

Estudio Geofísico de oquedades subterráneas cerca del Parque de la Cueva de Orquídea, Xalapa, Veracruz, México

Geophysical study of underground cavities near the Cueva de la Orquídea Park, Xalapa, Veracruz, Mexico

Katrin Sieron ^a | Julio César González Hernández ^b | José Serrano Ortiz ^c |
Pamela Bibiana Márquez Arellano ^d | Blake Weissling ^e |
Francisco Córdoba Montiel ^f | Rafael Torres Orozco ^g |

Recibido: 07 de febrero de 2023.

Aceptado: 18 de abril de 2023.

^a Universidad Veracruzana, Centro de Ciencias de la Tierra, Observatorio Sismológico y Vulcanológico, Xalapa, México.
Contacto: ksieron@uv.mx | ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4036-9107> *Autora para correspondencia.

^b Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Puebla, México. Contacto: julio.igfbuap@gmail.com

^c Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Puebla, México. Contacto: seotz_jso@hotmail.com

^d Benemérita Universidad Autónoma de Puebla. Puebla, México. Contacto: pamemqzar@gmail.com

^e University of Texas at San Antonio (UTSA), Department of Geological Sciences, EUA. Observatorio Sismológico y Vulcanológico (OSV-UV) Contacto: Blake.Weissling@utsa.edu

^f Universidad Veracruzana, Observatorio Sismológico y Vulcanológico (OSV), Centro de Ciencias de la Tierra, Xalapa, México.
Contacto: fcordoba@uv.mx

^g Universidad Veracruzana, Observatorio Sismológico y Vulcanológico (OSV), Centro de Ciencias de la Tierra, Xalapa, México.
Contacto: raftorres@uv.mx

Resumen: La Cueva de la Orquídea es uno de los atractivos turísticos de la ciudad de Xalapa, Veracruz. Se ubica en un parque público con el mismo nombre, a proximidad de la zona centro de la ciudad. Esta “cueva” es parte de un sistema de túneles (o tubos) de lava que se forman cuando lava poco viscosa (comúnmente basáltica) se enfría y luego se solidifica al estar en contacto con el subsuelo y el aire exterior, pero sigue fluyendo en su interior. La mayor parte del centro de Xalapa está construida por encima de estas lavas basálticas que subyacen el cono de escoria del Macuiltépetl. Sin embargo, se desconoce la ubicación de los túneles de lava que se encuentran bajo la superficie; solo en ocasiones se reportan hundimientos en la zona urbana, debido al colapso de algunas oquedades subterráneas, así como se descubren al excavar antes de iniciar una construcción. En este estudio, se emplean dos técnicas geofísicas no-invasivas dentro del área del Parque, así como en calles no pavimentadas en la cercanía del mismo. Los resultados del estudio de gravimetría y georradar no solamente hacen visibles las cámaras grandes (3 conectadas) previamente conocidas, sino revelan su continuidad hacia el Este, justo por debajo de las viviendas aledañas al parque. Se recomienda seguir con los estudios para ubicar las oquedades más cercanas a la superficie y/o más voluminosas para identificar zonas potencialmente en peligro de colapsarse, adaptar planes de construcciones, entre otras medidas de mitigación.

Palabras clave: Túneles de lava; georradar; gravimetría; flujo de lava del Macuiltépetl; peligro de colapso.

Abstract: *The Cueva de la Orquídea (Orchid cave) is one of the tourist attractions in the city of Xalapa, Veracruz. It is located in a public park with the same name close to the center of the city. However, this "cave" is actually part of a system of lava tunnels that were formed when low-viscosity lava (commonly basaltic) cools and solidifies on contact with the underground and the external air, but continues to flow inside. Most of the center of Xalapa is built on top of these basaltic lavas that underlie the Macuiltépetl cinder cone. The full extent of the underground lava tunnels is unknown. Yet, occasionally, collapses are reported in the urban area, due to the collapse of some underground cavities. Other cavities have been discovered, during excavations, for example before starting a construction. In this study, two non-invasive geophysical techniques were used within the Park area, as well as on unpaved streets in the vicinity of the Park. The results of the gravimetry and Ground-penetrating radar (GPR) study not only make the previously known large rooms (3 connected) visible, but also reveal their continuity to the East, just below the houses surrounding the park. It is thus recommended to continue with the studies to locate the cavities closer to the surface and/or those more voluminous to identify areas potentially in danger of collapsing, and to adapt construction plans, among other mitigation measures.*

Keywords: *lava tubes; Ground-penetrating radar (GPR); gravimetry; Macuiltépetl lava flow; hazard of lava tube collapse.*

Introducción

El Parque la Cueva de la Orquídea (**Figura 1**), ubicado en la Colonia Voceadores en la ciudad de Xalapa, Veracruz; alberga una cueva de origen volcánico. Las lavas que contiene la Cueva de la Orquídea provienen del volcán monogenético Macuiltépetl (**Figura 1** y **Figura 2**). La formación de la cueva se debe al rápido enfriamiento de la lava en la parte en contacto con el suelo

y con la atmósfera, mientras seguía fluyendo ladera abajo, produciendo así una oquedad. La orquídea misma (**Figura 1**) representa el orificio por el cual se escapó el gas asociado a la desgasificación del flujo de lava ya mencionado (los “pétalos” son lava solidificada después de la desgasificación, durante este proceso, la lava aún se encontraba en un estado plástico). La parte de la orquídea representa una de las más delgadas del techo de la oquedad. A pesar de que existe un barandal alrededor de la Orquídea, no se considera seguro por el pequeño espesor de la lava en esta área, aunque este barandal permite un fácil acceso hacia la oquedad.

Figura 1
 Parque de la Cueva de la Orquídea



Nota: A) Foto tomada con un dron el 14 de agosto del 2019. B) Foto de la estructura de la “Orquídea” (foto tomada por Katrin Sieron en 2019).

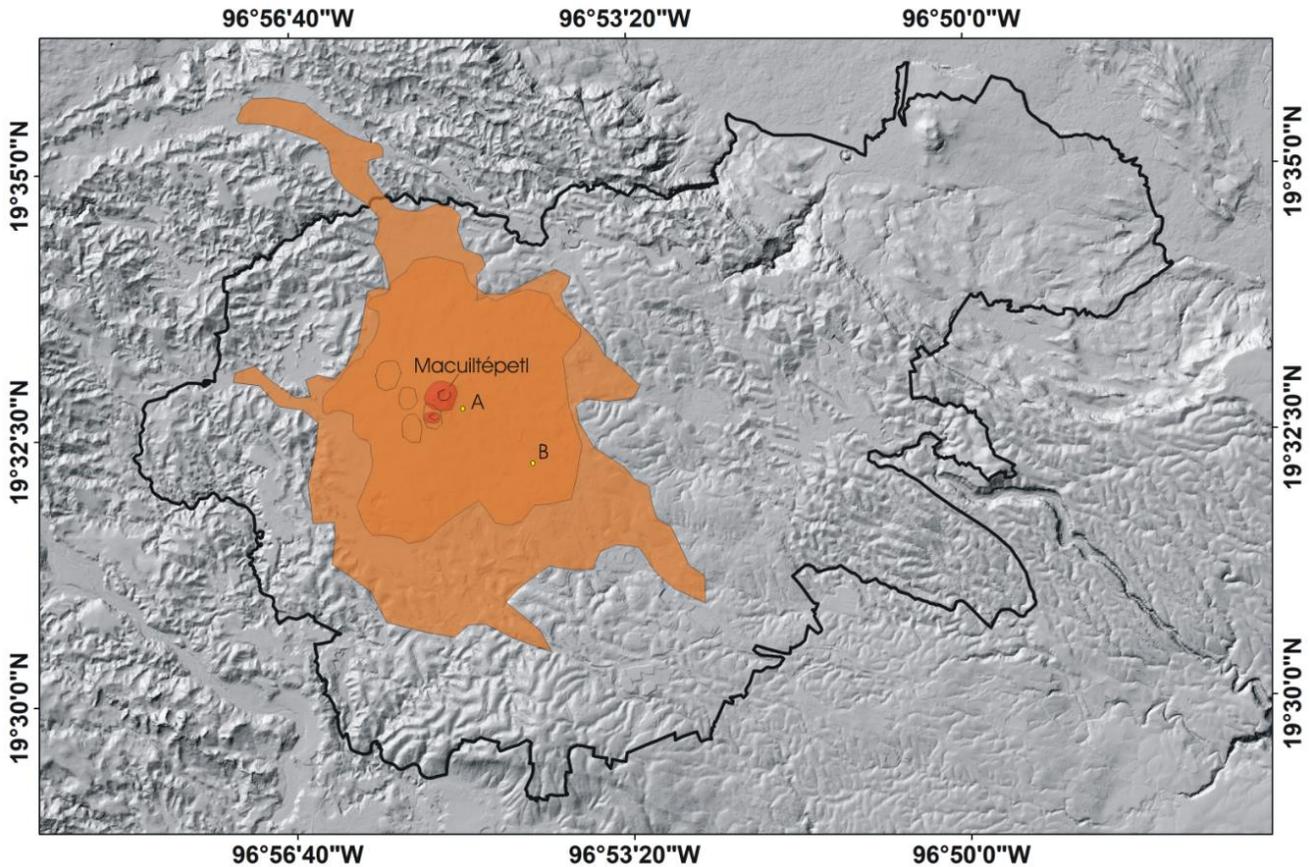
La Cueva de la Orquídea consta de tres partes o cámaras conectadas. Fue dada a conocer en 1970 por José Luis Yáñez, pero descubierta antes en 1943 por un cantero, quien amplió la entrada (Morante-López, 2019). Posteriormente, aproximadamente en 1950, la cueva fue utilizada como basurero. Después de la limpieza de más de 15 toneladas de basura, fue protegida por el Ayuntamiento al crear un parque en su alrededor (Morante-López 2019). La oquedad principal ha sido agrandada artificialmente y desde entonces la cueva ha sido un atractivo turístico.

Oquedades como la Cueva de la Orquídea son comunes en flujos de lava con cierta composición química. En la región de Xalapa existen varios otros flujos de lava que muestran túneles de lava, como por ejemplo el del Volcancillo (Espinasa-Pereña y Delgado-Granados, 2013). Cualquier tipo de oquedad en el subsuelo, ya sea natural como los tubos de lava o en rocas calcáreas, o artificiales (p.ej. minas) pueden producir hundimientos por colapso de su techo.

La mayor parte de la ciudad de Xalapa está construida sobre flujos de lava del Macuiltépetl y existen una serie de oquedades, de las cuales muy pocas se reportan (**Figura 2**). En este trabajo se realizan estudios geofísicos en el área del parque La Cueva de la Orquídea, para encontrar oquedades adicionales en sus alrededores, además de la ya conocida.

Figura 2

Modelo sombreado, indicando los límites del municipio de Xalapa (línea negra), así como el volcán Macuiltépetl y las lavas que lo preceden en color naranja



Nota: A=Parque de la Cueva de la Orquídea; B=colapso de oquedad cerca de la Plaza Cristal, Xalapa; otros volcanes pequeños cerca del Macuiltépetl están también indicadas (círculos/elipses negros; reportado en Jácome-Paz *et al.*, 2022).

1. Metodología

Para analizar el subsuelo en búsqueda de la extensión de las oquedades, se emplearon dos tipos de métodos geofísicos: 1) gravimetría y 2) georradar.

Ambos métodos geofísicos se han empleado para detectar túneles de lava en diferentes partes del mundo e incluso en otros planetas (p.ej. Miyamoto *et al.*, 2005; Sauro *et al.*, 2020).

El estudio gravimétrico se basa en el hecho que la aceleración de la gravedad no es la misma en todos los puntos de la superficie de la Tierra. Existen pequeñas variaciones que tienen su origen en la forma de la Tierra (geoide) y heterogeneidades de densidad en la Tierra. El interés geofísico por la gravedad se centra particularmente en la medida e interpretación de estas pequeñas variaciones de g en términos de la estructura, forma, y geología local de la Tierra (Smith, 1975).

El gravímetro empleado en este estudio es de la marca Scintrex, modelo CG-5. Por otra parte, el método del georradar también conocido como GPR (**Figura 3**) por sus siglas en inglés (*Ground Penetration Radar*), es un método electromagnético de reflexión (p.ej. Annan 2005; Baker *et al.*,

2007). Este método está basado en la emisión y recepción de ondas electromagnéticas y, mediante ese principio, se puede obtener imágenes del subsuelo e identificar su composición (por ejemplo Harari 1996). La propagación de las ondas mencionadas está regida por las ecuaciones de Maxwell (Baker *et al.*, 2007; Holliger y Bergmann, 1998) y depende de las propiedades electromagnéticas tales como: la conductividad y la permitividad dieléctrica de los materiales que componen el subsuelo (p.ej. Baker *et al.*, 2007). Es un método no invasivo, lo que quiere decir que no afecta al área en donde se hace la prospección.

Figura 3

Equipo utilizado para el levantamiento gravimétrico



Nota: Equipo utilizado para el levantamiento gravimétrico (foto tomada por Márquez, 2019) a la izquierda, y el Georadar (foto tomada por Sieron, septiembre de 2019) a la derecha.

Durante los meses de agosto y septiembre de 2019, se llevaron a cabo prospecciones geofísicas en el área del parque de la cueva de la orquídea, así como calles aledañas para analizar las extensiones de las oquedades en la subsuperficie.

Para el estudio gravimétrico, que se llevó a cabo en agosto 2019, se definió una estación base, la cual tuvo las coordenadas 2162519 N y 14718643 O. Se tomaron las lecturas gravimétricas de 107 puntos dentro del área del parque. El espaciamiento entre los puntos de cada perfil fue de 5 metros y en cada punto se tomaron dos lecturas en intervalos de 30 segundos cada una. Después de utilizar datos de la gravedad absoluta (de la Red Geodésica Nacional Pasiva) para obtener el valor de la gravedad observada en cada punto, los datos fueron tratados con corrección de deriva instrumental, corrección atmosférica, corrección de aire libre y, finalmente, la corrección de Bouguer (LaFehr, 1991). Haciendo uso del software Oasis Montaj™, se generó el mapa de anomalía de Bouguer (**Figura 5**). Al final, se le aplicaron filtros de primera y segunda derivada vertical, así como horizontal, con el fin de resaltar los efectos de estructuras someras.

Además, durante septiembre del 2019, se realizó la adquisición de datos con georadar (**Figura 3**). Para ello, se utilizó una antena monoestática de 300 MHz, con el sistema Zond 12e. Dentro del parque de la Orquídea se tomaron 29 perfiles sin contar los del interior de la cueva. Todos los perfiles fueron tomados en una sola dirección, pero en dos sentidos: ida y vuelta.

Figura 4
 Interior de la cueva de la Orquídea (cámara principal)



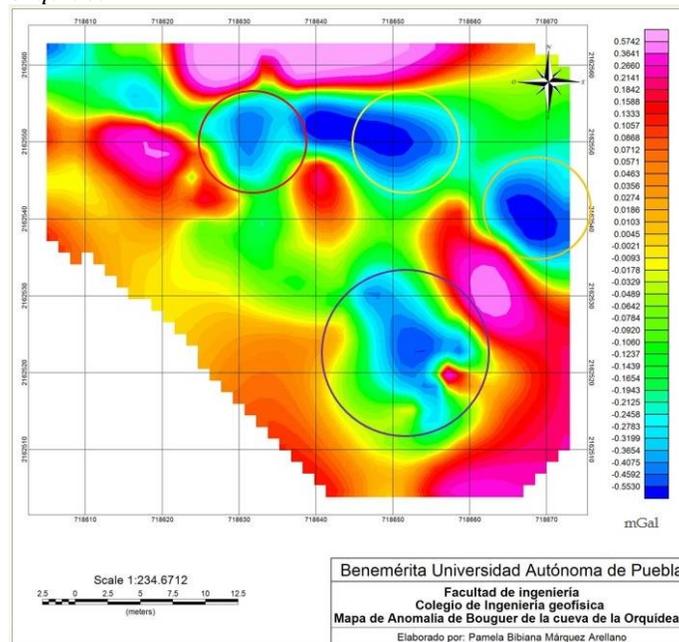
Nota: Foto tomada por Pamela Márquez (septiembre de 2019).

Los datos obtenidos con el georradar son visualizados en radargramas, a los cuales se les aplicó la herramienta de “eliminación de ruido de fondo” con el programa Prism2.6. También se utilizó la “Corrección dinámica” para compensar los efectos ocasionados por el retraso en los tiempos de llegada de la reflexión, se ajustó la frecuencia de la antena utilizada que fue de 300 MHz. Finalmente, con la herramienta “time-depth conversión” se obtuvo el radargrama en el dominio de la distancia. Los filtros aplicados consistieron en la primera y segunda derivada vertical.

2. Resultados

Los resultados de los datos gravimétricos se muestran en un mapa elaborado con el programa Oasis Montaj, reflejando los diferentes valores de la anomalía de Bouguer (**Figura 5**). En tonalidades frías, se encuentran las zonas con anomalías gravimétricas negativas (marcadas con círculos en la **Figura 5**), al contrario de las zonas con tonalidades cálidas.

Figura 5
 Mapa de anomalía de Bouguer del Parque de la Cueva de la Orquídea



Nota: Los círculos indican zonas con anomalías bajas de gravimetría, indicando la presencia de oquedades en este caso. Fuente: Elaboración propia.

Como se sabe, las anomalías de Bouguer negativas son producidas por cuerpos sin densidad, por ejemplo, cuevas, que son los objetos de interés de este estudio. Por lo anterior, y, analizando la **Figura 5**, se puede concluir que los mínimos de gravedad con tendencia noroeste-sureste de dicha figura corresponden con cavidades en el área del parque.

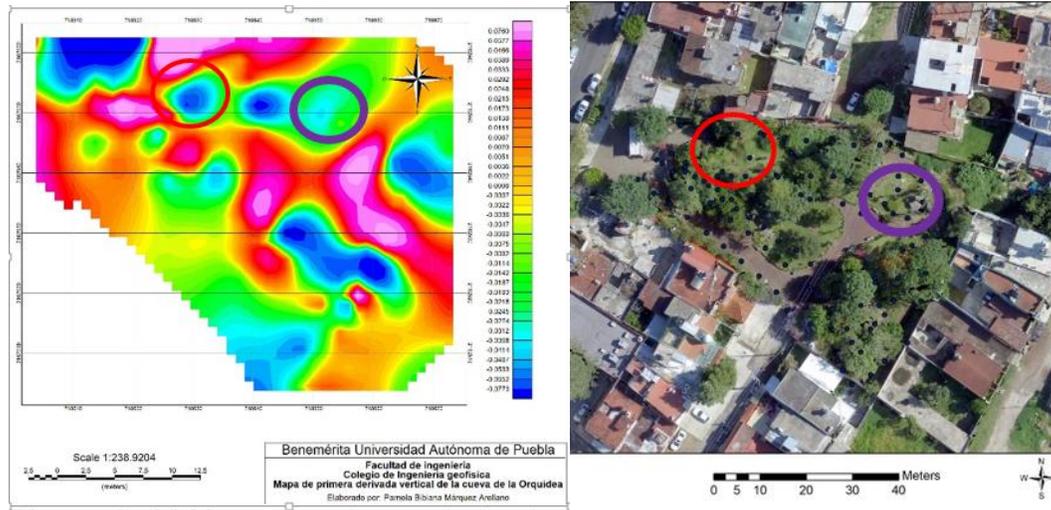
La zona señalada con el círculo rojo coincide con el área de la cueva a la que se pudo acceder, mientras que la zona señalada con el círculo verde indica la zona en donde se encuentra la "orquídea" en la superficie (**Figuras 1B y 4**), encerradas en un círculo morado se pueden observar la presencia de posibles extensiones de la cueva (tubo de lava).

Posteriormente, al mapa de la anomalía de Bouguer se le aplicó la primera derivada vertical y se obtiene un mapa de anomalías residuales (**Figura 6A**). Este filtro permite acentuar las anomalías de alta frecuencia espacial ocasionadas por fuentes someras y, debido a ello, en el mapa se puede observar el contraste entre los valores máximos señalados con colores cálidos y los valores mínimos señalados con tonalidades azules y verdes, que además corresponden con valores negativos de gravedad.

En el extremo noroeste del mapa aparece un mínimo de gravedad, el cual se puede atribuir a la presencia de una posible cavidad. La primera zona señalada en el noroeste del mapa con el círculo rojo es la cueva a la que se pudo acceder, que comparándola con la imagen del Parque de la Cueva de la Orquídea que se obtuvo con un dron, se observa que coincide. De manera similar, la segunda zona señalada con el círculo morado corresponde al lugar donde se encuentra el mirador (**Figuras 1B y 4**), coincidiendo con la imagen del dron (**Figura 6B**).

Figura 6

A) Mapa de primera derivada vertical (parque) y B) Imagen tomado con dron de la misma área

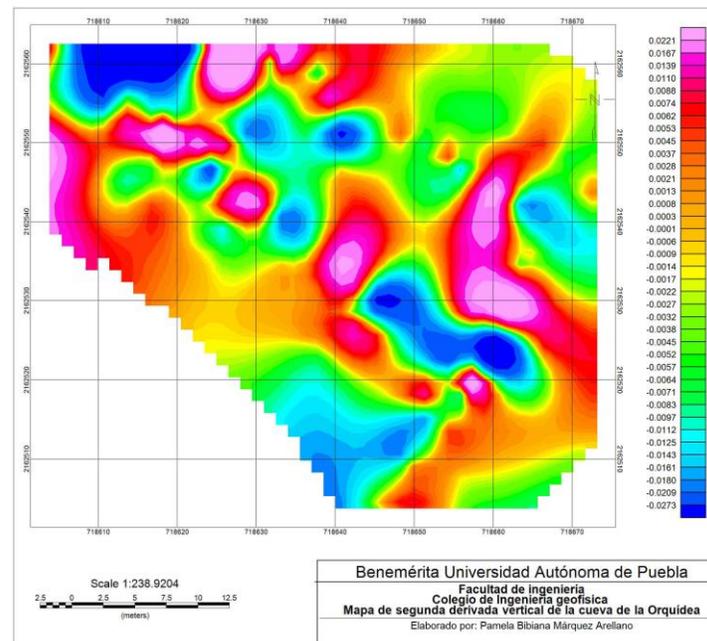


Fuente: Elaboración propia.

Con respecto al mapa de la segunda derivada vertical (**Figura 7**), los contornos de los bajos gravimétricos se definen aún más, junto al bajo gravimétrico que se encontraba en el extremo noroeste del mapa de la primera derivada, aparecen otras dos pequeñas áreas con valores negativos. En la parte central del mapa se puede observar la aparición de otros dos bajos gravimétricos (en tonos fríos), ya que como se mencionó anteriormente, la segunda derivada acentúa las anomalías más someras y considerablemente pequeñas.

Figura 7

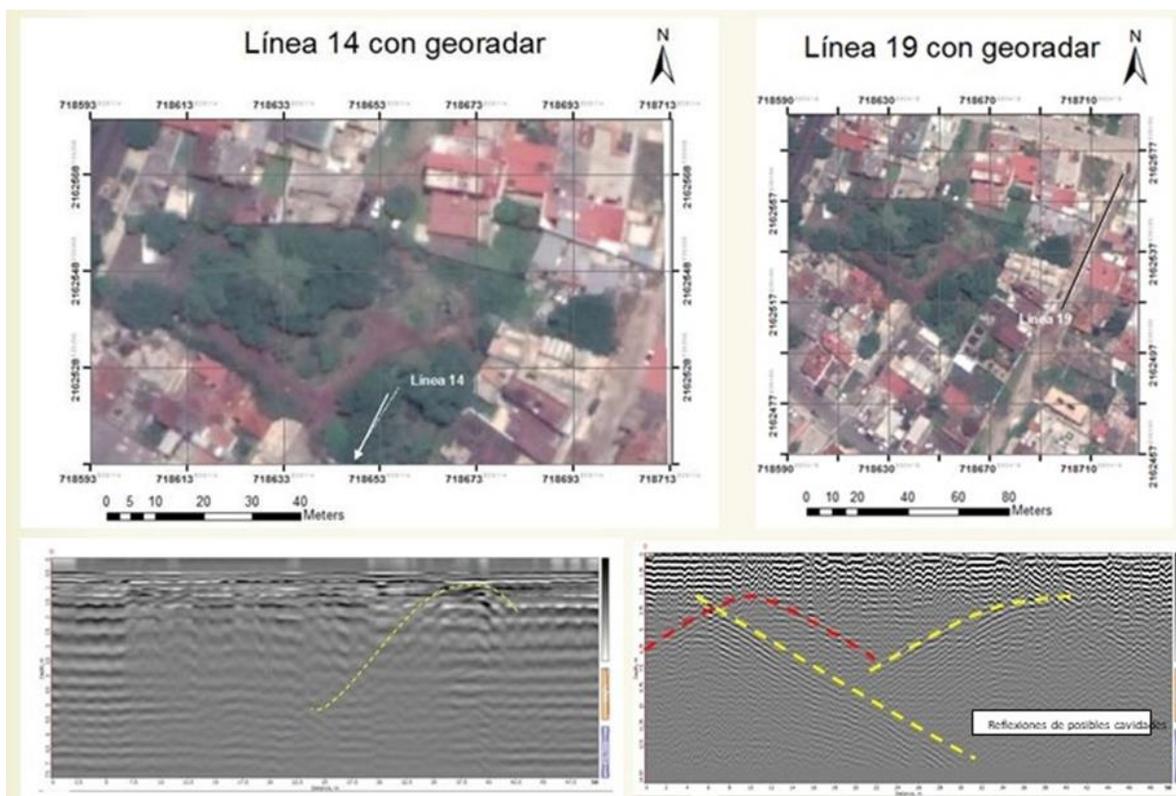
Mapa de la segunda derivada del área de estudio



Fuente: Elaboración propia.

Para poder interpretar los datos del georradar, se procesaron mediante el uso del programa Prism2.6. Así se obtuvo una mejor visualización de las reflexiones. La mayoría de los radargramas resultantes de perfiles realizados en los pasillos del parque de la Cueva de la Orquídea no mostraron alguna anomalía de interés. Sin embargo, en algunos de los radargramas se observan reflexiones hiperbólicas de extensión considerable (1-10 m; **Figura 8**), las cuales son indicativas de que existen oquedades en esa zona. En los radargramas que se realizaron en calles exteriores al parque de la Cueva de la Orquídea, se observaron hipérbolas de una amplitud significativa, que se pueden atribuir a la presencia de cuevas. Las líneas 2, 10, 12, 14, 16, H2, H3, H4 y H5 realizadas con el equipo de georradar en el área del Parque de la Cueva de la Orquídea y en los alrededores mostraron reflexiones de interés, indicando la presencia de oquedades en el subsuelo, tal y como se ejemplifica en las **Figura 8** y **Figura 9**.

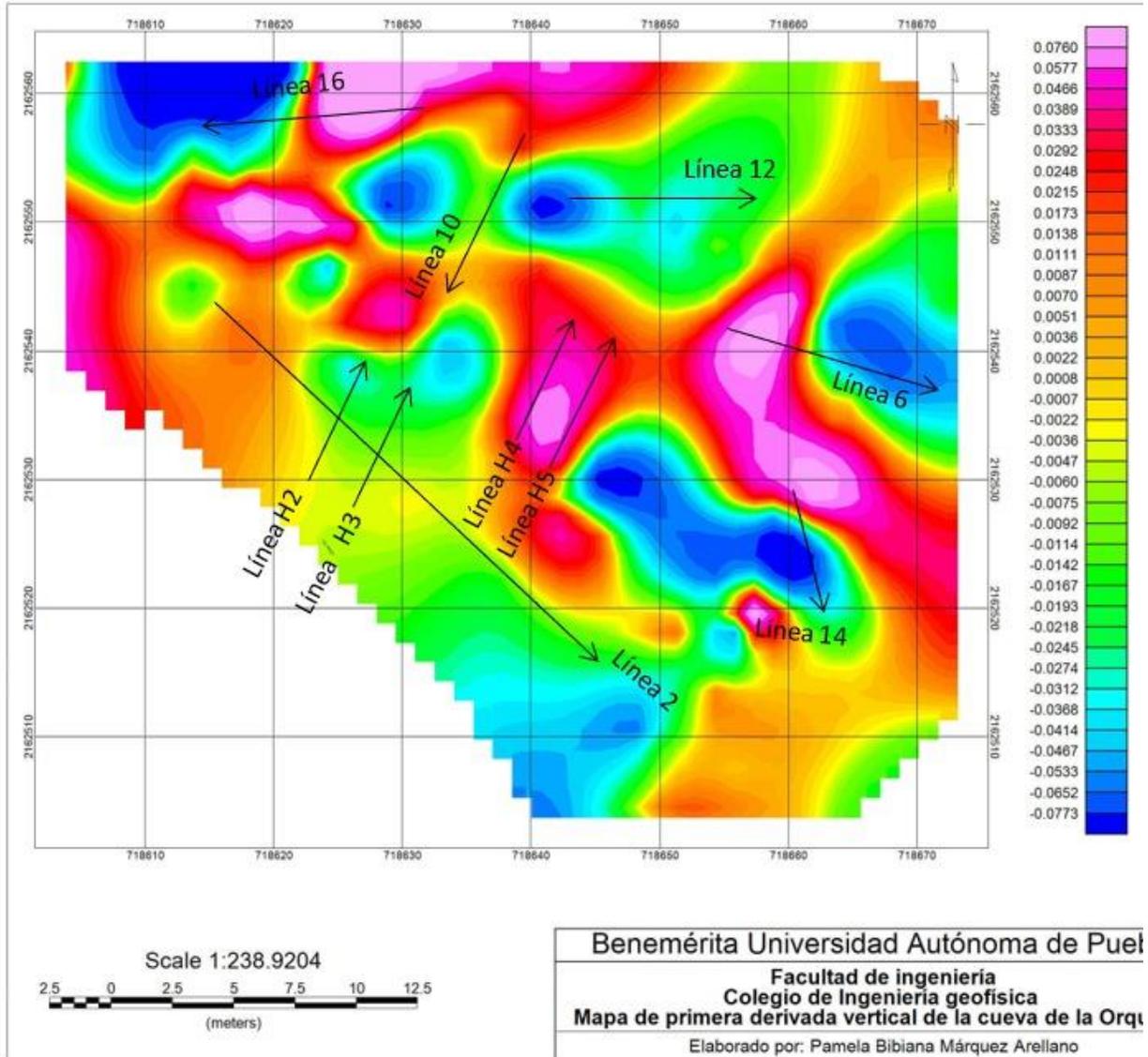
Figura 8
 Radargramas de las líneas 14 (dentro del área del parque) y 19 (fuera de los límites del parque) obtenidas con georradar con una antena de 300 MHz



Nota: Se aprecian las anomalías hiperbólicas que indican oquedades en el subsuelo. Por su extensión de varias decenas de metros se descarta la posibilidad de que sean otro tipo de estructuras de obra civil.

Figura 9

Mapa que muestra la primera derivada (datos gravimétricos) y las líneas de georadar superpuestas que mostraron indicios de la presencia de oquedades

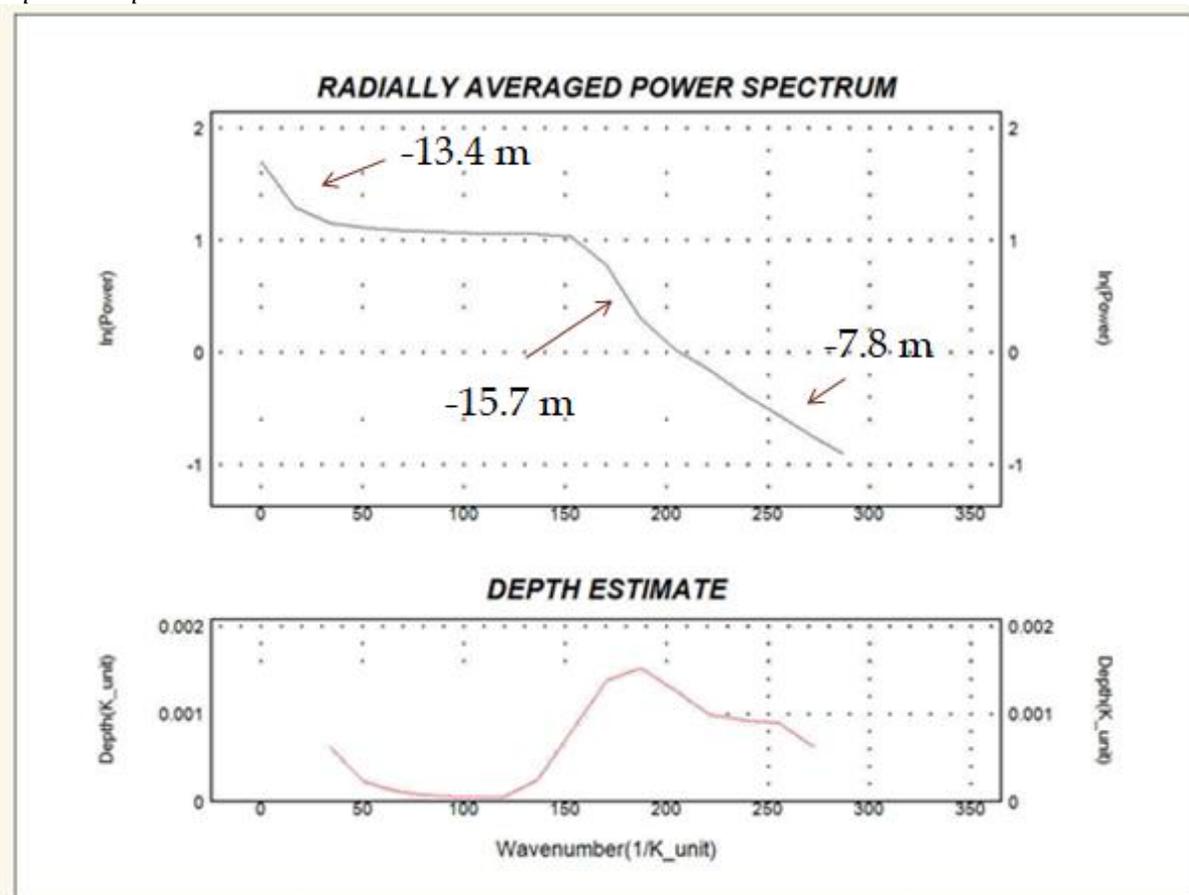


Fuente: Elaboración propia.

Para la estimación de la profundidad de cuerpos anómalos, mediante gravimetría, se utilizó el método del espectro radial de potencia. En el espectro obtenido se identificaron 3 pendientes, las cuales se utilizaron para el cálculo de las profundidades asociadas a ellas, aplicando el método de Spector y Grant (1970). Como resultado se obtuvieron 3 profundidades, una de 13.4 metros, otra de 15.7 metros y una última de 7.8 metros, que no debería considerarse como una estructura adicional, dado que –por lo general– la última pendiente en estas curvas corresponde a ruido en la señal (**Figura 10**). Por otro lado, las profundidades obtenidas mediante el espectro radial de potencia pueden correlacionarse con las de anomalías en los radigramas, para verificar la presencia de las

estructuras tubulares.

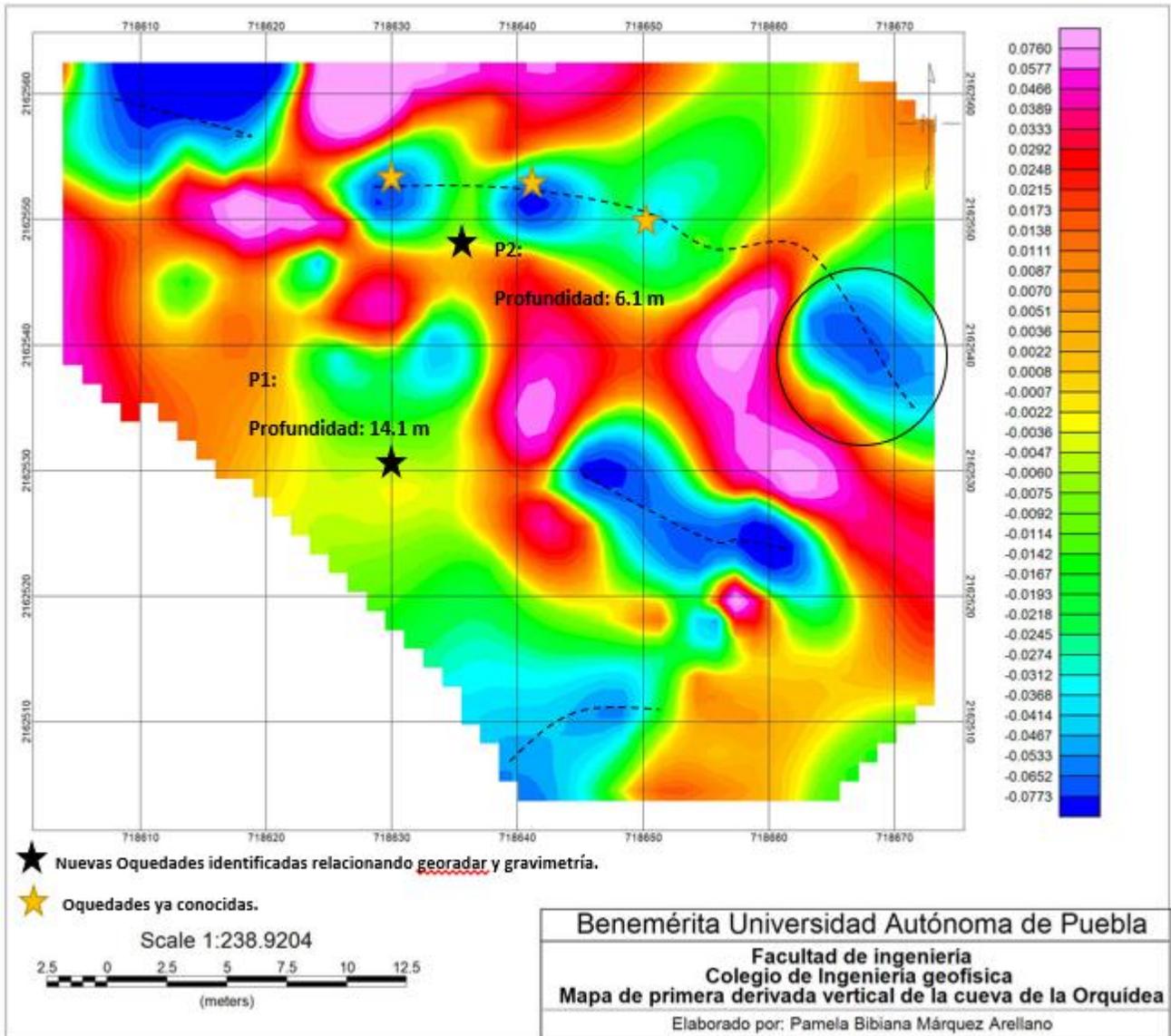
Figura 10
Espectro de potencia



Nota: Espectro de potencia donde se observan las tres pendientes utilizadas y sus profundidades correspondientes. Fuente: Elaboración propia.

Ahora bien, como resultado final, se comparan los resultados de los dos métodos geofísicos aplicados (**Figura 11**). Las estrellas marcan zonas en las cuales tanto los radargramas como las anomalías de gravedad coinciden para poder inferir, con mayor certeza, que ahí existen cavidades, esto es, los radargramas presentan reflexiones e hipérbolas y el mapa de gravedad presenta valores gravimétricos negativos.

Figura 11
 Comparación de profundidades caracterizadas mediante los dos métodos geofísicos empleados



Fuente: Elaboración propia.

Las líneas punteadas representan posibles rutas/extensiones de la cueva, la anomalía gravimétrica negativa encerrada en un círculo negro permite inferir que tiene continuación hacia la zona en donde se encuentran viviendas. Las líneas negras intermitentes indican perfiles trazados sobre zonas que contienen bajos gravimétricos.

3. Conclusiones

El origen de los valores bajos gravimétricos (zonas en azul de los mapas de anomalía), se atribuye principalmente a la presencia de oquedades en esas áreas, lo mismo se puede concluir de los radargramas obtenidos.

En los radargramas que se realizaron en calles paralelas al parque de la orquídea se pueden observar reflexiones correspondientes a cavidades y a tuberías que existen en esas áreas.

Por otro lado, el espectro de potencia radial permitió identificar los topes de los cuerpos geológicos generadores de las anomalías gravimétricas, las cuales se encuentran a profundidades de 13.4 m, 15.7 m atribuidas a la presencia de oquedades, y en buena medida consistentes con las profundidades de anomalías percibidas en los radargramas. Se identificaron 2 cavidades (adicionales a las ya conocidas) dentro del Parque de la Cueva de la Orquídea al correlacionar la gravimetría y el georradar. También se identificaron oquedades en el exterior del Parque de la Cueva de la Orquídea de origen artificial y natural.

Es evidente que las cavidades debajo del área del Parque de la Cueva de la Orquídea se extienden hacia el Este, donde se encuentran varias viviendas construidas parcial o totalmente sobre estas cavidades. Se recomiendan más estudios para obtener datos adicionales, así como evitar la sobrecarga del área aledaña al Parque de la Cueva de la Orquídea, y se exhorta a las autoridades competentes a no levantar más construcciones, o más pisos sobre las ya existentes.

En el caso de que se vaya a realizar alguna construcción, se debe realizar un estudio de mecánica de suelos y de rocas para asegurar que el suelo es de un material estable, que los cimientos de nuevas construcciones no interceptarán con oquedades y por lo tanto, que no habrá riesgo de colapso.

En el área céntrica de Xalapa, la cual se construyó sobre los flujos de lava debajo del volcán Macuiltépetl, se encuentra una importante cantidad de oquedades. Algunas de ellas han sido encontradas a través de reportes de colapsos o durante excavaciones efectuadas para realizar diferentes tipos de construcciones en el área urbana, por lo que resulta pertinente llevar a cabo más estudios geofísicos para identificar estas oquedades y evitar futuros colapsos/hundimientos.

De los dos métodos aplicados, el estudio gravimétrico dio mejores resultados. Sin embargo, utilizando una antena de frecuencia menor a 300 MHz se podrían alcanzar mayores profundidades de análisis, lo que sería recomendable en un futuro trabajo.

De igual forma, se podría efectuar un estudio adicional con otro método geofísico como la prospección eléctrica realizando tomografías con arreglo Wenner-Schlumberger, el cual es sensible a cambios tanto verticales como la prospección eléctrica realizando tomografías con arreglo Wenner-Schlumberger en las calles paralelas al Parque de la Cueva de la Orquídea, esta sugerencia se debe a que el método permite ver variaciones (decir qué parámetro físico se mide) tanto verticales como horizontales en el subsuelo.. Estos nuevos datos podrían complementar lo obtenido con georadar y gravimetría hasta este momento.

Referencias

Annan, A.P. (2005). Ground-penetrating radar. In *Near-surface geophysics* (pp. 357-438). Society of Exploration Geophysicists.

- Baker, G.S., Jordan, T.E. y Pardy, J. (2007).** An introduction to ground penetrating radar (GPR) en G. S. Baker y H. M. Jol (Ed.), *Stratigraphic Analyses Using GPR*. Geological Society of America.
[https://doi.org/10.1130/2007.2432\(01\)](https://doi.org/10.1130/2007.2432(01))
- Espinasa-Pereña, R. y Delgado-Granados, H. (2013).** Lava tubes and aquifer vulnerability in the upper Actopan River basin, Veracruz, México. In *AGU Fall Meeting Abstracts, 2011*, H43J-1383.
[https://doi.org/10.1130/2013.2498\(10\)](https://doi.org/10.1130/2013.2498(10))
- Harari, Z. (1996).** Ground-penetrating radar (GPR) for imaging stratigraphic features and groundwater in sand dunes. *Journal of applied Geophysics*, 36(1), 43-52.
- Holliger, K. y Bergmann, T. (1998).** Accurate and efficient FDTD modeling of ground - penetrating radar antenna radiation. *Geophysical Research Letters*, 25(20), 3883-3886.
- Jácome-Paz, M.P., Torres-Orozco, R., Espinasa-Pereña, R., de la Fuente Rivera, J.R., Sánchez, J.O.R. y Delgado-Granados, H., (2022).** Review of geology and geomorphology of the Xalapa Monogenetic Volcanic Field, eastern Trans-Mexican Volcanic Belt. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 432, 107689. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2022.107689>
- LaFehr, T. R. (1991)** Standardization in gravity reduction. *Geophysics*. 56(8), 1170–1178.
<https://doi.org/10.1190/1.1443137>
- Miyamoto, H., Haruyama, J.I., Kobayashi, T., Suzuki, K., Okada, T., Nishibori, T., Showman, A.P., Lorenz, R., Mogi, K., Crown, D.A., Rodriguez, J.A., Rokugawa, S., Tokunaga, T. y Masumoto, K. (2005).** Mapping the structure and depth of lava tubes using ground penetrating radar. *Geophysical research letters*, 32(21), 1-5. <https://doi.org/10.1029/2005GL024159>
- Morante-López, R. B., 2019.** OBSERVATORIOS ASTRONÓMICOS EN TUBOS DE LAVA MESOAMERICANOS. *Avá*, (35), 55-76. <https://bit.ly/44y63S6>
- Sauro, F., Pozzobon, R., Massironi, M., De Berardinis, P., Santagata, T. y De Waele, J. (2020).** Lava tubes on Earth, Moon and Mars: A review on their size and morphology revealed by comparative planetology. *Earth-Science Reviews*, 209, p.103288.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103288>
- Smith, J. (1975).** Temas de Geofísica. Reverté S. A.
- Spector, A. y Grant, F.S., (1970).** Statistical models for interpreting aeromagnetic data. *Geophysics*, 35(2), pp.293-302.