

Un perfil sísmico de reflexión somera en el complejo de la caldera La Reforma, Baja California Sur, México

Gómez-Ávila M.C.^{1,2*}, Gómez-Arias E.³, González-Escobar M.², González-Fernández A.² Sena-Lozoya E.B.², Lira-Martínez, M.A.¹.

¹Universidad Autónoma de Ciudad Juárez, Chihuahua, 32310, México.

²Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Ensenada, BC, 22860, México.

³CONACYT-Centro de Investigación Científica y de Educación Superior de Ensenada, Ensenada, BC, 22860, México.

*marianggy.gomez@uacj.mx

Resumen

El complejo de la caldera La Reforma, se localiza al este del complejo volcánico Las Tres Vírgenes y al norte de la población de Santa Rosalía, Baja California Sur. Actualmente, la caldera corresponde a una zona de interés geoenergético, por lo que el objetivo de este trabajo fue realizar la adquisición, procesamiento e interpretación de un perfil sísmico de reflexión somera para identificar posibles alteraciones en las propiedades físicas del subsuelo, como la elasticidad de los materiales (cuya variación se ve reflejada en la velocidad de propagación de las ondas elásticas) ocasionadas por la posible presencia de zonas de fallas y fracturas y también la posible existencia de alteración hidrotermal somera. La adquisición de los datos se realizó utilizando una fuente sísmica GISCO ESS500TM con marro de 222 kg. Se procesaron e interpretaron 2.2 km de datos sísmicos adquiridos en la caldera La Reforma, donde se identificaron estructuras geológicas y sismorelectores de interés. Los resultados obtenidos en este trabajo muestran numerosas fallas con buzamiento predominante al suroeste, además de dos reflectores sísmicos que podrían delimitar dos capas de basaltos y riolitas e ignimbritas, donde se infiere que las zonas de baja amplitud y velocidad podrían corresponder a zonas con alteración hidrotermal.

Palabras Claves: Complejo de la caldera La Reforma, Sísmica de reflexión, Sismorelectores, Geotermia.

Abstract

The La Reforma caldera complex is located east of the Las Tres Vírgenes volcanic complex and north of the town of Santa Rosalía, Baja California Sur. Currently, the caldera corresponds to an area of geoenergetic interest; hence, the objective of this work was to acquire, process, and interpret a shallow reflection seismic profile to identify possible alterations of the physical properties of the shallow subsoil, such as the elasticity of the materials (whose variation is reflected in the speed of propagation of elastic waves) caused by the possible presence of fault and fracture zones and also the possible existence of shallow hydrothermal alteration. Data acquisition was performed using a GISCO ESS500TM seismic source with a 222 kg hammer. 2.2 km of seismic data acquired in the La Reforma caldera were processed and interpreted, and geological structures and seismorelectors of interest were identified. The results obtained in this work show numerous faults dipping predominantly towards southwest. In addition, we interpret two seismic reflectors that could delimit two layers of basalts, rhyolites, and ignimbrites, where it is inferred that the zones of low amplitude and speed could correspond to zones of hydrothermal alteration.

Palabras Claves: La Reforma caldera complex, Seismic reflection, Seismorelectors, Geothermal prospecting.

Introducción

La Geotermia es una energía renovable y prácticamente inagotable, pues aprovecha el calor interno natural de la Tierra. El uso de esta energía tiene un impacto ambiental mínimo si es comparada con las energías no renovables (convencionales), ya que los fluidos hidrotermales que se extraen de los yacimientos (reservorios) para la producción y generación de energía eléctrica aporta mínimas emisiones de dióxido de carbono (CO_2) a la atmósfera (bajas emisiones de gases de efecto invernadero). La utilización de la geotermia como energía renovable ofrece muchas ventajas en cuanto a las formas de aprovechamiento del calor interno de la Tierra y en diversas aplicaciones que favorecen el desarrollo económico y tecnológico en la sociedad.

Las condiciones favorables para el desarrollo y explotación de la energía geotérmica se dan en regiones del planeta donde la actividad tectónica, sísmica y volcánica se configura para crear un yacimiento o campo geotérmico que pueda ser explorado principalmente para la generación de energía eléctrica. Otra forma de aprovechar el calor geotérmico es lo que se conoce como usos directos ya sea en procesos industriales, deshidratación de alimentos, climatización de viviendas, o balneología, entre otros.

México, es un país que por su localización geográfica, geológica y geotectónica cuenta con numerosas anomalías y manifestaciones geotérmicas tanto en los sitios cercanos a los límites de placas tectónicas y también en otras zonas ubicadas dentro de la placa continental. Por ello es necesario y pertinente explorar nuevas áreas con la finalidad de evaluar zonas con potencial geotérmico. Tal es el caso de las calderas la Reforma (CR), El Aguajito (CEA) y el complejo volcánico Las Tres Vírgenes (CVLTV),

los cuales se localizan al norte de la población de Santa Rosalía, Baja California Sur, México. En el CVLTV se ubica el campo geotérmico Las Tres Vírgenes (CGLTV), uno de los cuatro campos en México operado por la Comisión Federal de Electricidad (CFE). Actualmente, las calderas CR y CEA corresponden a zonas de interés geoenergético y, en estas áreas se realizaron estudios de exploración geofísica: Sena-Lozoya et al. (2020) realizaron estudios sísmicos en la CR (al noreste del CGLTV), generando modelos 1D y 2D aplicando el método MASW, en donde identifican tres capas de distintas velocidades sísmicas. Casallas et al. (2021) realizaron un análisis de estructuras del subsuelo basado en métodos sísmicos (en el CVLTV y en el CGLTV) y gravimétricos (en el CGLTV y en la CEA), elaborando un modelo 2D que representa las principales unidades litológicas y estructuras ubicadas bajo el subsuelo.

El método sísmico de reflexión se basa en el análisis de las ondas sísmicas reflejadas que viajan a través de diferentes interfaces del subsuelo y dicho método geofísico ha sido utilizado para delimitar la geometría del subsuelo, para identificar posibles fallas o fracturas, así como detectar los contrastes de impedancia acústica, que correspondan a distintas litologías en función de los cambios de las densidades de las rocas y velocidades sísmicas en el medio. La utilidad de los métodos sísmicos en los campos geotérmicos es principalmente definir la morfología del posible yacimiento geotérmico, identificar las principales secuencias litológicas y delimitar las zonas de fallas y fracturas que pudieran servir como conductos para la infiltración de aguas meteóricas y como espacios donde haya lugar para la circulación de fluidos geotérmicos.

En este trabajo se describen los resultados de la adquisición e interpretación de 2.2 km de datos sísmicos (reflexión) adquiridos en la CR en 2017.

Área de estudio

El CVLTV se localiza al norte de la población de Santa Rosalía, Baja California Sur, México. La vía de acceso al complejo es a través de la carretera federal número 1. En el CVLTV se localizan los volcanes denominados La Virgen, El Azufre y

el Viejo, los cuales se encuentran alineados en dirección SO-NE; hacia el este de los tres volcanes mencionados se encuentran la CR y hacia el norte la CA. El perfil sísmico de reflexión fue adquirido en las adyacencias de la CR y tiene una orientación suroeste-noreste (Figura 1).

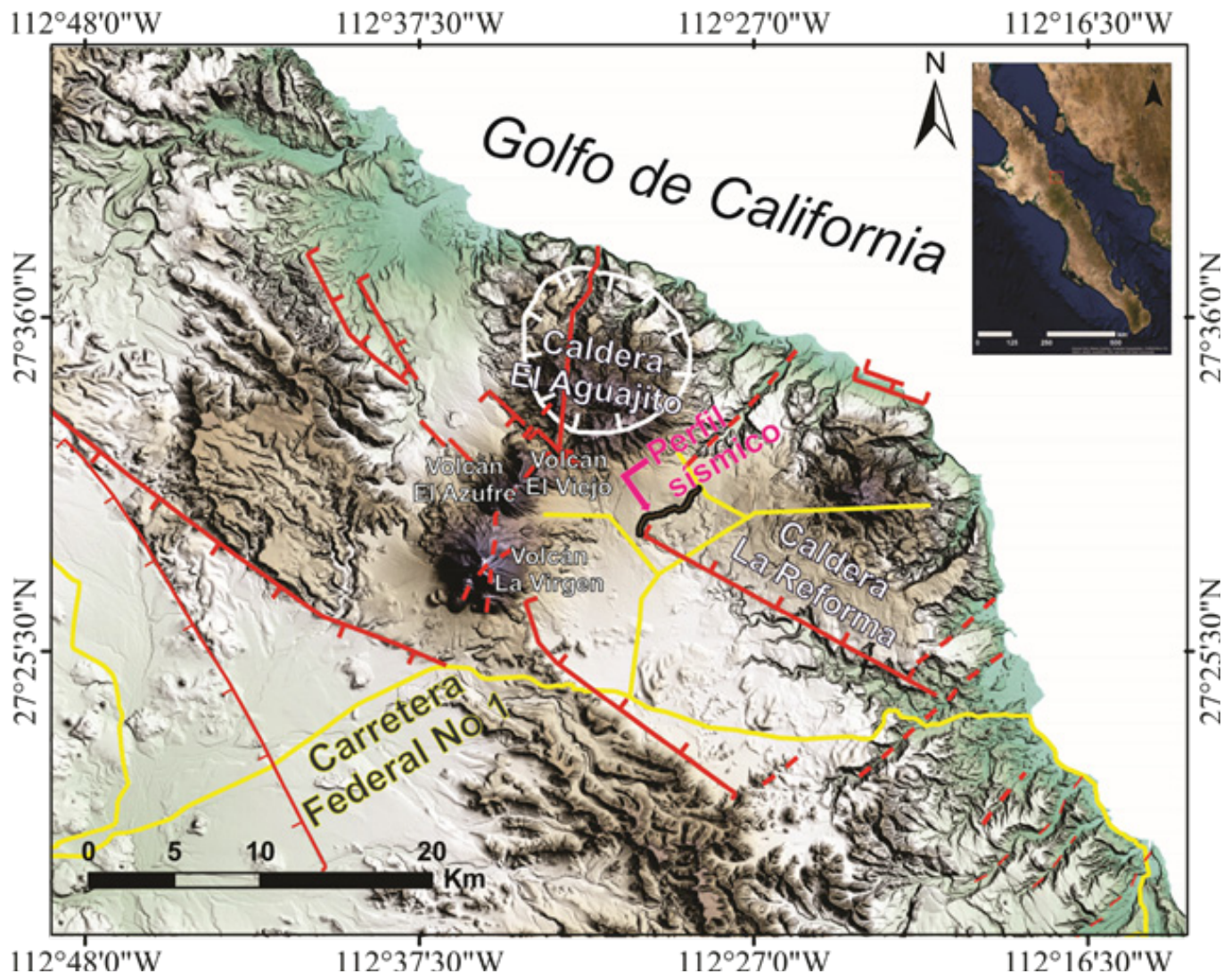


Figura 1. Mapa de ubicación del perfil sísmico en el área de estudio. Se muestra la localización de los tres volcanes alineados, de suroeste a noreste: volcán La Virgen, volcán El Azufre y volcán El Viejo, además de las calderas La Reforma y El Aguajito. La línea negra muestra la ubicación de los datos adquiridos para el perfil sísmico de reflexión con orientación suroeste-noreste. Las líneas continuas de color rojo corresponden a fallas normales y las líneas segmentadas en color rojo son fallas inferidas (tomadas de Antayhua Vera, 2017).

Geología local

El CVLTV los complejos de la CR y la CEA se encuentran dentro del dominio tectónico transtensional que provocaron la separación de Baja California del occidente de México, configurando el actual Golfo de California o Mar de Cortés. Dicho proceso se inició hace 12 Ma, pasando transicionalmente de un ambiente de subducción de las Placas Farallón y Guadalupe por debajo de la placa de Norte América, a un ambiente de “rift” después de los 5 Ma (Macías-Vásquez y Jiménez Salgado, 2013; Fletcher et al., 2007). Actualmente, el CVLTV se sitúa dentro del dominio tectónico de esfuerzos transtensionales asociado a cuencas “pull-apart” del sistema de fallas laterales derechas que controlan la apertura del Golfo de California (Stock y Hodges, 1989; Fletcher et al., 2007). Este tipo de régimen de esfuerzos dentro del área se caracteriza por un magmatismo esporádico pero persistente durante el Plioceno-Cuaternario.

Respecto a la actividad volcánica de la CR, se han identificado tres procesos principales de actividad piroclástica. Los dos más antiguos aparentemente se depositaron en ambiente marino y el más reciente es subaéreo (López et al., 1994). La expulsión de este material pudo generar diferentes colapsos caldéricos, sin embargo, la formación de la caldera solo es visible en el último ciclo eruptivo, que dejó un anillo de colapso que bordea a esta estructura (Figura 2). El núcleo levantado de la caldera es parte de un fenómeno resurgente asociado a un nuevo aporte de magma y los movimientos isostáticos compensatorios (López et al., 1994). Los flujos piroclásticos y de lavas cubrieron 10 km a la redonda de la CR con un espesor aproximado de 10 a 50 m, los cuales encuentran radialmente inclinados desde el centro de la caldera (Garduño-Monroy et al., 1993). El volumen inferido de rocas piroclásticas expulsadas es de alrededor de 5 a 10 km³, mientras que el de los basaltos es de

0.5 km³, aproximadamente (Garduño-Monroy et al., 1993; Dmochowski, 2005). De acuerdo a las edades radiométricas se infiere que la actividad volcánica en La Reforma cesó hace 0.8 Ma (López et al., 1994).

En la Figura 2 se muestran las principales unidades litológicas del área de estudio y las estructuras geológicas. Las estructuras más abundantes interpretadas son fallas normales laterales y otros lineamientos estructurales.

Metodología

Se realizó la adquisición de 2.2 km de datos de sísmica de reflexión somera en la CR en 2017 (Figura 3). Los datos fueron adquiridos utilizando una fuente sísmica impulsiva (GISCO ESS500) montada sobre un remolque y accionada eléctricamente con marro de 222 kg (Figura 4). La distancia entre estaciones fue de 10 m y la distancia entre puntos de tiro fue de 5 m, con un intervalo de muestreo de 0.125 ms y tiempo de grabación de 2s. Los datos sísmicos de reflexión multicanal fueron procesados con el software ProMax® siguiendo una secuencia convencional de procesamiento (Yilmaz, 2001) que incluyó las tres etapas (Figura 5). a) Pre-apilamiento: edición de trazas, geometría, corrección por estáticas, deconvolución, aplicación de filtros (top-mute, pasa bandas y F-K). b) Apilamiento: agrupamiento por CDP, análisis de velocidad y corrección por Normal Move Out (NMO). c) Post-apilamiento: divergencia esférica, migración en tiempo y migración en profundidad. La interpretación geológica se realizó en el software SeisWork® e incluyó un estudio de las principales características sismoestratigráficas y estructurales de las secuencias sísmicas observadas en el perfil sísmico de reflexión.

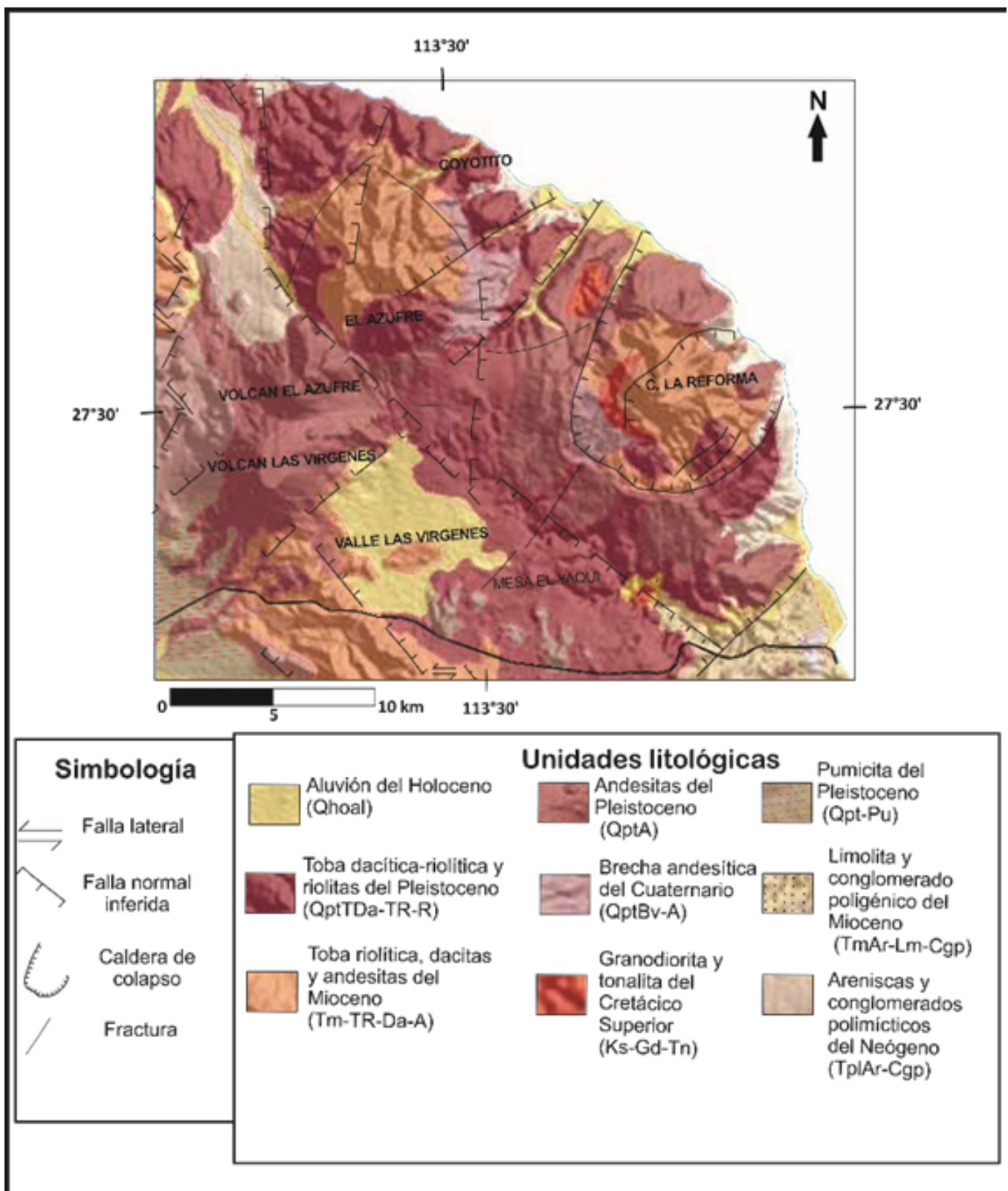


Figura 2. Mapa geológico del complejo volcánico Las Tres Virgenes y las calderas La Reforma y El Aguajito. Tomado y modificado de la carta geológica-minera de Baja California Sur, elaborada por el SGM (2008).



Figura 3. Ubicación del perfil sísmico de reflexión. Los círculos de color azul corresponden a cada uno de los disparos en la adquisición de los datos durante la etapa de campo, utilizando la Fuente sísmica impulsiva (GISCO-ESS500TM). Los círculos color morado corresponden a dos pozos de 55 m de profundidad (Pozo 1 y Pozo 2) los cuales fueron perforados en 2017.



Figura 4. Fuente sísmica impulsiva ESS500-GISCO™ montada sobre un remolque y accionada eléctricamente con marro de 222 kg, misma que fue utilizada en la adquisición de datos sísmicos de reflexión en la caldera La Reforma.

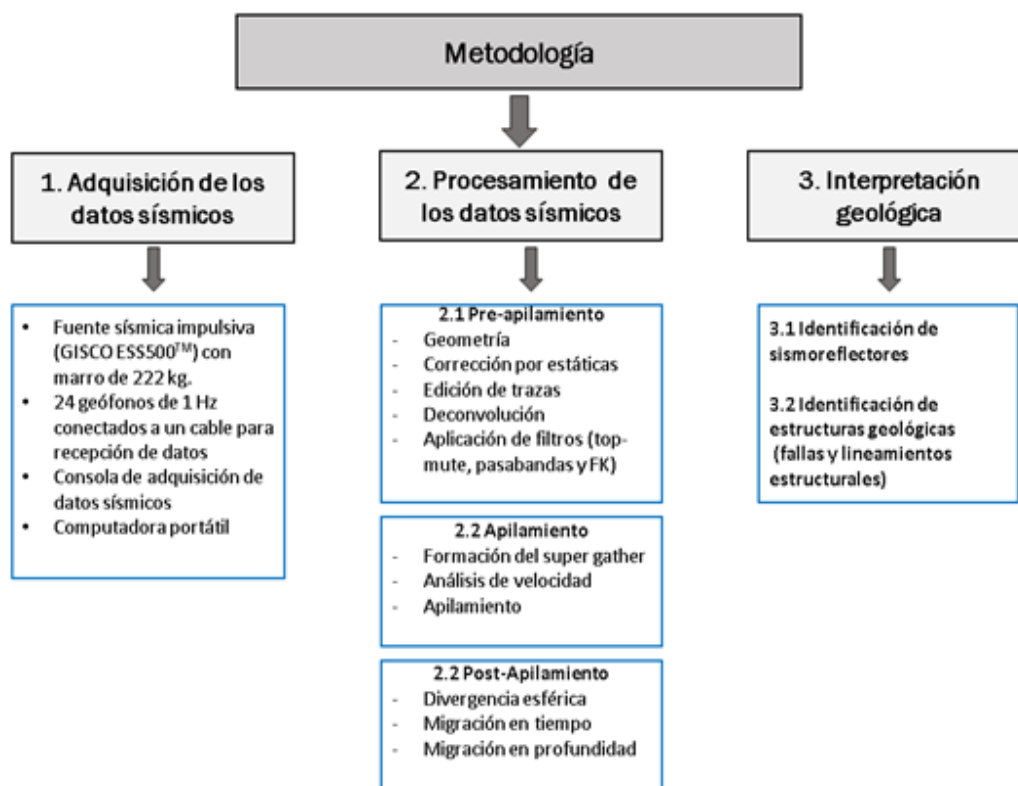


Figura 5. Diagrama de flujo de la adquisición, procesamiento e interpretación de los datos sísmicos de reflexión multicanal siguiendo la secuencia de procesamiento de datos basada en Yilmaz (2001).

Resultados

En el perfil sísmico de reflexión que se muestra en la Figura 6 (imagen superior), se identificaron dos capas, limitadas por los sismorefectores R1 y R2. El Reflector 1 es de alta amplitud y corresponde a la base de la capa de basaltos y riolitas (Garduño-Monroy et al., 1993), cuyas velocidades varían entre 2000-3000 m/s. Esta capa de basalto se puede correlacionar con la unidad litológica Basalto La Reforma, de posible edad Pleistoceno-Holoceno (?) (Macías-Vásquez y Jiménez Salgado, 2013).

El Reflector 2 representa la base de una capa de baja amplitud y baja velocidad, por lo que se podría correlacionar con las Ignimbritas Reforma inferior, reportadas por Macías-Vásquez y Jiménez Salgado (2013). Se identificaron ~30 fallas con diferente orientación y longitud, cuyo

buzamiento predomina hacia el SO y el NE. La presencia de estas fallas (aproximadamente 14 por cada km del perfil sísmico) indica que las rocas del subsuelo están fracturadas y falladas, lo cual se confirmó con las muestras de los núcleos de basaltos recuperados de los pozos P1 y P2 perforados en 2017 (profundidades de 55 m), lo que explica las pérdidas de circulación del lodo de perforación durante las operaciones. Estas zonas de baja amplitud pueden corresponder a cuerpos rocosos de menor densidad y, debido a que presentan rasgos sísmicos particulares como disminución en la amplitud de los sismorefectores, aumento en el espesor de los mismos, baja resolución en los bordes de los cuerpos y, a que se encuentra cerca de regiones con potencial geotérmico, es posible asociar estas zonas con frentes de alteración hidrotermal en el subsuelo (Kell, 2014).

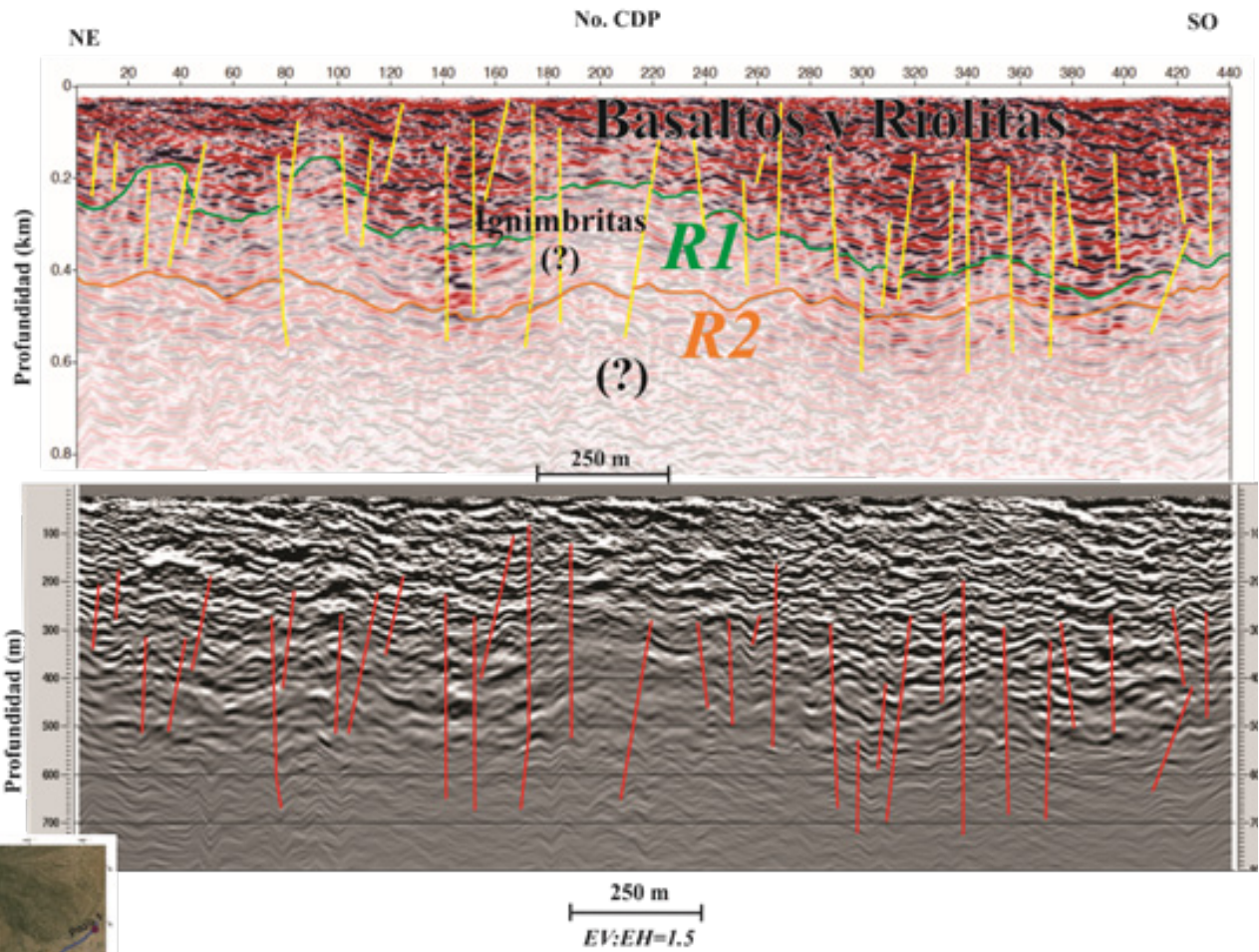


Figura 6. Imagen superior: Perfil sísmico de reflexión interpretado en el software SeisWorks®. Las líneas de color Amarillo corresponden a fallas. Las líneas de color verde y naranja corresponden a los reflectores 1 y 2 (R1 y R2), respectivamente. Imagen inferior: Perfil sísmico de reflexión en escala de grises, visualización en el software ProMax®, líneas color rojo representan las mismas fallas marcadas en color amarillo mostrados en el perfil superior.

Conclusiones

El uso de la fuente sísmica impulsiva ESS500-GISCO™ permitió un mayor alcance en profundidad, comparado con las fuentes utilizadas tradicionalmente (marro) en estudios sísmicos someros. Además, es la primera vez que se prueba este equipo en un área volcánica, obteniendo resultados favorables.

El procesamiento de los datos sísmicos de reflexión permitió mejorar la relación señal/ruido de los datos sísmicos tomados en la CR obteniendo como resultado un perfil sísmico de 2.2 km longitud, cuyo alcance en profundidad fue de ~400 m.

La interpretación del perfil sísmico de reflexión muestra dos sismorefltores: el primero corresponde a la base de los basaltos y riolitas (R1), mientras que el segundo sismorefltor (R2) podría ser la base de una capa de ignimbritas. También se infiere que las zonas de baja amplitud y velocidad (denotadas por el símbolo ?) podrían corresponder a zonas con presencia de alteración hidrotermal. En esta interpretación también se identificaron numerosas fallas que no afloran, cuyo buzamiento predominante es hacia el SO y NE.

Los resultados obtenidos en este estudio, en conjunto con los registros de temperatura de los pozos P1 y P2, serán de utilidad para el desarrollo de modelos térmicos con el fin de estimar y evaluar el potencial geotérmico de baja entalpía en la CR.

Agradecimientos

A los proyectos P03 del CeMIE-Geo (Campaña intensiva de exploración geotérmica de las Cuencas Wagner, Consag, Delfin, Guaymas y Alarcón del Sistema de rifts del Golfo de California”) y PN2016-2188 Proyectos de Desarrollo Científico Para Atender Problemas Nacionales-CONACYT (Estimación y evaluación del potencial geotérmico de sistemas de baja y mediana entalpía para usos directos y

generación de energía eléctrica con tecnología de ciclo binario: El caso de las calderas La Reforma y El Aguajito del complejo volcánico Las Tres Vírgenes, Baja California Sur). Un especial agradecimiento a Jaime Calderón González y Enrique Cruz Castillo Guerrero, quienes formaron parte del personal técnico del Departamento de Geofísica del CICESE, gracias por su apoyo durante la adquisición de los datos sísmicos. A Gilberto Zambrano Romero y al personal de la UMA (Unidad de Manejo y Aprovechamiento Sustentable del Borrego Cimarrón) por su apoyo para realizar este estudio en la caldera La Reforma. Finalmente, agradecemos los comentarios y observaciones del revisor anónimo que permitió mejorar y enriquecer el contenido del presente manuscrito.

Referencias

- Antayhua-Vera, Y., (2017). Caracterización sísmológica, aeromagnética y magnetotelúrica del campo volcánico y geotérmico de las Tres Vírgenes (B.C.S), México. Tesis de doctorado. Universidad Nacional Autónoma de México. <http://132.248.9.195/ptd2017/marzo/0757594/0757594.pdf>
- Casallas-Moreno, K.L., González-Escobar, M., Gómez-Arias, E., Mastache-Román, E.A., Gallegos-Castillo, C.A., González-Fernández, A., (2021). Analysis of subsurface structures based on seismic and gravimetric exploration methods in the Las Tres Vírgenes volcanic complex and geothermal field, Baja California Sur, Mexico, *Geothermics*, 92, 102026. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2020.102026>.
- Dmochowski, J. E., (2005). Application of MODIS-ASTER (Master) simulator data to geological mapping of young volcanic regions in Baja California, Mexico. Tesis de doctorado, California Institute of Technology, Pasadena, California. <https://thesis.library.caltech.edu/2096/1/JaneEDmochowskiThesis.pdf>

- Fletcher, J.M., Grove, M., Kimbrough, D., Lovera, O., Gehrels, G.E., (2007). Ridge-trench interactions and the Neogene tectonic evolution of the Magdalena shelf and southern Gulf of California: insights from detrital zircon U-Pb ages from the Magdalena fan and adjacent areas. *Geological Society of America Bulletin*, 119, 1313–1336. <https://doi.org/10.1130/B26067.1>
- Garduño-Monroy, V.H., Vargas-Ledezma, H., Campos-Enriquez, J.O., (1993). Preliminary geologic studies of Sierra El Aguajito (Baja California, Mexico): a resurgent-type caldera. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 59, 47–58. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(93\)90077-5](https://doi.org/10.1016/0377-0273(93)90077-5)
- Kell, A.M., (2014). The application of active-source seismic imaging techniques to transtensional problems the Walker Lane and Salton Trough. Tesis de doctorado, University of Nevada, Reno. <https://www.proquest.com/pagepdf/1559091891?accountid=63987>
- López, A., García, G., Arellano, G., (1994). Geological and geophysical studies at Las Tres Vírgenes, B.C.S., Mexico, geothermal zone. *Geothermal Resources Council Transactions*, 18, 275-280. <https://publications.mygeoenergynow.org/grc/1006992.pdf>
- Macías-Vásquez, J.L., Jiménez-Salgado, E., (2013). Estudio de estratigrafía y geología del complejo volcánico Tres Vírgenes, B.C.S. *Geotermia*, 26 (1), 14–23. <https://www.geotermia.org.mx/app/assets/media/2017/11/Geotermia-Vol26-1.pdf>
- Sena-Lozoya, E.B., González-Escobar, M., Gómez-Arias, E., González-Fernández, A., Gómez-Ávila, M., (2020). Seismic exploration survey northeast of the Tres Vírgenes Geothermal Field, Baja California Sur, Mexico: a new geothermal prospect. *Geothermics*, 84, 101743. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2019.101743>
- Servicio Geológico Mexicano, (2008). Carta geológica-minera del Estado de Baja California Sur, escala 1:500000. http://www.sgm.gob.mx/cartas/Cartas_Ed.jsp
- Stock, J.M., Hodges, K.V., (1989). Pre-Pliocene extension around the Gulf of California and the transfer of Baja California to the Pacific plate. *Tectonics*, 8 (1), 99–115. <https://doi.org/10.1029/TC008i001p00099>
- Yilmaz, O., (2001). Seismic Data Analysis. Volumen I y II, Investigations in Geophysics No. 10. Society of Exploration Geophysicists, Tulsa.

Manuscrito recibido: 7 de abril de 2022

Recepción del manuscrito corregido: 13 de mayo de 2022

Manuscrito aceptado: 10 de junio 2022