV, se observa que la incertidumbre aumenta linealmente cuando el desplazamiento vertical hacia arriba aumenta, y aumenta de forma cuadrática cuando el desplazamiento vertical hacia abajo aumenta. En comparación con MT, las incertidumbres de los modelos son muy similares cuando el desplazamiento es hacia arriba o hacia abajo. En los gráficos de dispersión se delimitó una zona de interpretación, que representa hasta que factor de desplazamiento estático en los datos se puede realizar una interpretación confiable sobre el modelo, es decir, que no hay una variación contrastante con la resistividad real del modelo.

Figura 15

Gráficos de dispersión de la incertidumbre en los modelos del subsuelo invertidos debido al desplazamiento estático en los datos a) MT y b) SEV



5.3. Desarrollo e implementación de un flujo de trabajo para corregir el desplazamiento estático en SEV y MT mediante un enfoque multifísico, integrando los datos de SEDT.

Para la tercera fase se realizó una revisión bibliográfica de los métodos computacionales del estado del arte empleados para corregir el desplazamiento estático de los datos MT y SEV. Se analizaron sus ventajas y limitaciones geofísicas y computacionales con el objetivo de desarrollar e implementar un flujo de trabajo para la corrección del desplazamiento estático en datos MT y SEV. Finalmente, los flujos de trabajo propuestos se validaron con datos MT y SEV de campo.

5.3.1. Revisión del estado del arte de los métodos computacionales para corregir el desplazamiento estático

En el estado del arte se han propuesto varios esquemas para corregir el desplazamiento estático de datos SEV y MT, en los cuales comúnmente utilizan el análisis conjunto de SEDT-SEV y SEDT-MT debido a que las mediciones SEDT no se ven afectadas por el desplazamiento. A continuación, se describen los métodos enfocados en la corrección de datos MT.

Pellerin y Hohmann (1990), proponen un esquema de corrección para ajustar las curvas de MT distorsionadas a sus valores correctos, utilizando una inversión 1D de un sondeo SEDT adquirido en el mismo lugar que el sondeo MT. En el modelo obtenido del SEDT, se modelan datos MT para frecuencias de 1 Hz o mayores. Posteriormente, la curva de datos MT observada se ajusta a la posición de la curva MT calculada, eliminando el desplazamiento estático.

Sternberg et al. (1988), proponen dos esquemas de corrección del desplazamiento estático en datos MT. 1) Un esquema de inversión conjunta de resistividad aparente de MT y SEDT, donde se incluye un parámetro en la inversión computacional que permite desplazamientos verticales en la curva de resistividad aparente de MT para tener en cuenta los desplazamientos estáticos y 2) una comparación gráfica entre las resistividades de MT y SEDT para eliminar el desplazamiento de los datos MT. Este método se basa en la correlación entre la profundidad de difusión del SEDT y la profundidad de penetración del MT. En una ubicación determinada y a la misma profundidad de penetración, el tiempo SEDT (t) es equivalente al periodo MT (T) según la siguiente ecuación.

$$T = t / 0.194 \quad (1)$$

Así se pueden comparar las curvas de datos y ajustar manualmente la curva MT a la posición de la curva de datos SEDT, eliminando el desplazamiento estático.

Meju (1996), propone un esquema de inversión conjunta de la curva de resistividad aparente del SEDT y la curva de datos de fase del MT, que no se afecta por desplazamiento estático. Una vez realizada la inversión conjunta, la curva calculada de resistividad aparente de MT coincide con la curva de datos del SEDT, eliminando el desplazamiento estático en los datos MT.

A continuación, se describen los métodos enfocados en la corrección de datos SEV.

Meju (2005), propone dos esquemas para la corrección del desplazamiento estático en datos SEV. 1) Un esquema de inversión conjunta de SEV y SEDT, donde el factor de desplazamiento estático se incluye como un parámetro a determinar, para obtener un modelo del subsuelo que ajuste tanto los datos SEV como los SEDT, teniendo en cuenta el desplazamiento estático y 2) una comparación gráfica entre las resistividades de SEV y SEDT para eliminar el desplazamiento de los datos SEV. Este método se basa en la determinación empírica (a partir de modelado numérico y estudios de campo de SEV y SEDT colocalizados en diferentes entornos) de que los datos de SEV y SEDT pueden compararse utilizando la relación

$$L = 711,8\sqrt{t\rho} \text{ (m)} \quad (2)$$

donde L es la distancia $AB/2$ que le corresponde a los tiempos de decaimiento SEDT, t es el tiempo de decaimiento del SEDT (s) y ρ es la resistividad aparente del SEDT (Ωm). Así pueden compararse las curvas de datos y ajustar manualmente la curva SEV a la posición de la curva de datos SEDT, eliminando el desplazamiento estático. Recientemente, otros autores han implementado el algoritmo de inversión conjunta propuesto por Meju (2005) para estudios de exploración hidrogeológica. (Genedi et al., 2021b; Sultan & Santos, 2009)

Las ventajas y limitaciones de cada método del estado del arte para corregir el desplazamiento estático se muestran en la Tabla 2.

Tabla 2

Ventajas y limitaciones de los métodos computacionales para corregir el desplazamiento en los datos SEV y MT

	Método	Ventajas	Limitaciones	Referencia
MT	Inversión electromagnética transitoria	Al obtener el modelo geoelectrico del SEDT, la corrección es más robusta.	Los datos MT deben evidenciar unidimensionalidad. Es necesario que los sondeos SEDT abarquen un rango de tiempos amplio para estimar el modeo somero, lo que aumenta su costo.	(Pellerin & Hohmann, 1990)
	Transformación directa	Método rápido y sencillo.	La relación de equivalencia de los datos puede no cumplirse para diferentes complejidades geológicas. Es necesario que los sondeos SEDT abarquen un rango de tiempos amplio para la superposición efectiva de las curvas, lo que aumenta su costo.	(Sternberg et al., 1988b)
	Inversión conjunta resistividades MT y SEDT	No se necesitan procesar previamente los datos o corregir las curvas desplazadas. No requiere superposición de curvas, por lo que no es necesario que los sondeos SEDT abarquen un rango de tiempos amplio.	Mayor demanda computacional en comparación con el método de Meju (1996), debido a que además de estimar el modelo del subsuelo, la inversión debe estimar el parámetro de desplazamiento estático.	
	Inversión conjunta fase MT y resistividad SEDT	Eficiente. No se necesitan procesar previamente los datos o corregir las curvas desplazadas. No requiere superposición de curvas, por lo que no es necesario que los sondeos SEDT abarquen un rango de tiempos amplio.	Mayor demanda computacional en comparación con métodos directos.	(Meju, 1996b)

	Método	Ventajas	Limitaciones	Referencia
SEV	Transformación directa	Método rápido y sencillo.	La relación empírica puede no cumplirse para diferentes complejidades geológicas. Es necesario que los sondeos SEV abarquen un amplio rango de longitud AB2 para la superposición efectiva de las curvas, lo que aumenta su costo.	(Meju, 2005b)
	Inversión conjunta resistividades SEV y SEDT	No se necesitan procesar previamente los datos o corregir las curvas desplazadas. No requiere superposición de curvas, por lo que no es necesario que los sondeos SEV abarquen un amplio rango de longitud AB2.	Mayor demanda computacional en comparación con métodos directos.	

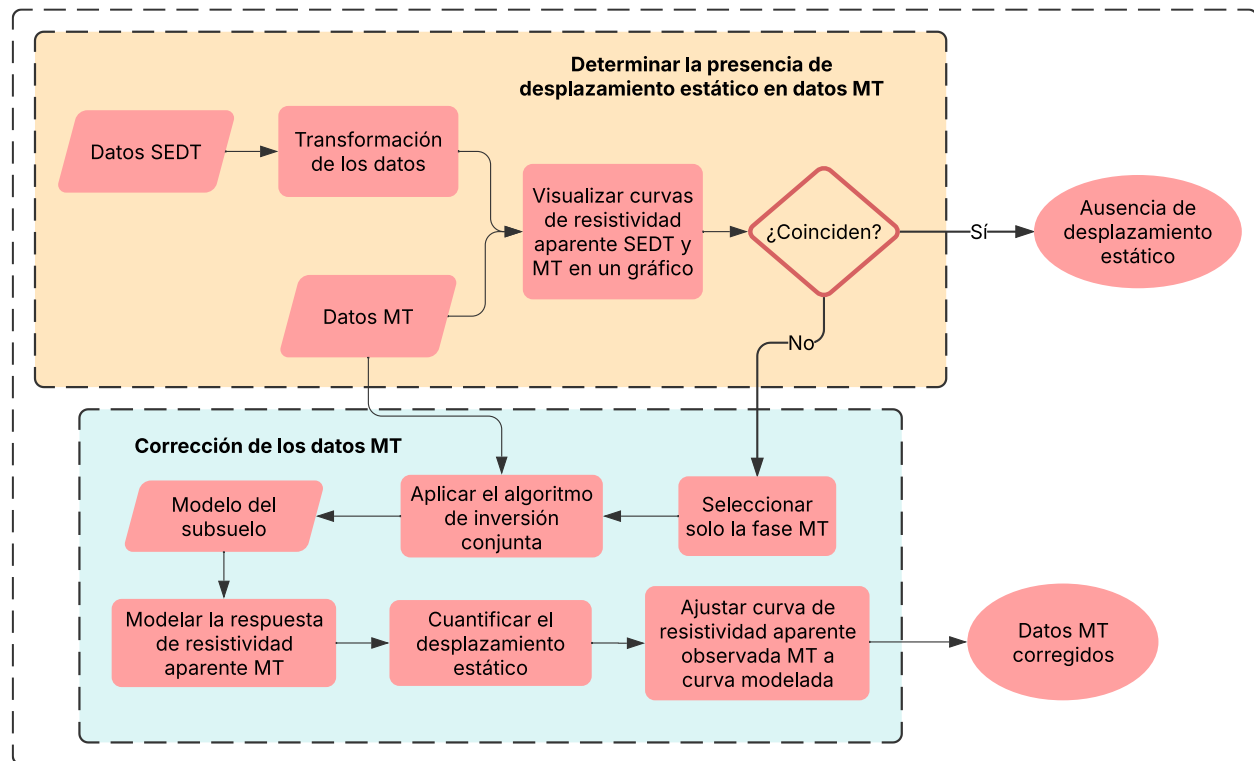
5.3.2. Desarrollo de un flujo de trabajo para corregir los datos MT

Para poder corregir los datos MT, primero se debe determinar si hay presencia o no de desplazamiento estático en los datos. Para esto es necesario contar con mediciones SEDT adquiridas en el mismo punto de la superficie donde se adquirieron los datos MT. Se deben transformar los datos SEDT, escalando de tiempo de decaimiento a frecuencia, siguiendo la ecuación (1), luego se pueden visualizar las curvas de resistividad aparente tanto de MT como SEDT en un mismo gráfico. Si ambas curvas de resistividad aparente no coinciden significa que los datos MT presentan desplazamiento estático, ya que estas deben coincidir porque las mediciones fueron adquiridas en el mismo punto. Por el contrario, si ambas curvas coinciden significa que no hay presencia de desplazamiento estático en los datos MT y, por lo tanto, no se deben corregir. Para corregir los datos MT, se emplea un esquema de inversión conjunta de la

resistividad aparente SEDT y la fase MT, ya que esta no sufre de distorsiones por desplazamiento estático. Para esto, se debe seleccionar solo la fase de los datos MT y aplicar el algoritmo de inversión conjunta, en donde se obtiene un modelo del subsuelo que explica ambas mediciones. En el modelo obtenido, se modela la respuesta de la resistividad aparente MT ($\rho MT_{calculada}$) y con esta se cuantifica el desplazamiento de la curva observada MT ($\rho MT_{observada}$), como se muestra en la ecuación (3), tomando en cuenta solo las resistividades de los periodos más bajos.

$$s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\rho MT_{observada}}{\rho MT_{calculada}} \right) \quad (3)$$

Finalmente, la curva observada MT desplazada se ajusta a la curva modelada MT, multiplicándola por $1/s$, logrando así eliminar el desplazamiento estático. Este flujo de trabajo presenta múltiples ventajas, ya que por adquirir datos SEDT en el mismo lugar que los datos MT se puede observar, cuantificar y corregir el desplazamiento estático computacionalmente de una manera precisa, además de obtener mayor información acerca del subsuelo, debido a que los datos SEDT aportan información más somera en el modelo del subsuelo y los datos MT aportan información más profunda en el modelo del subsuelo. En la Figura 16 se muestra el esquema del flujo de trabajo propuesto para corregir los datos MT.

Figura 16*Flujo de trabajo para corregir los datos MT*

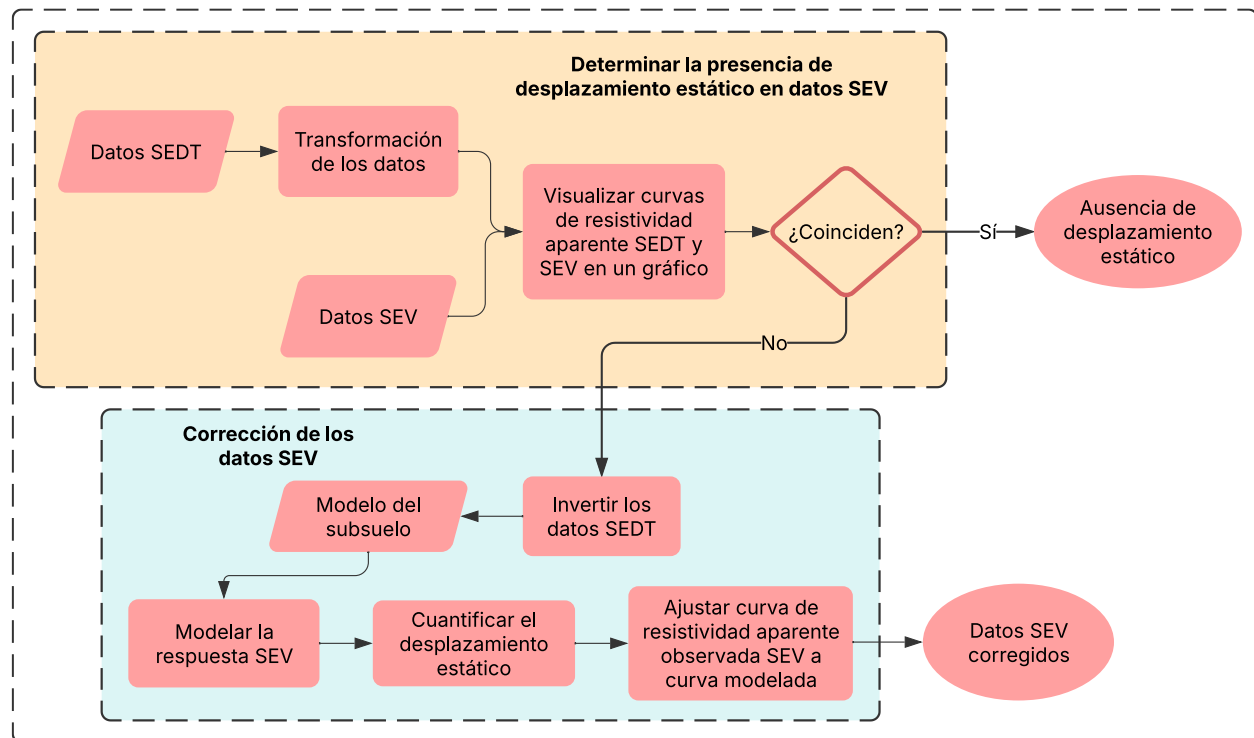
5.3.3. Desarrollo de un flujo de trabajo para corregir los datos SEV

Para poder corregir los datos SEV, primero se debe determinar si hay presencia o no de desplazamiento estático en los datos. Para esto es necesario contar con mediciones de SEDT adquiridas en el mismo punto de la superficie donde se adquirieron los datos SEV. Se deben transformar los datos SEDT, escalando de tiempo de decaimiento a longitud AB2, siguiendo la ecuación (2), luego se pueden visualizar las curvas de resistividad aparente tanto de SEV como SEDT en un mismo gráfico. Si ambas curvas de resistividad aparente no coinciden significa que los datos SEV presentan desplazamiento estático, ya que estas deben coincidir porque las mediciones fueron adquiridas en el mismo subsuelo. Por el contrario, si ambas curvas coinciden

significa que no hay presencia de desplazamiento estático en los datos SEV y, por lo tanto, no se deben corregir. Para corregir los datos SEV, se emplea un esquema de inversión de los datos SEDT, los cuales no se afectan por desplazamiento estático, obteniendo como resultado un modelo del subsuelo. En el modelo obtenido, se modela la respuesta de la resistividad aparente SEV ($\rho SEV_{calculada}$) y con esta se cuantifica el desplazamiento de la curva observada SEV ($\rho SEV_{observada}$), como se muestra en la ecuación (4), tomando en cuenta solo las resistividades de las longitudes más altas.

$$s = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(\frac{\rho SEV_{observada}}{\rho SEV_{calculada}} \right) \quad (4)$$

Finalmente, la curva observada SEV desplazada se ajusta a la curva modelada SEV, multiplicándola por $1/s$, logrando así eliminar el desplazamiento estático. Este flujo de trabajo, permite observar, cuantificar y corregir los datos SEV del desplazamiento estático de una manera precisa, corrigiendo los datos a partir de la respuesta SEV calculada en el modelo geoeléctrico obtenido con el SEDT. Además de implementar este flujo de trabajo para corregir los datos SEV, sería ideal realizar una inversión conjunta de las resistividades aparentes de SEV y SEDT, para aprovechar las mediciones SEDT no solo para corregir los datos SEV sino también para obtener como resultado un modelo del subsuelo con mayor precisión y resolución, debido a que los datos SEDT aportan información más profunda en el modelo del subsuelo y los datos SEV aportan información más somera en el modelo del subsuelo, lo que permite obtener mayor información del subsuelo. En la Figura 17 se muestra el esquema del flujo de trabajo propuesto para corregir los datos SEV.

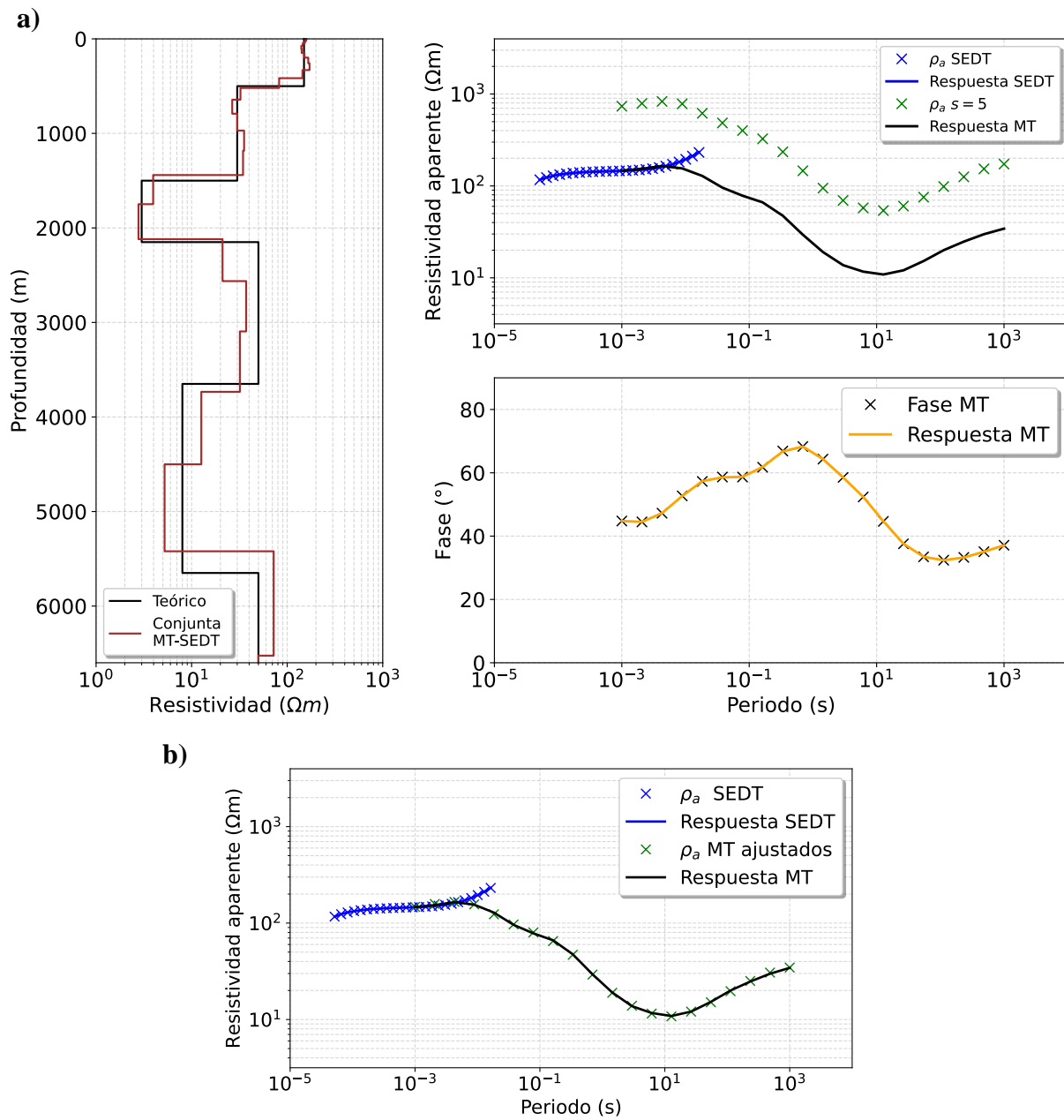
Figura 17*Flujo de trabajo para corregir los datos SEV***5.3.4. Implementación del flujo de trabajo para corregir los datos MT**

El flujo de trabajo para corregir los datos MT se implementó utilizando el lenguaje de programación Python y con la librería SimPEG. Se utilizaron los datos MT afectados por el factor de desplazamiento $s = 5$, con el objetivo de analizar la solución del método ante un factor de desplazamiento alto. En la Figura 18 se muestran los resultados del flujo de trabajo aplicado en los datos MT desplazados. La primera parte del flujo de trabajo, que consiste en determinar la presencia de desplazamiento estático en los datos, fue omitida debido a que se utilizaron los datos previamente desplazados. En la Figura 18a, las equis azules representan los datos de resistividad aparente SEDT y las equis negras los datos de fase MT, los cuales se utilizaron para la inversión conjunta. El modelo obtenido de la inversión conjunta se muestra en color marrón, el cual se ajusta

muy bien al modelo teórico (color negro), lo que evidencia una buena inversión. También se puede evidenciar con el ajuste de la fase MT estimada a la fase MT teórica y con el ajuste de la resistividad aparente SEDT estimada a la teórica. Seguido de eso se realizó el modelamiento de la resistividad aparente MT en el modelo obtenido de la inversión conjunta. La respuesta del modelamiento se observa en la línea continua de color negro, la cual se usó para cuantificar el desplazamiento de la curva de resistividad aparente MT (equis en color verde). El desplazamiento estático estimado fue de $s = 5.0052$, muy cercano al teórico que corresponde a $s = 5$. Finalmente, la curva desplazada MT se ajustó a la curva calculada MT, multiplicándola por $1/s$ como se observa en la Figura 18b.

Figura 18

Resultados de la implementación del flujo de trabajo para corregir datos MT en datos desplazados por un factor $s = 5$. a) Resultado de inversión conjunta y modelamiento MT y b) ajuste de la curva observada a la calculada

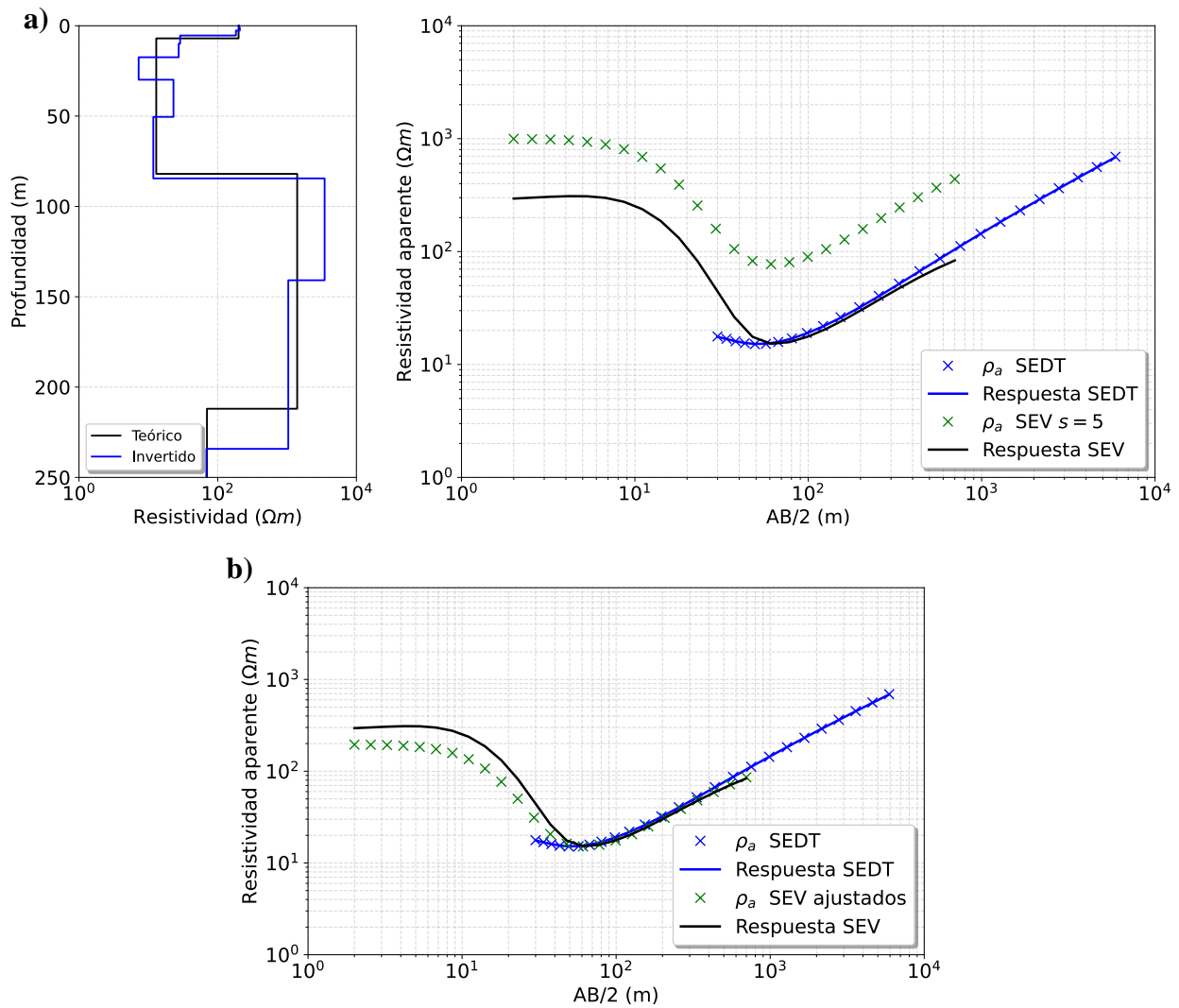


5.3.5. *Implementación del flujo de trabajo para corregir los datos SEV*

El flujo de trabajo para corregir los datos SEV se implementó utilizando el lenguaje de programación Python y con la librería SimPEG. Se utilizaron los datos SEV afectados por el factor de desplazamiento $s = 5$, con el objetivo de analizar la solución del método ante un factor de desplazamiento alto. En la Figura 19 se muestran los resultados del flujo de trabajo aplicado en los datos SEV desplazados. La primera parte del flujo de trabajo, que consiste en determinar la presencia de desplazamiento estático en los datos, fue omitida debido a que se utilizaron los datos previamente desplazados. En la Figura 19a, las equis azules representan los datos SEDT, los cuales se utilizaron para la inversión. El modelo obtenido de la inversión se muestra en color azul, el cual se ajusta muy bien al modelo teórico (color negro), lo que evidencia una buena inversión. También se puede evidenciar con el ajuste de la resistividad aparente SEDT estimada a la teórica. Seguido de eso se realizó el modelamiento de la resistividad aparente SEV en el modelo obtenido de la inversión SEDT. La respuesta del modelamiento se observa en la línea continua de color negro, la cual se usó para cuantificar el desplazamiento de la curva de resistividad aparente SEV (equis en color verde). El desplazamiento estático estimado fue de $s = 4.923$, muy cercano al teórico que corresponde a $s = 5$. Finalmente, la curva desplazada SEV se ajustó a la curva calculada SEV, multiplicándola por $1/s$ como se observa en la Figura 19b.

Figura 19

Resultados de la implementación del flujo de trabajo para corregir datos SEV en datos desplazados por un factor $s = 5$. a) Resultado de inversión SEDT y modelamiento SEV y b) ajuste de la curva observada a la calculada



5.3.6. Corrección del desplazamiento estático en datos de campo

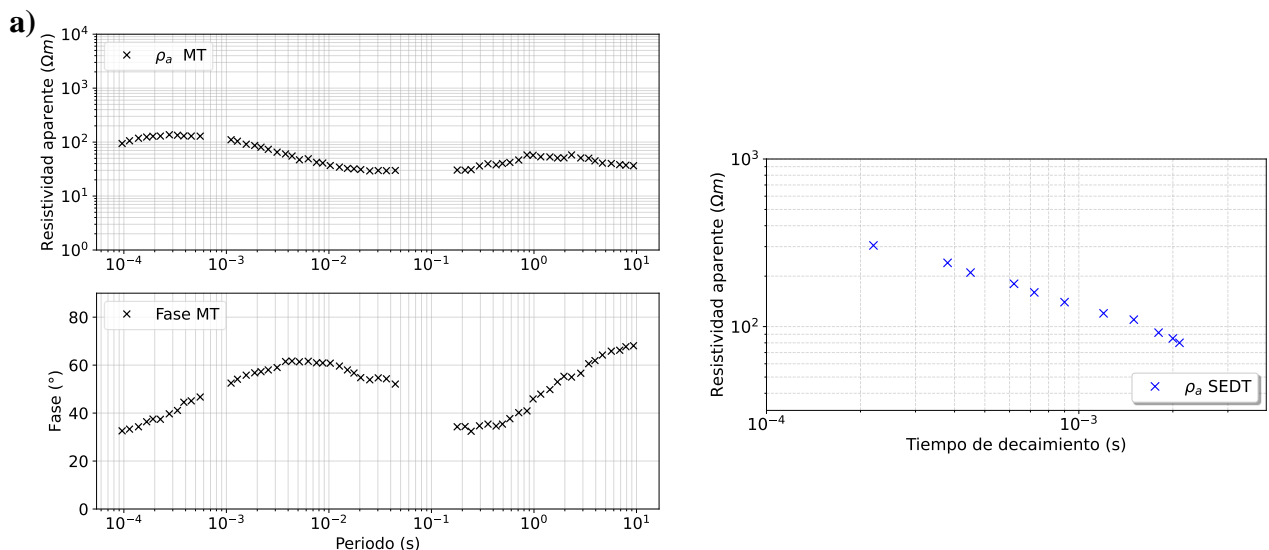
Los datos MT y SEDT utilizados para validar el flujo de trabajo propuesto fueron los del proyecto “Modelo resistivo del área geotérmica de Paipa a partir de datos magnetotelúricos”

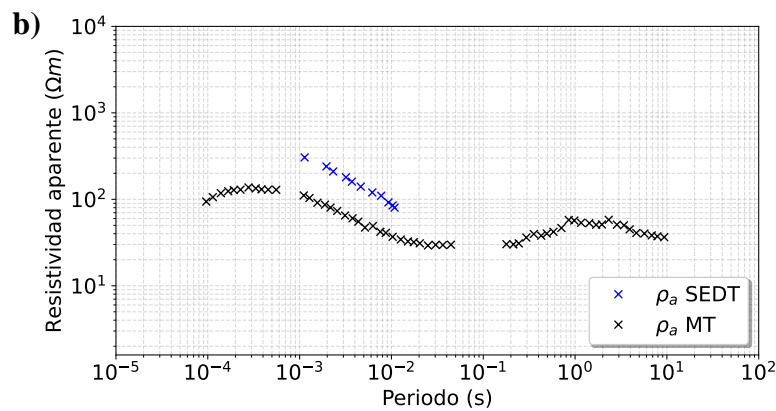
adquiridos por el Servicio Geológico Colombiano (SGC) (González & Rodríguez, 2017), en el área geotérmica de Paipa, Boyacá, Colombia. El sondeo MT fue adquirido con el equipo Phoenix con dos receptores modelo V8 y dos receptores modelo MTU-5 y el sondeo SEDT fue adquirido con el equipo Zonge GDP-16 con una antena transmisora de 10000 metros cuadrados (m^2). Cabe resaltar que ambos sondeos se adquirieron en el mismo punto de la superficie.

En la Figura 20 se muestran los resultados de la primera parte del flujo de trabajo aplicado en los datos de campo MT, que consiste en determinar la presencia de desplazamiento estático. En la Figura 20a, se muestran los datos de campo MT y SEDT, y en la Figura 20b, se muestra la transformación de los datos SEDT a MT, utilizando la ecuación (1), en donde se evidencia la presencia de desplazamiento estático en los datos MT.

Figura 20

a) Datos MT y SEDT y b) Transformación de los datos SEDT a MT donde se observa la presencia de desplazamiento en los datos MT



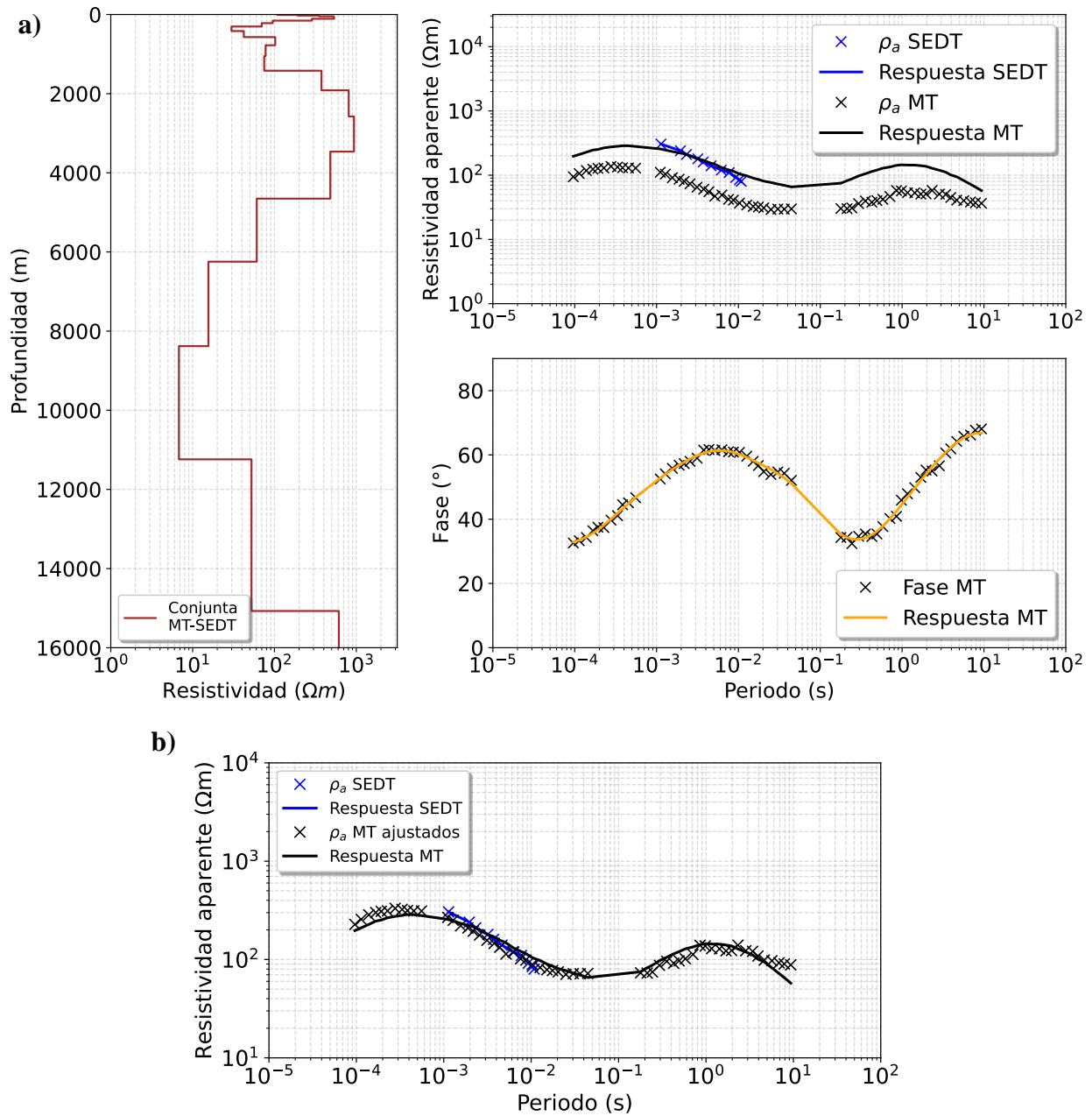


En la Figura 21 se muestran los resultados de la segunda parte del flujo de trabajo propuesto, que consiste en corregir los datos MT. En la Figura 21a, las equis azules representan los datos de resistividad aparente SEDT y las equis negras los datos de resistividad aparente y fase MT. El modelo obtenido de la inversión conjunta resistividad aparente SEDT y fase MT, se muestra en color marrón. Se puede evidenciar una buena inversión conjunta, debido al ajuste de la fase MT estimada a la fase MT teórica y el ajuste de la resistividad aparente SEDT estimada a la teórica. Seguido de eso se realizó el modelamiento de la resistividad aparente MT en el modelo obtenido de la inversión conjunta. La respuesta del modelamiento se observa en la línea continua de color negro, la cual se usó para cuantificar el desplazamiento de la curva de resistividad aparente MT. El desplazamiento estático estimado fue de $s = 0.413$. Finalmente, la curva desplazada MT se ajustó a la curva calculada MT, multiplicándola por $1/s$ como se observa en la Figura 21b.

Figura 21

Resultados de la implementación del flujo de trabajo para corregir datos MT en datos de campo.

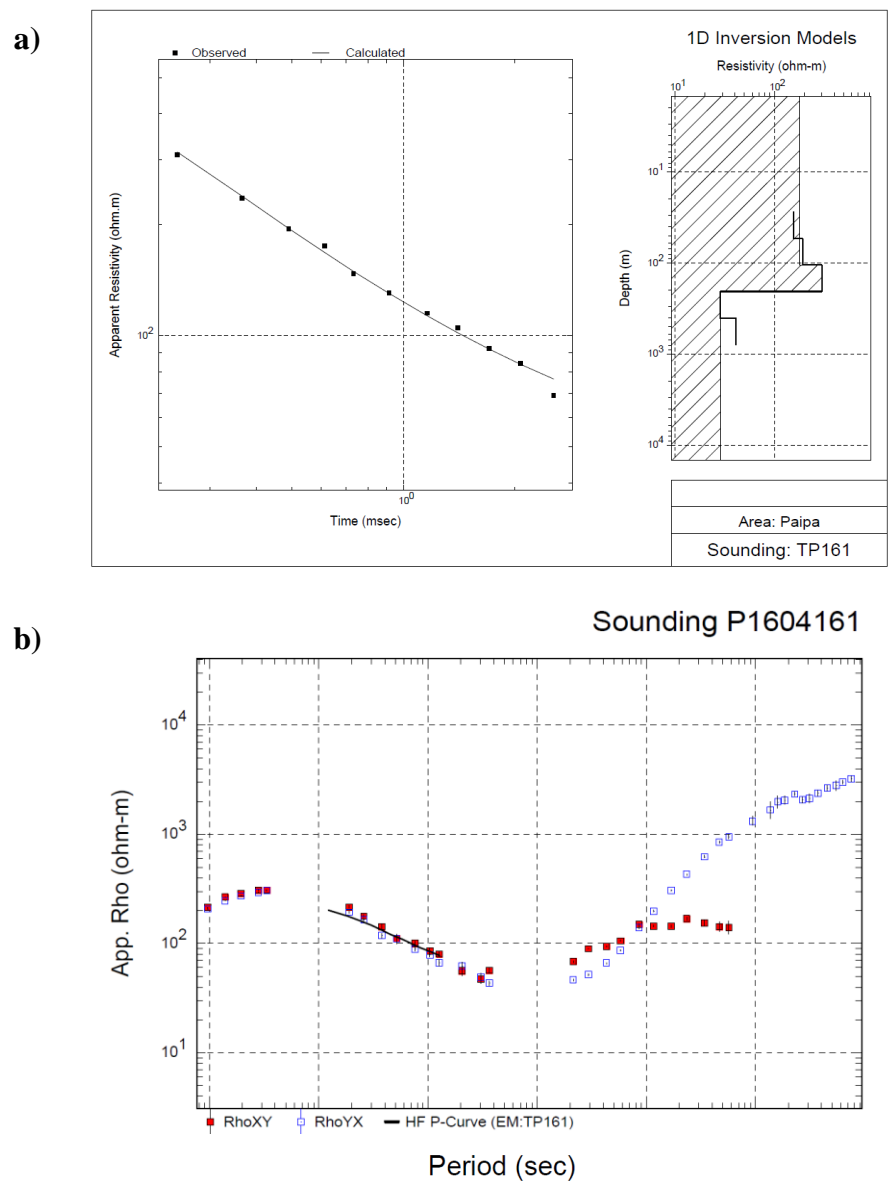
a) Resultado de inversión conjunta y modelamiento MT y b) ajuste de la curva observada a la calculada



En el proyecto de González & Rodríguez (2017), la corrección del desplazamiento estático en los datos MT se realizó ajustando la curva de resistividad aparente MT al nivel de resistividad aparente que arrojó la inversión del sondeo SEDT, como se muestra en la Figura 22.

Figura 22

Corrección del desplazamiento estático de los datos MT por el SGC. a) Inversión del sondeo TEM. b) Ajuste de la resistividad aparente MT a la del SEDT



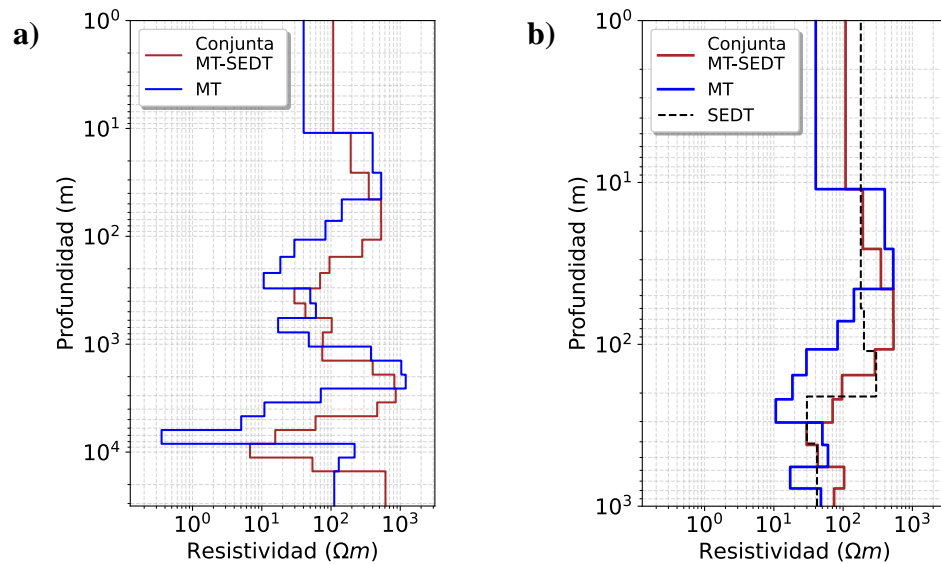
Nota. Tomado de “Modelo resistivo del área geotérmica de Paipa a partir de datos magnetotelúricos” por González & Rodríguez, 2017, *Servicio Geológico Colombiano*.

En este enfoque utilizado por (González & Rodríguez, 2017b), primero se realiza la inversión de los datos SEDT, luego se realiza la transformación de los datos SEDT a MT y, finalmente, se ajustan las curvas de resistividad aparente MT a la curva calculada de la inversión SEDT. Con este enfoque también se puede corregir el desplazamiento estático de los datos MT, sin embargo, no aprovechan los datos SEDT para obtener un modelo del subsuelo más preciso. También se debe considerar el hecho de que la relación matemática de transformación de los datos puede no ser exacta, llevando a corregir el desplazamiento estático de los datos de manera imprecisa.

Se realizó la inversión de los datos MT sin corrección del desplazamiento estático para comparar el modelo obtenido con el modelo de la inversión conjunta del flujo de trabajo propuesto, el cual no está afectado por el desplazamiento estático (Figura 23a). Se observa que el modelo obtenido de los datos sin corregir (color azul) es más conductivo que el modelo obtenido del flujo de trabajo propuesto (color marrón), lo cual es lo esperado, ya que la curva observada tiene un desplazamiento hacia abajo, como se observó de la fase 2. Además, los modelos se compararon con el modelo SEDT obtenido por González & Rodríguez (2017) (Figura 22a) como se muestra en la Figura 23b. Se observa que el modelo obtenido de flujo de trabajo propuesto presenta un mayor ajuste con el modelo SEDT que el obtenido con los datos sin corregir. Por lo tanto, el flujo de trabajo propuesto disminuye la incertidumbre en el modelo del subsuelo obtenido.

Figura 23

a) Modelos MT obtenidos del esquema del flujo de trabajo propuesto (Conjunta MT-SEDT) y de los datos sin corregir (MT). b) Comparación de los modelos MT con el modelo SEDT obtenido por el SGC



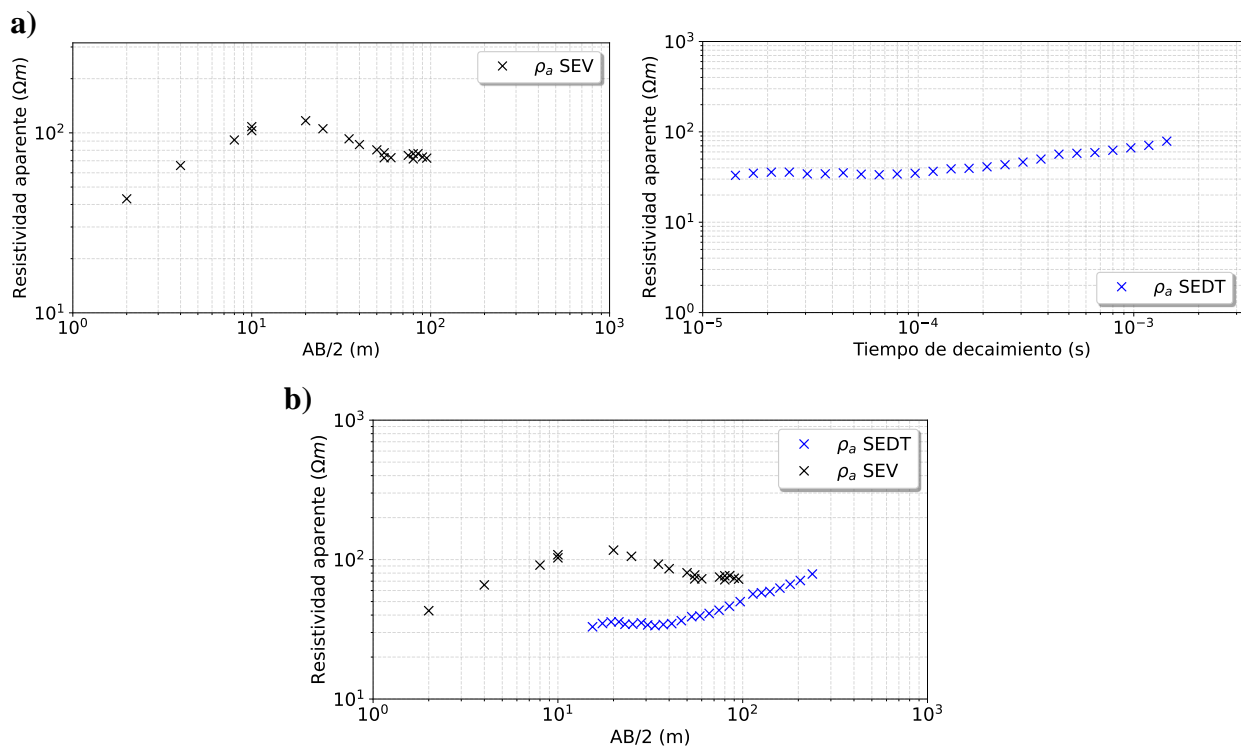
Los datos SEV y SEDT utilizados para validar el flujo de trabajo propuesto fueron los disponibles en el repositorio de datos geofísicos de la Universidad Industrial de Santander (UIS), administrado por el Semillero de Investigación en Geofísica Aplicada y Computacional (SIGAC), adquiridos en la Hacienda El Olival, en el municipio de Piedecuesta, Santander, Colombia. El sondeo SEV fue adquirido con el equipo ABEM Terrameter SAS 4000/1000, con un arreglo tipo Schlumberger, AB/2 mínimo de 2 m y máximo de 95 m. El sondeo SEDT fue adquirido con el equipo ABEM WalkTEM con una antena transmisora de 1600 m^2 y dos antenas receptoras de 5 m^2 y 200 m^2 . Cabe resaltar que ambos sondeos se adquirieron en el mismo punto de la superficie.

En la Figura 24 se muestran los resultados de la primera parte del flujo de trabajo aplicado en los datos de campo SEV, que consiste en determinar la presencia de desplazamiento estático.

En la Figura 24a, se muestran los datos de campo SEV y SEDT, y en la Figura 24b, se muestra la transformación de los datos SEDT a SEV, utilizando la ecuación (2), en donde se evidencia la presencia de desplazamiento estático en los datos SEV.

Figura 24

a) Datos SEV y SEDT y b) Transformación de los datos SEDT a SEV donde se observa la presencia de desplazamiento en los datos SEV

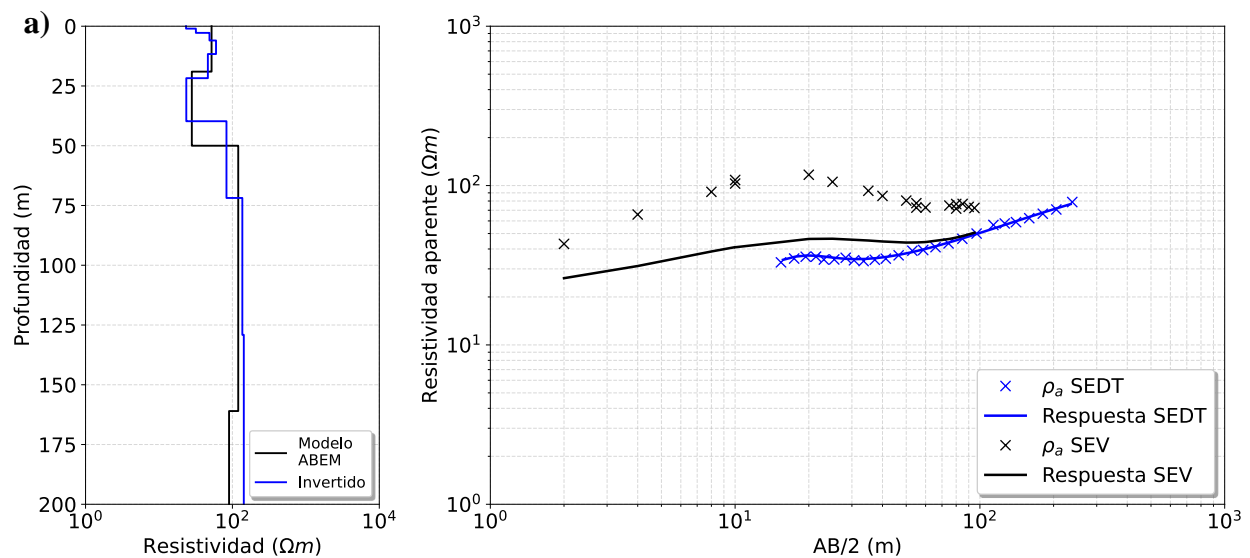


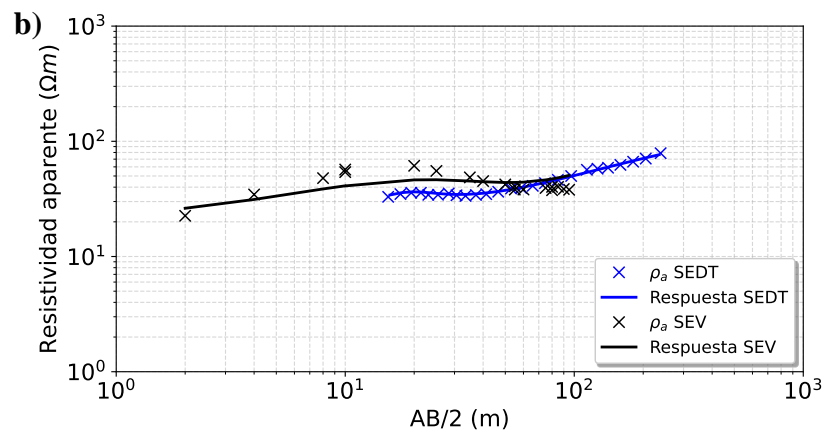
En la Figura 25 se muestran los resultados de la segunda parte del flujo de propuesta, que consiste en corregir los datos SEV. En la Figura 25a, las equis azules representan los datos SEDT, los cuales se utilizaron para la inversión. El modelo obtenido de la inversión se muestra en color azul, el cual se comparó con el del equipo de campo ABEM WalkTEM (color negro) donde se ve un buen ajuste, lo que evidencia una buena inversión. También se puede evidenciar con el ajuste de la resistividad aparente SEDT estimada a la observada. Seguido de eso se realizó el

modelamiento de la resistividad aparente SEV en el modelo obtenido de la inversión SEDT. La respuesta del modelamiento se observa en la línea continua de color negro, la cual se usó para cuantificar el desplazamiento de la curva de resistividad aparente SEV (equis en color negro). El desplazamiento estático estimado fue de $s = 1.906$. Finalmente, la curva observada SEV se ajustó a la curva calculada SEV, multiplicándola por $1/s$ como se observa en la Figura 25b.

Figura 25

Resultados de la implementación del flujo de trabajo para corregir datos SEV en datos de campo. a) Resultado de inversión SEDT y modelamiento SEV y b) ajuste de la curva observada a la calculada

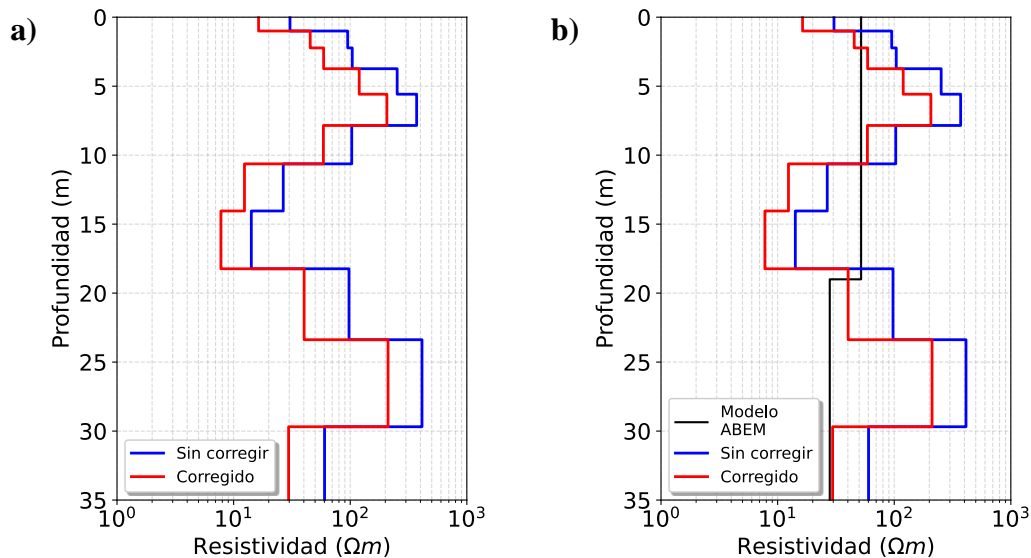




Se realizó la inversión de los datos SEV sin corrección del desplazamiento estático y de los datos SEV corregidos mediante el flujo de trabajo propuesto (Figura 26a). Se observa que el modelo obtenido de los datos sin corregir (color azul) es más resistivo que el modelo obtenido de los datos corregidos mediante el flujo de trabajo propuesto (color rojo), lo cual es lo esperado, ya que la curva observada tiene un desplazamiento hacia arriba, como se observó de la fase 2. Además, los modelos se compararon con el modelo SEDT obtenido con el del equipo de campo ABEM WalkTEM (Figura 26b). Dado que el modelo SEDT no presenta buena resolución en las capas someras en comparación con el SEV, no se pudo comparar los modelos. Sin embargo, se puede observar que la resistividad de la última capa estimada por el modelo SEV corregido se ajusta a la resistividad del modelo SEDT.

Figura 26

Modelos SEV obtenidos de los datos corregidos mediante el flujo de trabajo propuesto y de los datos sin corregir. b) Comparación de los modelos SEV con el modelo SEDT obtenido por el equipo de campo ABEM WalkTEM



6. Conclusiones

Se determinó que la integración de datos SEDT permite identificar el desplazamiento estático en los datos SEV y MT, a pesar de sus diferentes parámetros de adquisición, mediante la aplicación de relaciones matemáticas de escalamiento. Estas relaciones combinan la física de los métodos, lo que permite integrar y comparar los datos multifísicos de SEV-SEDT y de MT-SEDT. En el caso de los datos MT, el desplazamiento estático se observa cuando las curvas de resistividad aparente MT y SEDT no coinciden en los periodos más bajos. Para los datos SEV, este desplazamiento se observa cuando las curvas de resistividad aparente SEV y SEDT no coinciden

en las longitudes de $AB/2$ más altas. Asimismo, se identificó que cuando el factor de desplazamiento es mayor que 1, la curva se desplaza hacia valores de resistividad aparente más altos (desplazamiento hacia arriba), y cuando es menor que 1, se desplaza hacia valores más bajos (desplazamiento hacia abajo).

A partir de las inversiones de los datos SEV y MT teóricos y desplazados bajo las mismas condiciones, se determinó que los desplazamientos hacia arriba ($s > I$), provocan un aumento en las resistividades obtenidas en el modelo, mientras que los desplazamientos hacia abajo ($s < I$), generan una disminución en las resistividades en comparación con el modelo teórico. Se identificó que la incertidumbre en los modelos MT es mayor que en los SEV para un mismo factor de desplazamiento. Para el caso de MT, se demostró que la incertidumbre aumenta de forma cuadrática tanto si el desplazamiento aumenta hacia arriba o hacia abajo. Para el caso de SEV, se demostró que la incertidumbre aumenta linealmente cuando el desplazamiento vertical hacia arriba aumenta, y aumenta de forma cuadrática cuando el desplazamiento vertical hacia abajo aumenta. Se detectaron rangos de desplazamiento en los que la interpretación de los modelos es confiable: entre 0.7 y 1.5 para los datos MT, y entre 0.7 y 2.5 para los SEV. Además, se comprobó que la fase MT no se ve afectada por el desplazamiento estático, debido a que las respuestas de fase obtenidas se ajustaron con las teóricas en todos los casos.

Finalmente, la implementación de los flujos de trabajo propuestos, tanto en datos sintéticos como en datos reales, demostró que con el enfoque multifísico basado en la integración de datos SEDT, se observa, cuantifica y corrige el desplazamiento estático en los datos y se evidencia una disminución de la incertidumbre en los modelos del subsuelo obtenidos.

7. Recomendaciones y trabajo futuro

Luego de aplicar el flujo de trabajo propuesto para corregir la resistividad aparente MT, se recomienda realizar la inversión conjunta del dato MT completo, es decir, de la resistividad aparente corregida y fase, con los datos SEDT. Asimismo, luego de corregir la resistividad aparente SEV, se recomienda realizar la inversión conjunta de la resistividad aparente SEV corregida, con los datos SEDT. Para obtener un modelo del subsuelo con mayor información y más confiable, empleando datos de dos métodos geofísicos los cuales aportan diferentes ventajas al modelo.

Se propone aplicar el algoritmo de inversión conjunta de resistividades SEV-SEDT y MT-SEDT, en donde se optimizan simultáneamente los parámetros del modelo del subsuelo y el factor de desplazamiento estático con redes neuronales, ya que, con el enfoque de inversión del presente trabajo, no es posible optimizar esos dos parámetros al tiempo.

8. Repositorio y acceso a datos

Los autores le agradecen al Semillero de Investigación en Geofísica Aplicada y Computacional (SIGAC) de la Universidad Industrial de Santander por proporcionar los datos e información geofísica usados en este trabajo, los cuales están protegidos bajo una licencia de acceso libre y se encuentran publicados en la página web <https://sigacuis.github.io/Repositorio.html>. Asimismo, al Servicio Geológico Colombiano, por proporcionar los datos e información geofísica usados en este trabajo, los cuales se pueden solicitar

en la página web <https://miig.sgc.gov.co/Paginas/advanced.aspx>. En el siguiente repositorio se pueden encontrar los códigos en Python que se desarrollaron para los resultados de este trabajo de investigación https://github.com/DanielaQuinteroMadariaga/Static_Shift_correction.

Referencias

- Árnason, K., Eysteinnsson, H., & Hersir, G. P. (2010a). Joint 1D inversion of TEM and MT data and 3D inversion of MT data in the Hengill area, SW Iceland. *Geothermics*, 39(1), 13–34. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2010.01.002>
- Berdichevsky, M. N., Bubnov, V., Aleksanova, E., Alekseev, D., Yakovlev, A., & Yakovlev, D. (2015). Magnetotelluric Studies in Russia: Regional-Scale Surveys and Hydrocarbon Exploration. In *Electromagnetic Sounding of the Earth's Interior* (pp. 379–401). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63554-9.00013-1>
- Berdichevsky, M. N., Vanyan, L. L., Kuznetsov, V. A., Levadny, V. T., Mandelbaum, M. M., Nechaeva, G. P., Okulesky, B. A., Shilovsky, P. P., & Shpak, I. P. (1980). Geoelectrical model of the Baikal region. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 22(1), 1–11. [https://doi.org/10.1016/0031-9201\(80\)90095-3](https://doi.org/10.1016/0031-9201(80)90095-3)
- Bortolozzo, C. A., Porsani, J. L., Santos, F. A. M. dos, & Almeida, E. R. (2015). VES/TEM 1D joint inversion by using Controlled Random Search (CRS) algorithm. *Journal of Applied Geophysics*, 112, 157–174. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2014.11.014>
- Bücker, M., Lozano García, S., Ortega Guerrero, B., Caballero, M., Pérez, L., Caballero, L., Pita de la Paz, C., Sánchez-Galindo, A., Villegas, F. J., Flores Orozco, A., Brown, E., Werne, J., Valero Garcés, B., Schwalb, A., Kemna, A., Sánchez-Alvaro, E., Launizar-Martínez, N., Valverde-Placencia, A., & Garay-Jiménez, F. (2017). “ Geoelectrical and Electromagnetic Methods Applied to Paleolimnological Studies: Two Examples from Desiccated Lakes in the Basin of Mexico.” *Boletín de La Sociedad Geológica Mexicana*, 69(2), 279–298. <https://doi.org/10.18268/BSGM2017v69n2a1>

- Caldwell, T. G., Bibby, H. M., & Brown, C. (2004). The magnetotelluric phase tensor. *Geophysical Journal International*, 158(2), 457–469. <https://doi.org/10.1111/J.1365-246X.2004.02281.X>
- Cockett, R., Kang, S., Heagy, L. J., Pidlisecky, A., & Oldenburg, D. W. (2015). SimPEG: An open source framework for simulation and gradient based parameter estimation in geophysical applications. In *Computers and Geosciences* (Vol. 85, pp. 142–154). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2015.09.015>
- Colombo, D., McNeice, G., Rovetta, D., Sandoval-Curiel, E., Turkoglu, E., & Sena, A. (2016a). High-resolution velocity modeling by seismic-airborne TEM joint inversion: A new perspective for near-surface characterization. *The Leading Edge*, 35(11), 977–985. <https://doi.org/10.1190/tle35110977.1>
- Deok Kim, J., Sun, J., & Melo, A. (2020a). Regional scale mineral exploration through joint inversion and geology differentiation based on multi-physics geoscientific data. *SEG Technical Program Expanded Abstracts 2020*, 1379–1383. <https://doi.org/10.1190/segam2020-3428427.1>
- El-Kaliouby*, H. (2015). Mapping coastal aquifer and sea water intrusion using time-domain electromagnetic method, North Oman. *International Conference on Engineering Geophysics, Al Ain, United Arab Emirates, 15-18 November 2015*, 220–223. <https://doi.org/10.1190/iceg2015-062>
- Genedi, M., Ghazala, H., Mohamed, A. K., & Massoud, U. (2021a). Joint inversion of DC/TDEM data: a case study of static shift problem in the area north Tenth of Ramadan City, Egypt. *Arabian Journal of Geosciences*, 14(16), 1557. <https://doi.org/10.1007/s12517-021-07642-x>

GeoSci Developers. (2018). *Practical considerations for magnetotellurics*.

Golovko, L., Pozdnyakov, A., & Waller, T. (2012). A Vertical Electrical Sounding and Self-Potential Methods to Survey for Placement of Potable Water Wells. *Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems 2012*, 503–518. <https://doi.org/10.4133/1.4721861>

González, C., & Rodríguez, G. (2017a). *MODELO RESISTIVO DEL ÁREA GEOTÉRMICA DE PAIPA A PARTIR DE DATOS MAGNETOTELÚRICOS*.

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>

Hodson, T. O. (2022). Root-mean-square error (RMSE) or mean absolute error (MAE): when to use them or not. *Geoscientific Model Development*, 15(14), 5481–5487. <https://doi.org/10.5194/gmd-15-5481-2022>

Irfan, R., Kamah, Y., Gaffar, E., & Winarso, TS. (2010). *Magnetotelluric Static Shift Correction Using Time Domain Electromagnetics Case Study: Indonesian Geothermal Rough Fields*.

Jiang, W., Duan, J., Doublier, M., Clark, A., Schofield, A., Brodie, R. C., & Goodwin, J. (2022a). Application of multiscale magnetotelluric data to mineral exploration: an example from the east Tennant region, Northern Australia. *Geophysical Journal International*, 229(3), 1628–1645. <https://doi.org/10.1093/gji/ggac029>

Jones, A. G. (1988). Static shift of magnetotelluric data and its removal in a sedimentary basin environment. *GEOPHYSICS*, 53(7), 967–978. <https://doi.org/10.1190/1.1442533>

- Leite, D. N., Bortolozzo, C. A., Porsani, J. L., Couto, M. A., Campana, J. D. R., dos Santos, F. A. M., Rangel, R. C., Hamada, L. R., Sifontes, R. V., Serejo de Oliveira, G., & Stangari, M. C. (2018). Geoelectrical characterization with 1D VES/TDEM joint inversion in Urupês-SP region, Paraná Basin: Applications to hydrogeology. *Journal of Applied Geophysics*, *151*, 205–220. <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2018.02.022>
- Lyrio, J. C. S. O., Menezes, P. T. L., Correa, J. L., & Viana, A. R. (2020a). Multiphysics anomaly map: A new data fusion workflow for geophysical interpretation. *Interpretation*, *8*(2), B35–B43. <https://doi.org/10.1190/INT-2018-0178.1>
- Martínez-Moreno, F. J., Monteiro-Santos, F. A., Bernardo, I., Farzamian, M., Nascimento, C., Fernandes, J., Casal, B., & Ribeiro, J. A. (2017a). Identifying seawater intrusion in coastal areas by means of 1D and quasi-2D joint inversion of TDEM and VES data. *Journal of Hydrology*, *552*, 609–619. <https://doi.org/10.1016/J.JHYDROL.2017.07.026>
- McNeill, J. (1994). Principles and application of time domain electromagnetic techniques for resistivity sounding. *Geonics Limited*.
- Meju, M. A. (1996a). Joint inversion of TEM and distorted MT soundings: Some effective practical considerations. *GEOPHYSICS*, *61*(1), 56–65. <https://doi.org/10.1190/1.1443956>
- Meju, M. A. (2005a). Simple relative space-time scaling of electrical and electromagnetic depth sounding arrays: implications for electrical static shift removal and joint DC-TEM data inversion with the most-squares criterion. In *Geophysical Prospecting* (Vol. 53).
- Meqbel, N. (2021). The magnetotelluric method: Examples from uppermost mantle to the uppermost crust. *Sixth International Conference on Engineering Geophysics, Virtual, 25–28 October 2021*, 159–162. <https://doi.org/10.1190/iceg2021-042.1>

- Ogunbo, J. N., Marquis, G., Zhang, J., & Wang, W. (2018a). Joint inversion of seismic traveltime and frequency-domain airborne electromagnetic data for hydrocarbon exploration. *GEOPHYSICS*, 83(2), U9–U22. <https://doi.org/10.1190/geo2017-0112.1>
- Pellerin, L., & Hohmann, G. W. (1990). Transient electromagnetic inversion: A remedy for magnetotelluric static shifts. *GEOPHYSICS*, 55(9), 1242–1250. <https://doi.org/10.1190/1.1442940>
- Rodríguez-Rodríguez, G. (2018). *MODELAMIENTO 1D, 2D Y 3D DE LA ESTRUCTURA RESISTIVA DEL SUBSUELO A PARTIR DE REGISTROS MAGNETOTELÚRICOS PARA EL ÁREA GEOTÉRMICA DEL VOLCÁN AZUFRAL*.
- Santilano, A., Godio, A., & Manzella, A. (2018). Particle swarm optimization for simultaneous analysis of magnetotelluric and time-domain electromagnetic data. *GEOPHYSICS*, 83(3), E151–E159. <https://doi.org/10.1190/geo2017-0261.1>
- Sternberg, B. K., Washburne, J. C., & Pellerin, L. (1988a). Correction for the static shift in magnetotellurics using transient electromagnetic soundings. *GEOPHYSICS*, 53(11), 1459–1468. <https://doi.org/10.1190/1.1442426>
- Sultan, S. A., & Santos, F. M. (2009). Combining TEM/resistivity joint inversion and magnetic data for groundwater exploration: application to the northeastern part of Greater Cairo, Egypt. *Environmental Geology*, 58(3), 521–529. <https://doi.org/10.1007/s00254-008-1527-2>
- Sun, J., Colombo, D., Li, Y., & Shragge, J. (2020). G <sc>eophysics</sc> introduces new section on multiphysics and joint inversion. *The Leading Edge*, 39(10), 753–754. <https://doi.org/10.1190/tle39100753.1>
- Suriyapor, P. (2020). *1-D Vertical Electrical Sounding (VES) Inversion with a lateral constraint* .

- Swift, C. M. (1988). 1. Fundamentals of the Electromagnetic Method. In *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics* (pp. 4–11). Society of Exploration Geophysicists.
<https://doi.org/10.1190/1.9781560802631.ch1>
- Tournerie, B., Chouteau, M., & Marcotte, D. (2007). Magnetotelluric static shift: Estimation and removal using the cokriging method. *GEOPHYSICS*, 72(1), F25–F34.
<https://doi.org/10.1190/1.2400625>
- Vozoff, K. (1991). 8. The Magnetotelluric Method. In *Electromagnetic Methods in Applied Geophysics* (pp. 641–712). Society of Exploration Geophysicists.
<https://doi.org/10.1190/1.9781560802686.ch8>