

Aplicación de Tomografías de Resistividad Eléctrica (TRE) para la identificación de tubo-lavas, caso de estudio: El Quebracho, Tulancingo, Hidalgo, México.

Application of Electrical Resistivity Tomography (ERT) for the identification of lava - tubes case study: El Quebracho, Tulancingo, Hidalgo, Mexico.

B. I. Moreno–Rivera ^{a,*}, F. Y. Pérez–Corona ^a, I. Árcega–Santillán ^a, D. I. Juárez–Alvarado ^b

^a Área Académica de Ciencias de la Tierra y Materiales, Ingeniería en Geología Ambiental, Universidad Autónoma del Estado de Hidalgo, 42184, Pachuca, Hidalgo, México.

^b Servicio Geológico Mexicano, Blvd. Felipe Ángeles Kilómetro 93, Centro Minero, 42080 Pachuca de Soto, Hidalgo.

Resumen

En la localidad de Huajomulco, municipio de Tulancingo, Hidalgo se encuentra una cavidad en el subsuelo denominada “El Quebracho”, la cual geológicamente tiene rasgos de tubo de lava o también llamada tubo-lava, generadas debido a derrames de lava fluida de tipo basálticas. La Tomografía de Resistividad Eléctrica (TRE) es una herramienta mediante la cual se logra caracterizar el subsuelo a través de varias mediciones de potencial eléctrico a lo largo del terreno, teniendo como respuesta los diferentes valores de resistividad respectivos de cada uno de los materiales, en este caso se utilizó para detectar y caracterizar la estructura. Se obtuvieron 5 perfiles de resistividad 2D a lo largo de los cuales se logró identificar el tubo-lava, así como unidades geoeléctricas, morfología, litología y los diversos materiales del subsuelo.

De acuerdo con los datos de resistividad observados de las TRE se logró obtener resultados favorables para la caracterización 2D del tubo-lava, comprobando la versatilidad que tiene el método al momento de aplicarse. Esta metodología puede ser empleada en estudios posteriores para determinar el contexto geológico del subsuelo y evaluar los peligros geológicos en la localidad debido a la posible existencia de un sistema de Tubo-lavas.

Palabras Clave:

Tubo-lava, tomografía de resistividad eléctrica, detección y caracterización.

Abstract

The town of Huajomulco in the municipality of Tulancingo in Hidalgo State has a cavity in the subsoil called "El Quebracho", which geologically has features of lava tube or also called tube-lava, generated due to spills of viscous lava of basaltic type. Electrical Resistivity Tomography (ERT) is a tool by which the terrain is characterized through several measurements of electrical potential along the terrain, having as an answer the different resistivity values of each of the terrain materials. In this case it was used to determine and characterize the structure that suggests being a lava tube. Five 2D resistivity profiles were obtained along which the structure was identified, as well as geoelectric units, morphology, lithology and the different subsoil materials.

According to the resistivity results obtained with the SRT, it was possible to obtain favorable results for 2D characterization of the tube-lava, proving the method's versatility when applied. Therefore, this methodology can be used in subsequent studies to determine the geological context of the subsoil and evaluate the geological risks in the locality due to the existence of a possible Tube-lava system.

Keywords:

Lava tubes, electrical resistivity tomography, detection and characterization.

1. Introducción

Los tubo-lavas en el mundo son estructuras muy escasas y particulares, ya que se necesitan condiciones determinadas para su formación estando restringidas a derrames de lavas muy fluidas y deben presentar ciertas características muy específicas, como la temperatura y tipo de erupción. En la comunidad de Huajomulco, municipio de Tulancingo, Hidalgo se tiene evidencia de la

existencia de dichas estructuras (Islas, M. A., 2022), las cuales de manera local se denominan “resumideros”, siendo uno de los más grandes el de “El Quebracho” y de acuerdo con la geología del sitio predominan basaltos haciendo factible que algunos de estos resumideros correspondan a las estructuras volcánicas con forma de tubo.

Las Tomografías de Resistividad Eléctrica (TREs), consisten en inyectar corriente al medio mediante un arreglo

*Autor para la correspondencia: mo368177@uaeh.edu.mx

Correo electrónico: mo368177@uaeh.edu.mx (Bryan Isaac Moreno – Rivera), fred_perez@uaeh.edu.mx (Fred Yoan Pérez – Corona), ingrid_arcega@uaeh.edu.mx (Ingrid Árcega – Santillán), diegojuarez@sgm.gob.mx (Diego Ignacio Juárez – Alvarado)

tetraelectrónico, el cual se divide en pares, colocados de manera equidistante con una geometría que es definida mediante el arreglo que se va a emplear, los más usados son el arreglo Wenner, Polo-Dipolo y Dipolo-Dipolo, obteniendo los valores de resistividad en diferentes puntos del terreno y creando una condensada nube de puntos, a partir de los cuales mediante su procesamiento se puede crear una imagen 2D de valores de resistividad.

Para el caso de este trabajo de investigación se realizaron 5 líneas de TERs con un equipo Syscal Kid Switch de la marca Iris. Las líneas tuvieron una separación de 10 m entre cada una, con una orientación W – E, una longitud total de 72 m y una separación entre electrodos de 3 m, se empleó el arreglo Wenner ya que es el que mayor definición en la horizontal y profundidad ofrece.

Con este método se puede llegar a identificar la litología, estructuras geológicas, así como reconocer materiales ajenos al entorno natural, por lo que es una herramienta que se puede aplicar en la realización de Atlas de Riesgos, estudios hidrogeológicos, minería, análisis estructurales y estudios espeleológicos principalmente (Daza Brunet, 2017; Hill et al., 1995).

Debido al gran crecimiento poblacional que ha tenido en las últimas décadas la ciudad de Tulancingo la mancha urbana se ha expandido, en algunas zonas como la Colonia Javier Rojo Gómez y/o Huajomulco, se han identificado estructuras con forma de tubo-lavas por lo que es de suma importancia estudiar las características del suelo y subsuelo para planificar el crecimiento de la ciudad y así evitar el riesgo de hundimiento por algún colapso del techo de las cavidades y prevenir pérdidas económicas por daño a la infraestructura urbana, además, los tubo-lavas son estructuras geológicas que captan el agua superficial y posteriormente se infiltra hacia los mantos acuíferos funcionando como zonas de recarga, siendo la geofísica mediante las TRES una excelente herramienta para la detección y caracterización de dichas estructuras

1.1 Geología

1.1.1 Geología Regional

La zona de estudio se encuentra en la provincia geológica de la Faja Volcánica Transmexicana, en la subprovincia de Lagos y Volcanes de Anáhuac, regiones características de grandes sierras volcánicas o aparatos individuales que se alternan con amplios vasos lacustres. La mayoría de las unidades volcánicas son de composición ácida y provenientes de erupciones explosivas, sin embargo, también es común encontrar derrames basálticos asociados a erupciones fisurales.

De acuerdo con lo descrito en el informe de la carta geológico-minera con clave F14-D82 (Ramírez et al., 2016), las unidades litológicas de la región donde se ubica el tubo de lava sobreyacen a un basamento sedimentario cretácico el cual no se encuentra expuesto en la zona de estudio, sobre éste se emplazaron productos volcánicos del Plioceno-Pleistoceno, dichas rocas albergan al tubo de lava, son conocidas como Formación San Cristóbal, nomenclatura definida por Geyne y colaboradores en 1963, describiéndolas como derrames densos de andesita olivínica con cantidades pequeñas de capas tobáceas y clásticas. Generalmente se encuentran en intercalación con derrames de lava, brechas volcánicas y piroclastos.

Posteriormente, en el Pleistoceno se desarrolló el complejo volcánico riolítico Las Navajas, estas rocas afloran al norponiente

de la zona de estudio y sobreyace a la unidad en la que se desarrolló el Tubo de lava. La unidad anterior fue sucedida por emisiones de lava basálticas y explosiones volcánicas que depositaron material piroclástico, eventos que ocurrieron a través de conos monogenéticos. Finalmente, durante el cuaternario, se depositaron materiales finos mal clasificados de limo y arena rellenando depresiones y valles (Figura 1).

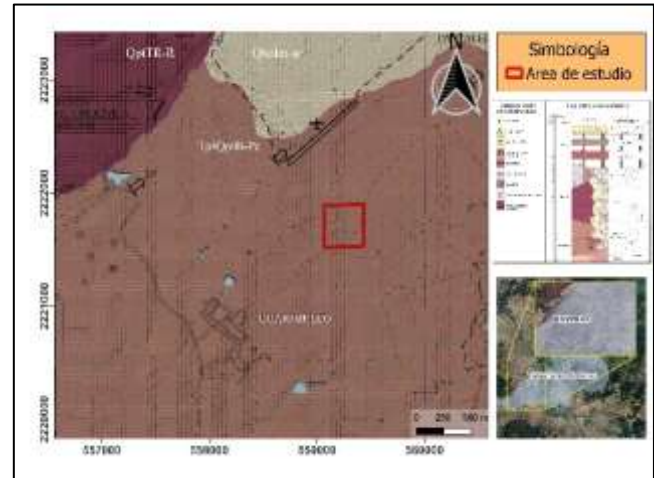


Figura 1: Mapa de geología modificado de Ramírez et al., 2016.

1.1.2. Geología Local

El área de estudio se encuentra en zonas constituidas por derrames de lava y brechas volcánicas, correspondientes a la Formación San Cristóbal. A partir de un par de muestras tomadas en el margen sur del Río Tulancingo se dató esta unidad por el método K-Ar, arrojando una edad de 2.58 ± 0.15 Ma. (Sánchez et al., 2008). Segerstrom (1961) interpretó que los afloramientos meridionales de esta unidad concuerdan con erupciones volcánicas acontecidas a lo largo de grietas, eventos no explosivos.

Las rocas que se identificaron en el sitio corresponden a derrames basálticos a la base y brechas volcánicas en la cima del corte descrito. Mientras que en ambas se observa un gran contenido vesicular indicativas de la liberación de gases, solo en la parte inferior se pudo observar estructuras cordadas lo que es característico de una lava muy fluida.

La roca es de color gris oscuro, de textura afanítica en la cual se alcanzan a distinguir minerales de olivino. En la base del perfil, lo correspondiente a flujos basálticos, la roca está bien consolidada y sana, mientras que, en la cima del corte, en la zona de brecha, aflora roca basáltica brechada, menos densa, con planos de discontinuidad donde se puede observar un ligero intemperismo generando ligeras coloraciones en tonos rojizos.

Las erupciones que dieron origen al material rocoso del sitio fueron provocadas por aparatos volcánicos cercanos al área, que a su vez fueron afectados por esfuerzos transcompresivos y transtensivos producto de la subducción de la placa de cocos en el plioceno, estos esfuerzos reactivaron fallas de rumbo con orientación NE – SW, que reactivaron zonas de fallas y fracturas las cuales crearon fisuras en las estructuras ya mencionadas, así como en la corteza (Castro García, 1991).

1.2 Tubos-lava

Son estructuras volcánicas que reciben el nombre por su forma similar a la de un tubo. La génesis de este tipo de estructuras se da a partir de un flujo de lava basáltico, el cual al tener contacto con la atmósfera genera una diferencia de temperaturas, se comienza a enfriar la parte externa del flujo que con el paso del tiempo solidifica y crea una capa más estable, poco a poco el flujo comienza a disminuir y dicha capa queda como remanente del ya mencionado flujo de lava (Dóniz *et al.*, 2007).

Los tubos-lava son denominados estructuras singenéticas, ya que se formaron al mismo tiempo que su roca encajante o encajonante.

El comportamiento de dichos tubos es similar al de un río ya que el fluido (en este caso lava) desciende a lo largo de una pendiente siendo esta la ladera del volcán (Figura 2-a), el proceso se lleva a cabo hasta cierto punto en donde el fluido disminuye y el techo de la estructura se encuentra en un punto de solidificación maduro, en donde se mantiene muy bien consolidado (Figura 2-b), al finalizar el evento de erupción y vaciarse por completo esta estructura con forma de tubo queda como evidencia del flujo de lava que estuvo presente. (Figura 2-c) (Daza Brunet, 2015, González Pimentel, 2019).

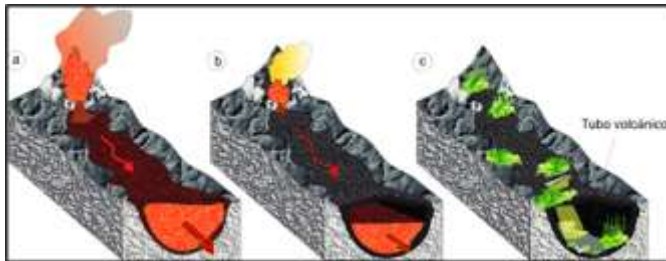


Figura 2: Estados de un tubo de lava tomado de Martínez *et al.*, 2011.

1.3 Método geoelectrico

Tiene como fin medir la resistividad a lo largo del terreno mediante la inducción de corriente continua al medio por electrodos, los cuales obtienen los valores de la resistividad del terreno mediante la diferencia de potencial eléctrico entre 2 puntos, al inyectar una señal de corriente al área se obtiene el valor el cual indica qué tan resistivo es el material que se encuentra en el subsuelo (Orellana, 1972).

El método consiste en inyectar la corriente al medio por un arreglo tetraelectrónico, el cual se divide en pares. Al par de electrodos que induce la corriente se les llamarán electrodos de corriente y en el arreglo se les llamará A y B. El otro par de electrodos, que son los que miden la diferencia de potencial, les llamaremos electrodos de potencial y en el arreglo M y N (Orellana, 1972).

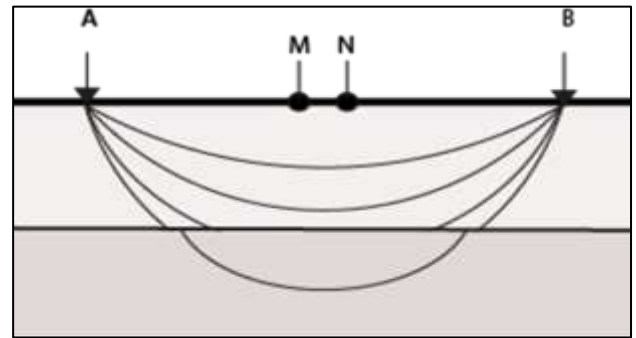


Figura 3: Esquema del método geoelectrico.

1.4 Tomografía de resistividad eléctrica (TRE)

Este método geoelectrico tiene por objetivo crear una imagen en 2D o 3D, según sea su aplicación, para identificar los materiales que se encuentran en el subsuelo, todo esto mediante la obtención de los datos de resistividad del terreno.

En este caso los electrodos son colocados de manera equidistante con una geometría que es definida mediante el arreglo que se desea usar, los más usados son el arreglo Wenner, Polo-Dipolo y Dipolo – Dipolo. Se colocan entre 24 y 96 electrodos, dependiendo del área y objetivo de estudio, de esta manera al tener tantos electrodos los pares de potencial y corriente pueden repetirse a lo largo de todo el tendido obteniendo los valores de resistividad en diferentes puntos del terreno y creando una condensada nube de puntos la cual arroja una imagen 2D de valores de resistividad.

Con este método se pueden llegar a identificar rasgos geológicos como la litología, estructuras e identificar materiales ajenos al entorno natural, siendo uno de los métodos geofísicos más viable en estos casos por su buena resolución tanto en la horizontal y vertical. Además de que la adquisición y procesamiento de los datos es más sencillo y fiable comparado con otros métodos (Constantino Rodríguez, 2011).

2. Desarrollo experimental

2.1 Adquisición de datos

El tubo-lava se localizó entre las coordenadas UTM X=2221605, Y= 559177, a una altitud entre 2212 a 2109 m.s.n.m., en donde se realizaron 5 líneas de Tomografía de Resistividad Eléctrica (Figura 4), con el equipo Syscal Kid Switch, de la marca Iris (Figura 5). Las líneas tuvieron una separación de 10 m entre cada una, con una orientación W – E, una longitud total de 72 m y una separación entre electrodos de 3 m (Figura 6), empleando el arreglo Wenner ya que es el que mayor definición en la horizontal ofrece (Constantino Rodríguez, 2011).



Figura 4: Mapa de ubicación de las líneas de TRE.



Figura 5: Resistivímetro Syscal Kid Switch.



Figura 6: Tendido de línea de TRE.

2.2 Procesado de datos

Los datos fueron procesados a través del método de inversión de mínimos cuadrados, obteniendo valores de resistividad representados de forma gráfica.

Al procesar los datos se obtiene una imagen dividida en bloques horizontales y verticales, similar a los pixeles de una pantalla, asignándole un valor de resistividad a cada uno de los bloques creando un modelo bidimensional.

Posteriormente, el modelo muestra los distintos valores de resistividad asociada a la distribución de los diferentes materiales geológicos en el subsuelo de acuerdo a la tabla 1 (Pedromo, 2009).

Tabla 1: Resistividad de los materiales (Orellana, 1972).

Material	Resistividad
Rocas ígneas y metamórficas alteradas	>1000 Ω .m
Rocas ígneas y metamórficas alteradas, o fuertemente diaclasadas (fracturadas)	100 a 1000 Ω .m
Calizas y areniscas	100 a más de 1000 Ω .m
Arcillas	1 a 10 Ω .m
Limos	10 a 30 Ω .m
Arenas	30 a 50 Ω .m
Gravas	50 a más de 100 Ω .m

3. Resultados y Discusión

A partir de la inversión y representación de los datos en un modelo se lograron identificar distintas unidades geoelectricas, las cuales fueron interpretadas correlacionando los valores obtenidos en los distintos perfiles con la tabla 1, teniendo en cuenta siempre nuestra geología para tener un mayor acierto en las interpretaciones.

En cada una de las líneas de TRE se lograron observar similitud en los datos, así como identificar la estructura en cada una de estas.

3.1 Interpretación y presentación de los perfiles de resistividad

En la tabla 2 se muestran los rangos de resistividad de cada unidad geoelectrica (UG) encontrada a lo largo de las 5 líneas que fueron denominadas como Q1 a Q5 respectivamente, incluyendo datos estructurales como lo son la profundidad, longitud, así como tipo de estructura y/o unidad geológica de acuerdo con los valores de resistividad.

Tabla 2. Rangos de resistividad, distribución y datos estructurales asociados a cada UG.

Línea – Unidad Geoelectrónica	Inicio (X, Y)	Final (X, Y)	Resistividad ($\Omega \cdot m$)	Profundidad (m)	Longitud (m)	Estructura y/o Unidad Geológica
Q1 – UG1			2800 - 2000	6 a 12	26	Cavidad
Q1 – UG2	559140,	559212,	2000 - 1300	5 a 12	41	Basalto
Q1 – UG3	2221612	2221612	1300 - 500	0 a 12	72	Brecha
Q1 – UG4			500 a 3	0 a 12	72	Limos - Arenas
Q2 – UG1			2500 - 1900	6 a 12	35	Cavidad
Q2 – UG2	559140,	559213,	1900 - 1300	5 a 12	57	Basalto
Q2 – UG3	2221624	2221623	1300 - 500	0 a 12	72	Brecha
Q2 – UG4			500 a 3	0 a 12	72	Limos - Arenas
Q3 – UG1			2700 - 2100	6 a 12	27	Cavidad
Q3 – UG2	559145,	559218,	2100 - 1300	4 a 12	58	Basalto
Q3 – UG3	2221634	2221634	1300 - 500	0 a 12	72	Brecha
Q3 – UG4			500 a 3	0 a 12	72	Limos - Arenas
Q4 – UG1			2400 - 1800	5 a 12	30	Cavidad
Q4 – UG2	559145,	559217,	1800 - 1200	4 a 12	44	Basalto
Q4 – UG3	2221645	2221645	1200 - 600	0 a 12	72	Brecha
Q4 – UG4			600 a 3	0 a 12	72	Limos - Arenas
Q5 – UG1			2800 - 1800	4 a 12	20	Cavidad
Q5 – UG2	559144,	559216,	1800 - 1200	3 a 12	53	Basalto
Q5 – UG3	2221657	2221656	1200 - 600	0 a 12	72	Brecha
Q5 – UG4			600 a 3	0 a 12	72	Limos - Arenas

3.2 Interpretación integral de los perfiles.

Se ha podido observar que los perfiles de resistividad son una herramienta bastante buena para este tipo de estudios, ya que nos brindan una imagen más representativa y fácil de digerir e interpretar teniendo así una mejor respuesta y más fiel a lo que se podría encontrar en la zona.

Dentro de los 5 perfiles de resistividad 2D se lograron identificar de manera constante las mismas 4 unidades geoelectrónicas, en donde la UG1, correspondiente a la cavidad ya que siempre se encontró entre los valores de resistividad más altos (1800 a 2800 Ohm – m), debido a que al estar vacía la cavidad el flujo de corriente se encuentra interrumpido y es por eso que los valores de resistividad aumentan abruptamente (Figura 7).

Por otra parte, la UG2 es asociada a los basaltos con baja alteración y fracturación producto del derrame lávico, posee valores de resistividad correspondientes a rocas relativamente sanas o ligeramente alteradas (1200 a 1800 Ohm – m), teniendo ligeras variaciones en los rangos debido al estado de la roca, ya que si la roca se encuentra sana opone mayor resistencia al flujo de corriente (Figura 7).

La UG3 con rangos medios – bajos (1200 a 600 Ohm – m), se asocia a brechas, las cuales tienen propiedades que ocasionan que la resistividad de estos materiales sea menor que materiales con características competentes (Figura 7).

Y por último la UG4 que fue la que tuvo los valores más bajos (600 a 3 Ohm – m), correspondiendo a material no consolidado, principalmente suelo el cual al no ser un material tan compacto permite con mayor facilidad el flujo de la corriente, ocasionando que penetre con mayor facilidad debido a la escasa o nula resistividad del material (Figura 7).

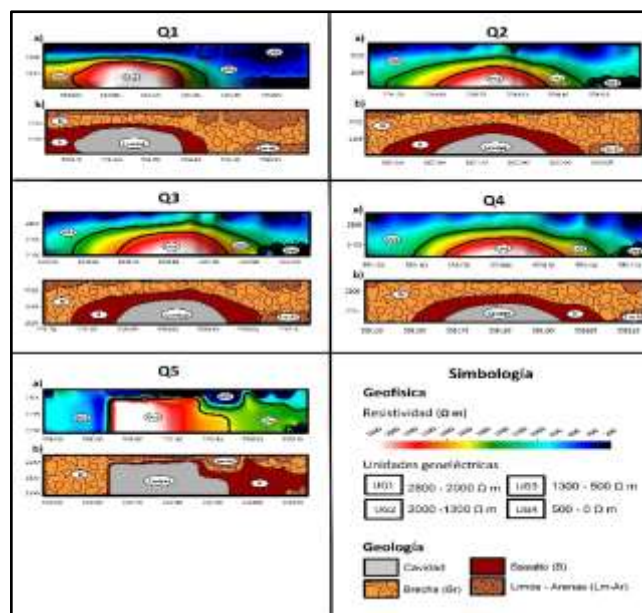


Figura 7. Configuración e interpretación de los perfiles de resistividad en los que a) perfil geoelectrónico y b) interpretación geológica.

Conclusiones

Las TREs son un método geofísico que permite investigar la existencia de cavidades, su morfología, profundidad y amplitud de las oquedades, espesor del techo de las cavidades, y caracterización de las unidades litológicas, parámetros que son de suma importancia para determinar la susceptibilidad de colapso del techo de las cavidades lo cual implica poder anticipar un proceso geológico de hundimiento, fenómeno con potencial de dañar los sistemas expuestos que pudieran estar directamente en la superficie de los tubos de lava.

El método de TRE permitió determinar las profundidades y caracterizar la geometría de la estructura tubo-lava conocida como “El Quebracho” en la comunidad de Huajomulco. Se obtuvieron 5 modelos 2D de resistividad y se identificaron las respuestas y morfología de las unidades geoelectricas asociadas a la cavidad volcánica, la cual está recubierta por una capa de basalto relativamente sano, que permite que la estructura se mantenga estable, confirmando que se trata de un tubo-lava. Con los perfiles se definió que el tubo tiene un ancho de aproximadamente de 20 a 35 m y se puede encontrar desde los 4 metros hasta más de 12 m de profundidad.

De acuerdo con los resultados el método de TRE detectó y caracterizó eficazmente la tubo-lava, por lo que se concluye que es un excelente método para la detección y caracterización de cavidades ya sean antropogénicas, kársticas o en este caso volcánicas, permitiendo tener un buen control de datos sobre dichas estructuras. Los resultados tienen una relevancia importante ya que de manera indirecta se pueden detectar más estructuras de este tipo ayudando a caracterizar y determinar el posible riesgo geológico que existe en la zona de estudio, así como relacionar dichas estructuras a su impacto hidrogeológico en la recarga del acuífero del Valle de Tulancingo.

La eficacia demostrada en este trabajo del método de TRE para determinar las oquedades del subsuelo y considerando que se han descubierto otros tubos de lava en partes contiguas donde también aflora la Formación San Cristóbal se considera pertinente realizar este tipo de trabajos previo a la edificación de infraestructura, así mismo, tratar de aprovechar estas estructuras con actividades ecoturísticas o de índole educacional y científico.

Conflicto de intereses

Los autores declaran que no existen conflictos de intereses.

Referencias

- Castro García A. (1991). Geología volcánica de la región de Tulancingo, Estado de Hidalgo (Tesis de Ingeniería). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Constantino Rodríguez, L. D. (2011). Método de Tomografía Eléctrica para determinar Estructuras Volcánicas (Tesina de Licenciatura). Universidad Nacional Autónoma de México.
- Daza Brunet, R. (2015). Distribución, composición y génesis (biótica/abiótica) de los espeleotemas de las cuevas volcánicas de la Isla Terceira (Azores, Portugal) (Tesis de doctorado). Universidad Complutense de Madrid, Madrid.
- Detay, M. y Hróarsson, B. (2011). Túneles de lava. *Investigación y ciencia*, (420), 62-67. Recuperado 23 de agosto de 2021, de <https://www.investigacionyciencia.es/revistas/investigacion-y-ciencia/la-fisica-de-la-inteligencia-533/tneles-de-lava-9131>.
- Dóniz, J., Coello, E., Romero, C., & Guillén, C. (2007). Valoración del patrimonio geomorfológico del tubo volcánico de Montaña del Castillo (Tenerife, Canarias). *Minus*, 15, 85-94.
- Geyne A. R., Fries, C., Segerstrom, K., Wilson, I.F., 1963, Geology and mineral deposits of the Pachuca - Real del Monte State of Hidalgo, Mexico. Consejo de Recursos Minerales No Renovables.
- González Pimentel, J. L. (2019). Microorganismos de las cuevas volcánicas de la palma (islas canarias): diversidad y potencial uso biotecnológico (Tesis de Doctorado). Universidad Pablo de Olavide, Sevilla.
- Hill, CA y Forti, P. (1995). La clasificación de los minerales de cuevas y espeleotemas. *Revista Internacional de Espeleología*, 24 (1), 5.
- Islas, M. A.. (2022). Desazolver presas permitirá revertir déficit de acuífero. 31 de Mayo de 2022, de Criterio Sitio web: <https://criteriohidalgo.com/regiones/desazolver-presas-permitiria-revertir-deficit-de-acuifero>.
- Martínez, R. A. L., Daza, R., & Alcántara, R. (2021). Cuevas volcánicas: entre la realidad y la ficción. *Revista Digital Universitaria*, 22(2).
- Orellana, E. (1972). Prospección geoelectrica en corriente continua (Vol. 1). Madrid: Paraninfo.
- Pedromo S., 2009. Tomografía eléctrica en apoyo de la investigación arqueológica (Tesis de Licenciatura). Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas. Universidad Nacional de La Plata. p. 43.
- Ramírez T. E., Uribe L. J., Galeana G. O. A., Torres R. M., Bahena E. F. M. y Luna C. H. F. 2016. Informe y carta geológico-minera Tulancingo, F14-D82, escala 1:50 000, estado de Hidalgo. Servicio Geológico Mexicano.
- Redacción. (2017). Autoridades realizan revisión de tubos volcánicos del municipio.. 31 de Mayo de 2022, de NQRadio Sitio web: <http://nqradio.com/2017/10/12/autoridades-realizan-revision-de-tubos-volcanicos-del-municipio/>
- Sánchez, R. L. E. y Osorio P. M., 2008, Geología y petrogénesis de los Prismas Basálticos Santa María Regla, Hgo., *Revista Geociencia del Servicio Geológico Mexicano*, año 2, No. 3., p. 5-24.
- Segerstrom, K., 1961, Geología del suroeste del estado de Hidalgo y del noreste del estado de México: *Boletín de la Asociación Mexicana de Geólogos Petroleros*, 13(3-4), 147-168.
- Pedromo S., 2009. Tomografía eléctrica en apoyo de la investigación arqueológica (Tesis de Licenciatura). Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas. Universidad Nacional de La Plata. p. 43.
- Ramírez T. E., Uribe L. J., Galeana G. O. A., Torres R. M., Bahena E. F. M. y Luna C. H. F. 2016. Informe y carta geológico-minera Tulancingo, F14-D82, escala 1:50 000, estado de Hidalgo. Servicio Geológico Mexicano.
- SGM (Servicio Geológico Mexicano). (2011). Ordenamiento Ecológico Territorial de la Región Tulancingo.