

Conociendo el interior de nuestro planeta: energía electromagnética y geotermia

Aideliz M. Montiel Álvarez * y José Manuel Romo Jones

División de Ciencias de la Tierra, CICESE.

*montiel.aideliz@gmail.com

Resumen

Ante la inminente necesidad de mitigar los efectos del cambio climático, México se sumó a la transición a energías más limpias y renovables con la creación de centros especializados, dentro de los que se incluyó el Centro Mexicano de Innovación en Energía Geotérmica (CeMIEGeo). Entre los objetivos de este proyecto se buscó el desarrollo de técnicas para la exploración de recursos geotérmicos en el país. Así, se realizaron estudios geofísicos y geoquímicos en ciertas zonas del Golfo de California, dentro de los cuales se utilizaron por primera vez los métodos electromagnéticos marinos para exploración geotérmica. Estos métodos permiten conocer la distribución de resistividad eléctrica en el subsuelo y, aunado a información geológica, estimar qué materiales se encuentran en la zona de estudio. En este trabajo abordamos con más detalle la metodología de éstas técnicas y presentamos, como ejemplo, algunos de los resultados obtenidos.

Palabras clave: Geotermia; energía electromagnética; Golfo de California.

1. Geotermia en México

La búsqueda de energías alternas a los hidrocarburos inició hace ya algunas décadas, pero ha tomado mayor importancia en nuestros días ante las claras consecuencias del cambio climático. Actualmente, muchos países le están apostando a la investigación, exploración y tecnología que permita el desarrollo de nuevas fuentes de energía, más limpias y renovables. Una de éstas es la Geotermia, que es el aprovechamiento del calor interno de la Tierra. Las primeras civilizaciones utilizaban sitios con aguas termales para bañarse o cocinar; hoy en día la energía térmica que proviene del interior del planeta se puede transformar en electricidad o se puede usar directamente en climatización de casas y edificios, climatización en invernaderos o estanques de piscicultura, deshidratación de alimentos, secado de alimentos, o en sitios recreativos y terapéuticos con aguas termales, entre otros.

Para aprovechar la geotermia se requieren algunos factores principales: una fuente de calor a profundidad, fluidos subterráneos que

sean calentados por esa fuente, y una capa rocosa impermeable que impida que los fluidos escapen hacia la superficie y que propicie su acumulación. Si estas condiciones generales se tienen, se puede hablar entonces de un yacimiento geotérmico (Figura 1). En 1911, por primera vez en la historia, fue explotado un yacimiento con fines de generación eléctrica, en la planta geotérmica de Larderello, Italia. Desde entonces, alrededor de 25 países en el mundo tienen generación eléctrica a partir de energía geotérmica. El proceso básico inicia con la perforación, se hace un pozo hasta llegar al

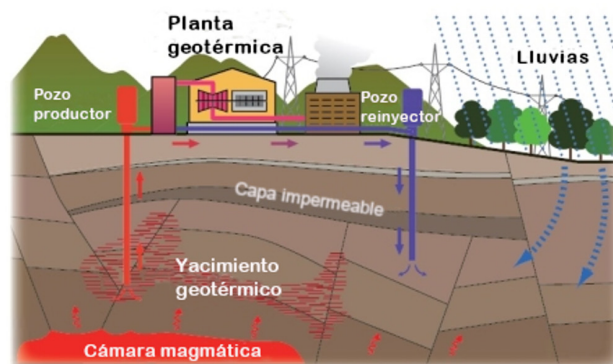


Figura 1. Esquema de los componentes de un yacimiento geotérmico y el proceso para su aprovechamiento (Modificada de "Technology for exploration", s.f.).

yacimiento y mediante una red de tuberías se dirigen los fluidos con alta temperatura y presión hacia la planta. Ahí se separa el agua del vapor, éste se limpia y se hace pasar por una turbina que está conectada a un generador eléctrico, de forma tal que, al girar la turbina, y gracias a las leyes del electromagnetismo, se genera electricidad. El vapor se condensa y, al igual que el agua separada inicialmente, se reinyectan al subsuelo para mantener en equilibrio el yacimiento (Figura 1).

En México hay 5 plantas geotérmicas, la más grande es Cerro Prieto en Baja California que, además, es la tercera planta más grande a nivel mundial (Sen Nag, 2017); le siguen los Azufres en Michoacán, Los Hornos en Puebla, Las Tres Vírgenes en Baja California Sur y Domo San Pedro en Nayarit. Con una producción total de 981 MW (IEA Geothermal, 2019), México se encuentra en el sexto puesto a nivel mundial. Sin embargo, la energía generada en esas plantas representa únicamente el 1.84% de la energía eléctrica total del país (Cacho Carranza, 2018). Para finales del año 2010, la generación eléctrica mediante energías limpias, que incluye hidroeléctrica y nuclear, aportaba el 26.4% del total (Hiriart Le Bert, 2011), entonces la Estrategia Nacional de Energía estableció como objetivo incrementar la participación de las energías limpias al 35% para el año 2024 (Valle Pereña y Ortega Navarro, 2012).

Dentro de las propuestas para alcanzar tal objetivo, la Secretaría de Energía (SENER) aunado al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT), crearon los Centros Mexicanos de Innovación en Energía, dentro de los cuales se estableció el de geotermia (CeMIEGeo). La operación de este Centro inició a finales del año 2014 con sede en el Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada (CICESE). Las actividades y proyectos del CeMIEGeo se engloban en cuatro ramas principales que son:

1. La evaluación de los recursos geotérmicos nacionales
2. El desarrollo e innovación de técnicas de exploración
3. Desarrollos tecnológicos de explotación
4. Los usos directos del calor geotérmico.

En lo que compete a la exploración de recursos geotérmicos convergen múltiples disciplinas, principalmente geoquímica, geología y geofísica, cuyas herramientas son utilizadas para determinar la presencia de recursos potenciales y determinar sus características, tales como dimensiones, temperatura y propiedades físico-químicas. Hasta el momento, todos los recursos geotérmicos explotados se encuentran en tierra; sin embargo, en años recientes se ha encontrado que hay un potencial muy grande en ambientes marinos asociados a márgenes de placas tectónicas. Algunos países han empezado a explorar zonas favorables para recursos geotérmicos marinos, pero aún no se ha desarrollado la tecnología suficiente para su explotación. El

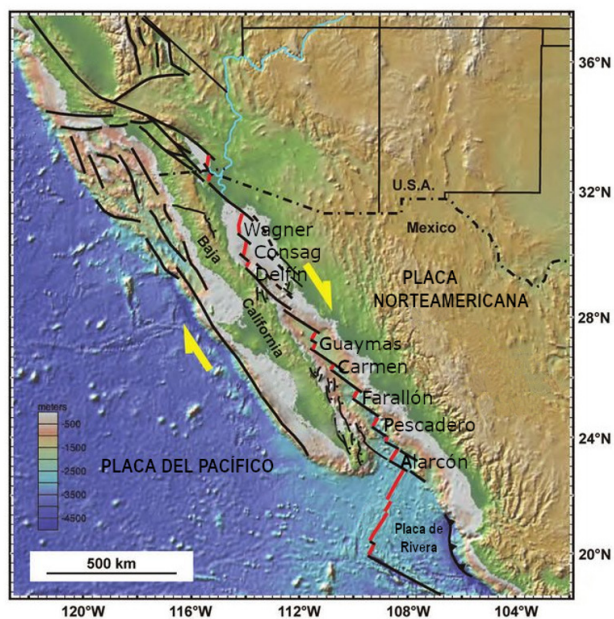


Figura 2. Fallas transformes (líneas en negro), centros de dispersión (líneas en rojo) y nombres de cuencas extensionales a lo largo del Golfo de California (Modificada de Umhoefer, 2011).



Figura 3. Buque oceanográfico Alpha Helix en el Puerto de Santa Rosalía, BCS (Cortesía de Steven Constable).

Golfo de California es un escenario de perfectas condiciones debido a la frontera entre la placa del Pacífico y la Norteamericana, la cual corre a todo lo largo del Golfo y queda expuesta por un gran sistema de fallas transformes que conectan centros de dispersión y cuencas extensionales (Figura 2).

El CeMIEGeo propuso el proyecto P03 “Campaña intensiva de exploración geotérmica de las cuencas Wagner, Consag, Delfín, Guaymas y Alarcón del sistema de rifts del Golfo de California”, con el objetivo de identificar y analizar zonas con potencial geotérmico. Se realizaron campañas a bordo del buque oceanográfico Alpha Hélix del CICESE (Figura 3), en las que se adquirieron datos de flujo de calor y batimetría, se hicieron estudios electromagnéticos marinos con el método magnetotelúrico (MT) y de fuente controlada (CSEM), también se realizó sísmica de refracción y reflexión, hidrogeoquímica, y se tomaron muestras de sedimentos y rocas del fondo marino.

2. Energía electromagnética

Los estudios electromagnéticos marinos se realizaron en dos zonas del Golfo de California, la primera campaña fue al norte, en la Cuenca de Wagner, en el año 2015; al año siguiente se realizó la segunda campaña en la zona central del Golfo, al noroeste de la Cuenca de Guaymas y cerca de las costas de Santa Rosalía y la Caldera Reforma (BCS). En dichos cruceros se contó con el trabajo de investigadores, técnicos y estudiantes del CICESE; además, la toma de datos geofísicos electromagnéticos se realizó con la supervisión del Dr. Steven Constable y el equipo de técnicos de Scripps Institution of Oceanography de la Universidad de California, quienes construyeron la instrumentación y tienen muchos años de experiencia en investigación y aplicación de los métodos electromagnéticos marinos.

Pero, ¿de qué se tratan los métodos electromagnéticos y por qué decimos que nos ayudan a conocer el interior de la Tierra? El

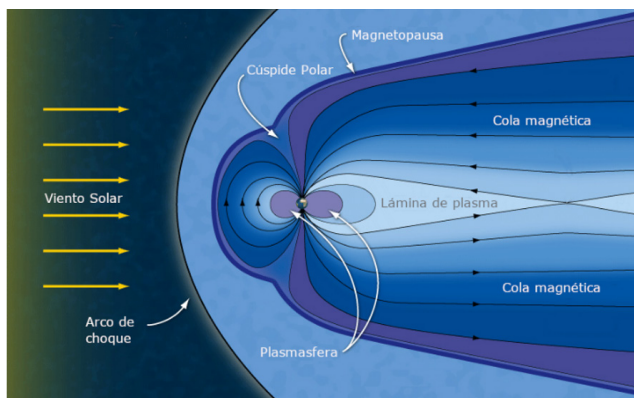


Figura 4. Esquema de la interacción del viento solar con el campo magnético de la Tierra (Modificada de "Catching Space Weather in the Act", 2011).

viento solar que irradia del Sol es un cúmulo de partículas cargadas, protones y electrones, que viajan a través del universo. El viento solar que va con dirección a nuestro planeta choca con el campo magnético natural de la Tierra, el cual que actúa como escudo, desviando las partículas y protegiéndonos de esa radiación. Sin embargo, algunas partículas logran colarse y al interactuar con la magnetósfera y la ionósfera se producen campos que son inducidos hacia la Tierra (Figura 4).

La energía electromagnética se propaga en forma de ondas que tienen una componente magnética y una eléctrica, perpendiculares entre sí, y que varían en longitudes de onda y frecuencia (Figura 5). En el método magnetotelúrico se utilizan los

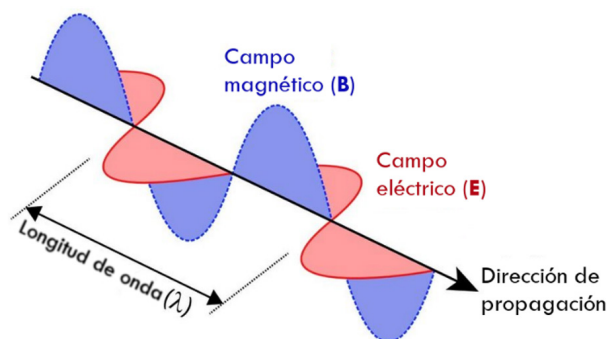


Figura 5. Propagación de una onda electromagnética con sus componentes eléctrica y magnética (Modificada de Verhoeven, 2017).

campos EM inducidos como fuente, y se mide la respuesta de la Tierra al paso de éstos. Las mediciones se realizan en superficie mediante bobinas magnéticas (o magnetómetros) para medir las variaciones del campo magnético y electrodos para medir las variaciones del campo eléctrico. Los campos electromagnéticos que se miden en la superficie de la Tierra contienen información del subsuelo, y entre más tiempo se mida, se puede obtener información a mayor profundidad.

En el método magnetotelúrico marino, los equipos de medición se tienen que sumergir hasta el piso oceánico. En las campañas de exploración de CeMIEGeo se utilizaron los Ocean Bottom Electromagnetic receivers, OBEMs (Constable, 2013). En la figura 6 se muestra un ejemplar de estos instrumentos que están formados de dos magnetómetros, o bobinas de inducción, los cuales miden las componentes horizontales del campo magnético; dos electrodos de 10 metros cada uno miden las componentes horizontales del campo eléctrico. La parte electrónica, donde

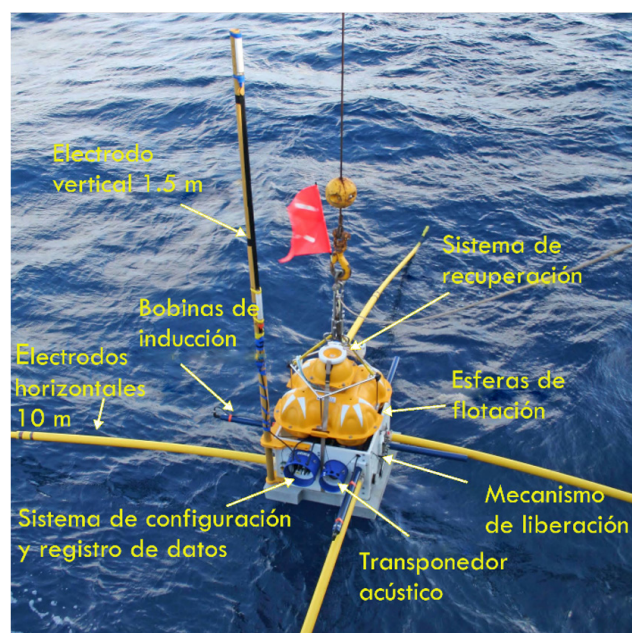


Figura 6. Componentes de un receptor marino electromagnético (Modificada de "Instruments: EM Receiver", 2009).



Figura 7. Despliegue de un instrumento de medición EM (Cortesía de Steven Constable).

se programan las instrucciones de medición como la hora de inicio y fin, la frecuencia de muestreo y también donde se graban los datos medidos, van en un cilindro sellado al vacío. Todo lo anterior está contenido en una caja de acrílico de 1 m por lado. Los instrumentos son configurados en el buque y soltados en los puntos de interés (Figura 7), de modo que van anclados a una plancha de concreto para que puedan sumergirse hasta el fondo y tengan estabilidad en el piso oceánico.

Para su recuperación cuentan con un detector acústico que, al recibir una señal desde el barco, desengancha la plancha de concreto y así el instrumento sale a flote gracias al sistema de boyas que tiene en la parte superior. Por último, cada instrumento tiene una brújula-inclinómetro electrónico que mide su orientación e inclinación

una vez cada hora, durante las primeras 24 horas después del despliegue; esto es de gran importancia ya que cada instrumento llega al fondo marino con diferentes orientaciones y el procesamiento tradicional de los datos requiere conocer esa información para realizar interpretaciones correctas.

Estos instrumentos registran los campos electromagnéticos naturales en el fondo marino. Adicionalmente, se utiliza otra técnica conocida como método electromagnético con fuente controlada (CSEM) en la que se tiene una fuente transmisora que produce campos EM de más alta frecuencia para obtener información en los primeros kilómetros bajo el fondo oceánico. Hay diferentes instrumentos para realizar mediciones con fuente controlada, en los estudios del Golfo de

California se utilizó un transmisor SUESI (Scripps Undersea Electromagnetic Source Instrument) (Figura 8) y el DUESI (Deployed Undersea Electromagnetic Source Instrument), éstos generan pulsos electromagnéticos a diferentes frecuencias. Deben sumergirse y desplazarse a unos metros sobre el fondo oceánico siguiendo el perfil de los receptores OBEM (Figura 9). El método de fuente controlada tiene muy buena resolución en los primeros kilómetros de profundidad, y recupera la información que se pierde de la fuente natural debido a la capa conductora de agua de mar.

Después de medir las variaciones en el campo electromagnético, ¿qué logramos saber? Los materiales tienen diversas propiedades físicas, una de éstas es la conductividad eléctrica, que indica cuánta corriente eléctrica deja pasar cada material. Gracias a las ecuaciones que rigen la física de éstos métodos, al medir los campos EM podemos calcular la conductividad eléctrica del subsuelo, o su inversa, la resistividad. Ya que cada material presenta un rango característico de esta propiedad, se puede estimar qué tipo de materiales se tienen en cada zona de estudio. El método magnetotelúrico es muy utilizado en la exploración de recursos geotérmicos, ya que se presentan grandes contrastes de resistividad entre los fluidos almacenados a

altas temperaturas, las zonas de alteración que se generan debido a éstos y las rocas que se encuentran alrededor de los yacimientos.

Los métodos electromagnéticos aplicados en el mar son muy utilizados para la detección de yacimientos de petróleo y gas en algunos países como Estados Unidos y Noruega. En nuestro país también se utilizaron estas metodologías para la búsqueda de hidrocarburos, en el Golfo de México. Mientras que es la primera vez que se realizan este tipo de estudios en el Golfo de California y, en nuestro conocimiento, es la primera vez que se utilizan con fines de exploración geotérmica marina en todo el mundo.

3. Radiografías del interior de la Tierra

Después de procesar los datos medidos, los resultados que se obtienen son como radiografías o imágenes del subsuelo que nos indican, en una escala de colores, las zonas más conductoras (tonos cálidos) y las más resistivas (tonos fríos). Por ejemplo, en la figura 10 se presenta el resultado de un perfil en la zona central del Golfo de California (Montiel-Álvarez, 2018); la primera capa delgada, en la parte superior del modelo, en color azul representa el aire altamente resistivo, por debajo se ve otra delgada capa en color rojo que representa el agua de mar muy conductora (0.3 Ohm-m). Se observa un límite discontinuo entre ese medio homogéneo y lo que le subyace,

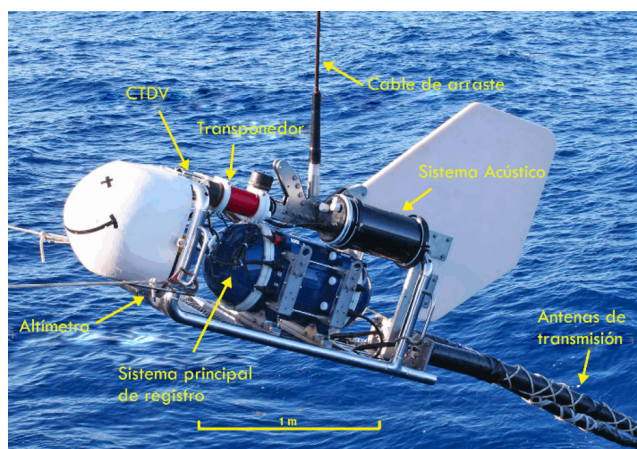


Figura 8. Transmisor electromagnético SUESI con sus componentes (Modificada de "Instruments: SUESI", 2009).

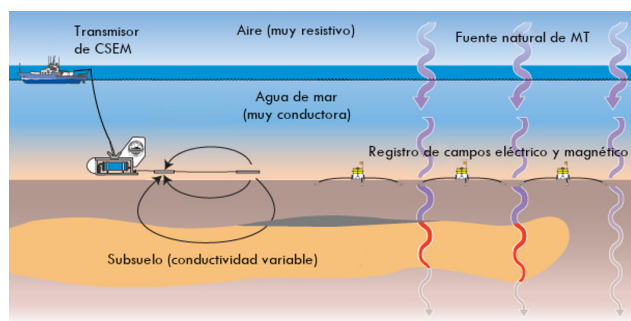


Figura 9. Esquema de la adquisición con métodos electromagnéticos MT y CSEM (Modificada de "CSEM and MT Exploration", 2009).

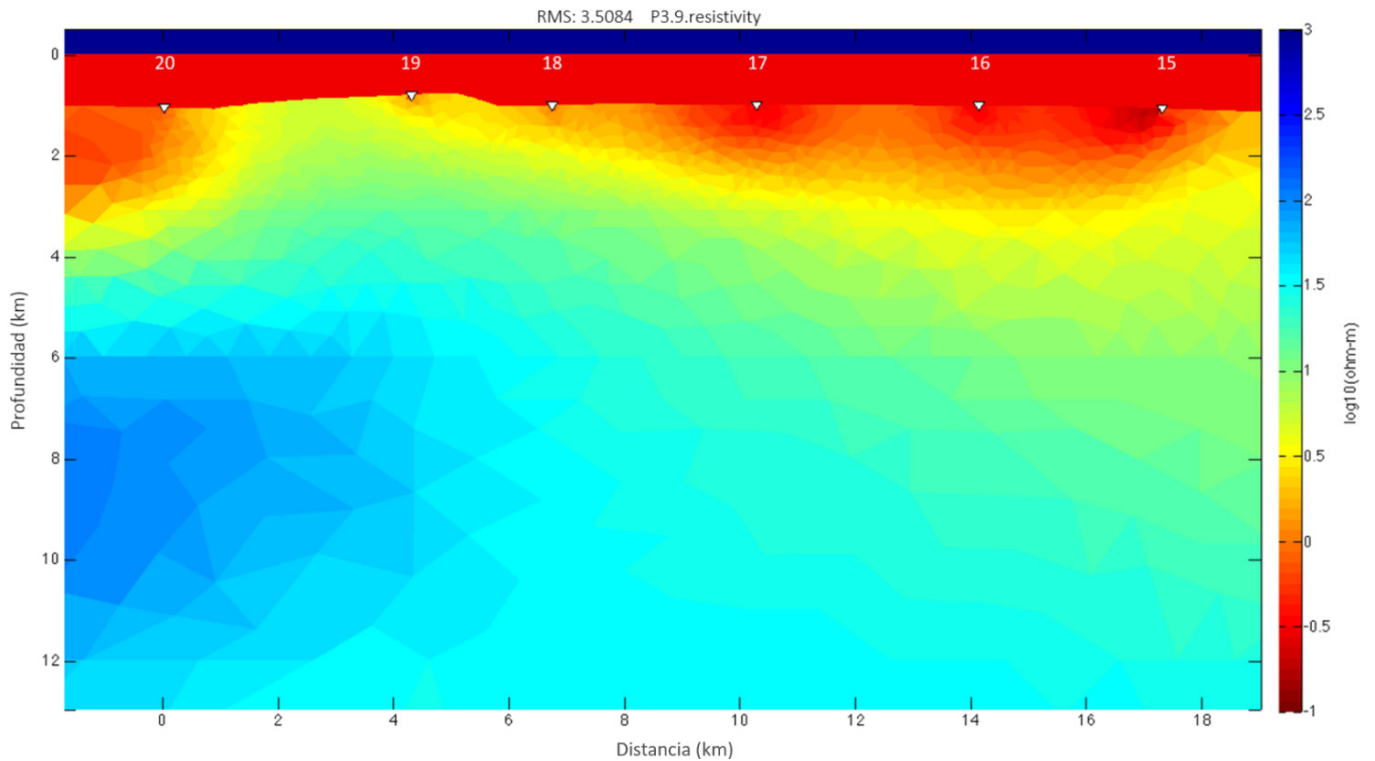


Figura 10. Perfil de resistividad eléctrica a partir de seis sitios MT en la zona de Santa Rosalía (Montiel-Álvarez, 2018).

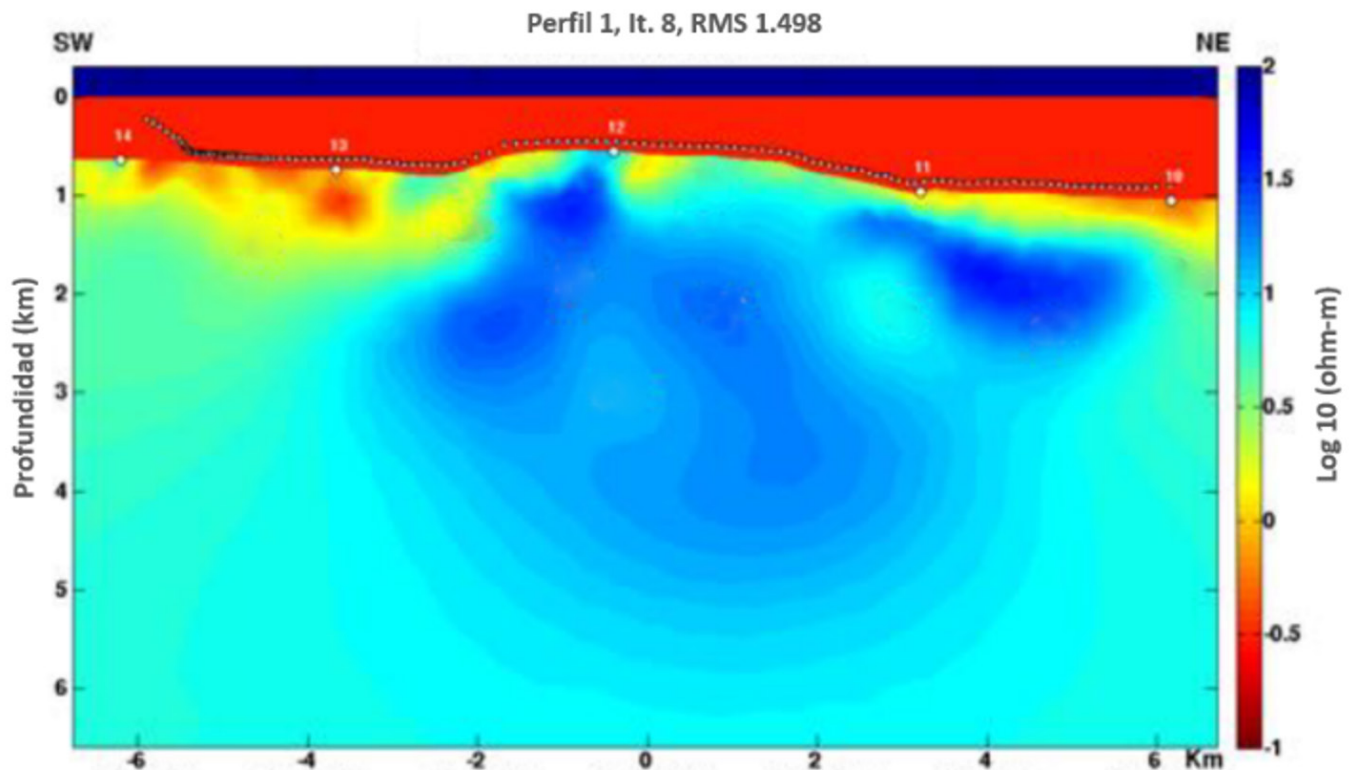


Figura 11. Perfil de resistividad eléctrica a partir de datos de fuente controlada en otro perfil de Santa Rosalía (Córdoba-Ramírez, 2018).

que representa la batimetría (forma del piso oceánico) y deja ver en la parte izquierda un pequeño montículo que corresponde al perfil de un monte volcánico submarino llamado Alto Vírgenes. Se observa que hacia los extremos de dicho monte hay zonas conductoras (en rojo) que alcanzan hasta 3 km de profundidad, éstas están asociadas a los sedimentos marinos que adquieren esos valores de resistividad gracias a que están saturados de agua salada. Se puede observar que el monte presenta valores más altos de resistividad con respecto a sus alrededores debido a que la composición es distinta, son montes volcánicos, que en general son rocas resistivas. A profundidad se observa un cuerpo resistivo (en azul) que aparece del SW del perfil, entre 4 y 12 km de profundidad que parece subir ligeramente hacia el monte volcánico.

De ese mismo perfil, se tiene el resultado de fuente controlada (Figura 11), que profundiza menos, pero tiene mejor resolución y más sensibilidad a cuerpos resistivos. Éste permitió detectar más estructura en la zona del volcán submarino, donde algunas formas coinciden con estructuras geológicas mencionadas en artículos previos.

4. Para saber más

Se obtuvieron tres perfiles en total de la zona de estudio de Santa Rosalía y se realizaron trabajos similares en la Cuenca de Wagner, en el extremo norte del Golfo de California, donde se han confirmado zonas de alto flujo de calor. Los resultados e interpretaciones de éstos proyectos, así como los trabajos de tesis de maestría y doctorado relacionados, se encuentran en la Colección Digital de CeMIEGeo (<https://colecciondigital.cemiegeo.org/xmlui/>) o serán puestos próximamente para su consulta pública. En ellos se dan detalles de las campañas de observación de datos, de las teorías que rigen los métodos, de las metodologías de procesamiento de datos usadas para obtener resultados, así

como de las interpretaciones geológicas y estructurales que se tienen hasta el momento.

Agradecimientos

Gracias a Luis Alberto Delgado Argote, editor de GEOS, y al revisor anónimo por sus comentarios y sugerencias para mejorar el manuscrito.

Bibliografía

- Cacho Carranza, Y. (2018). Estado de la Energía Geotérmica en México. En Petroquímex. Recuperado de <https://petroquimex.com/estado-de-la-energia-geotermica-en-mexico/>
- Catching Space Weather in the Act (2011). En NASA. Recuperado de https://www.nasa.gov/mission_pages/ibex/news/spaceweather.html
- Colección Digital CeMIEGeo. En CeMIEGeo <https://colecciondigital.cemiegeo.org/xmlui/>
- Constable, S. (2013). Instrumentation for marine magnetotelluric and controlled source electromagnetic sounding. Geophysical Prospecting, 61, 505-532.
- Córdoba Ramírez, F. (2018). Interpretación de datos electromagnéticos marinos de fuente controlada sobre la cresta volcánica Tortuga, Golfo de California (Tesis de maestría). CICESE, México
- CSEM and MT Exploration for Petroleum (2009). En Marine EM Laboratory. Recuperado de https://marineemlab.ucsd.edu/resources/concepts/CSEM_MT.html
- Hiriart Le Bert, G. (2011). Evaluación de la energía geotérmica en México. Informe para el Banco Interamericano de Desarrollo y la Comisión Reguladora de Energía.

IEA Geothermal (2019). 2018 Annual Report. Draft for GeoTHERM 2019. Recuperado de <http://iea-gia.org/publications-2/annual-reports/>

Recibido: 6 de mayo de 2019

Corregido por el autor: 20 de junio de 2019

Aceptación: 25 de junio de 2019

Instruments: EM Receiver (2009). En Marine EM Laboratory. Recuperado de <https://marineemlab.ucsd.edu/instruments/receiver.html>

Instruments: SUESI (2009). En Marine EM Laboratory. Recuperado de <https://marineemlab.ucsd.edu/instruments/suesi.html>

Montiel Álvarez, A.M. (2018). Estudio magnetotelúrico en el Golfo de California entre Isla Tortuga y Caldera Reforma para una prospección geotérmica preliminar (Tesis de maestría). CICESE, México.

Sen Nag, O. (2017). Largest Geothermal Power Plants In The World. En worldatlas. Recuperado de <https://www.worldatlas.com/articles/largest-geothermal-power-plants-in-the-world.html>

Technology for exploration of geothermal reservoirs (s.f.). En JOGMEC. Recuperado de http://www.jogmec.go.jp/english/geothermal/geothermal_10_000004.html

Umhoefer, P. J. (2011). Why did the Southern Gulf of California rupture so rapidly?—Oblique divergence across hot, weak lithosphere along a tectonically active margin. *GSA Today*, 21(11), 4-10.

Valle Pereña, J.A., y Ortega Navarro, H.O. (2012). *Prospectivas de Energías Renovables 2012–2026*. Secretaría de Energía (SENER). México.

Verhoeven, G. (2017). The reflection of two fields: electromagnetic radiation and its role in (aerial) imaging. *AARGNEWS*, 55, 13-18.