

Exploración geoeléctrica para la caracterización de grietas y socavones asociados a la subsidencia y su relación con el manejo del recurso hídrico en Ciudad Guzmán Jalisco



Colaboración

Alan Méndez-Martínez; Claudia Zapién Arroyo; Fatima Ezzahra Housni, Centro Universitario del Sur, Universidad de Guadalajara

Fecha de recepción: 08 de abril de 2024

Fecha de aceptación: 05 de junio de 2024

RESUMEN: Los fenómenos asociados a la subsidencia, son un tema de gran importancia en México y en muchos casos están relacionados con problemas hídricos. En el sur de Jalisco, estos eventos están apareciendo y aumentando con el paso del tiempo. En el municipio de Zapotlán El Grande existen varias zonas afectadas, así como también el aumento de los factores que llevan a los problemas relacionados con el agua, ya que el acuífero del que se abastece el municipio actualmente se encuentra sobreexplotado. Por lo anterior es que en este proyecto se plantea que los riesgos geológicos asociados a la subsidencia tienen relación con el recurso hídrico en Ciudad Guzmán y para dar respuesta se llevó a cabo un estudio de exploración geoeléctrica mediante el uso de la tomografía de resistividad eléctrica en el fraccionamiento “La primavera”.

PALABRAS CLAVE: subsidencia, exploración geoeléctrica, riesgos geológicos, syscal pro.

ABSTRACT: The phenomena associated with subsidence are a critical issue in Mexico and, in many cases, are related to water problems. In the south of Jalisco, these events appear and increase with time. In the municipality of Zapotlán El Grande, there are several affected areas and increasing factors that cause water-related problems since the aquifer from which the municipality is supplied is currently overexploited. Therefore, this project proposes that the geological risks associated with subsidence are related to the water resource in Ciudad Guzmán, and to provide an answer, a geoelectric exploration study was carried out using electrical resistivity tomography in the “La primavera” colony.

KEYWORDS: Subsidence, geoelectric exploration, geological risks, syscal pro.

INTRODUCCIÓN

La subsidencia de terreno se expresa como un hundimiento diferencial que se puede asociar a sobreexplotación de acuíferos [1, 2, 3] y que tiene una velocidad que varía desde algunos milímetros a centímetros por año [4]. El hundimiento repentino de la superficie de la tierra es debido al movimiento subterráneo de los materiales terrestres, y se le puede atribuir sobre todo por la retirada de fluidos. Los espacios microscópicos de los poros del subsuelo están llenos de moléculas de agua que conforman una presión hidrostática, cuando las moléculas de agua se extraen a través de un pozo tubular, se forma un vacío y la presión hidrostática disminuye en el vacío, por lo que el espacio de los poros se colapsa y todo el terreno se hunde [5].

El fenómeno de subsidencia incluye tanto el descenso suave como el hundimiento repentino de segmentos de la superficie del suelo. El desplazamiento es principalmente hacia abajo, aunque la deformación horizontal asociada suele tener efectos perjudiciales importantes. Por lo tanto, la extracción de agua subterránea desempeña un papel directo en el hundimiento del terreno al provocar la compactación de los sistemas acuíferos susceptibles [6, 7, 8].

El hundimiento y agrietamiento del terreno es un problema geológico-geotécnico que, a nivel mundial, ha llamado la atención de especialistas, investigadores, urbanistas, constructores, medios de comunicación y gobiernos [9] a causa de los cuantiosos y recurrentes daños que ocasionan en los sectores de vivienda, carreteras, vías férreas, líneas de comunicación y conducción, instalaciones industriales y en obras de ingeniería. Este fenómeno está presente en varias regiones del mundo y por lo general se asocia a problemas hidrogeológicos.

En el contexto nacional, México cuenta con una superficie de 1,964,375 km² de los cuales 1,042,369.56 km² (53.06%) de la superficie presenta afectaciones por hundimiento y agrietamiento muy bajas, 149,523.92 km² (7.61%) presenta afectaciones bajas, 632,156.87 km² (32.18%) presenta una afectación media, 122,045.05 km² (6.21%) afectaciones altas, así como 18,279.57 km² (0.96%) presentan afectaciones en el rango de muy alto. Las tasas de hundimiento son variables debido a que están controladas por el espesor y las características geomecánicas de los sedimentos. Así mismo, la intensidad de las tasas de extracción de agua subterránea y la recarga del acuífero juegan un papel crucial en su evolución, control y minimización de riesgo [5].

El abastecimiento de agua en México para uso urbano, agrícola e industrial proviene en buena medida de la extracción de agua subterránea. Uno de los efectos colaterales de una inadecuada administración de los acuíferos es una extracción que sobrepasa la recarga natural de agua, ocasionando la sobreexplotación del sistema acuífero. Si se combina un acuífero sobreexplotado con un medio geológico compresible se propicia la compactación del terreno y en ciertos casos la subsidencia del terreno [9].

Para el 2021, este fenómeno continúa apareciendo frecuentemente en el municipio de Zapotlán el Grande. No hay todavía investigaciones actuales que permitan actualizar el estado de riesgo de la zona. Algunos autores relacionan la aparición de los agrietamientos con causas geológicas, otros con causas hidrogeológicas. Sin embargo, independientemente cual es la causa es importante delimitar estas grietas y hundimientos, así como conocer su profundidad para mitigar su riesgo.

Cabe mencionar que el municipio de Zapotlán el Grande se abastece del acuífero Ciudad Guzmán (1406), lo

calizado al sur del estado de Jalisco. El acuífero Ciudad Guzmán cuenta con una superficie de 4,308 km², de la cual 1,749 km² corresponden al área de la Subcuenca y 1,230 Km² al área de explotación. Pertenece a la Región Hidrológica No. 12 “Lerma-Santiago”, que se localiza dentro de la Cuenca Lago de Chapala, Subcuenca Laguna de Zapotlán [10].

A continuación, se muestra un balance de las aguas del acuífero Ciudad Guzmán:

Tabla 1. Balance de aguas subterráneas del acuífero Ciudad Guzmán (1406) (modificado de CONAGUA, 2020).

Área total del acuífero	4308 km ²
Área del valle	1230 km ²
Precipitación	910.80 mm/año
Evapotranspiración	144.4 hm ³ /año
Volumen extraído total del acuífero (Bombeo)	105.6 hm ³ /año
Descarga natural (Manantiales)	16 hm ³ /año
Volumen de extracción de aguas subterráneas	276,388,970 m ³ /año
Recarga total media anual	266.1 hm ³ /año
Disponibilidad media anual	-26.288970 hm ³ /año

Fuente: Elaboración propia.

Observando el balance del acuífero, en el apartado de Disponibilidad media anual; nos indica que no existe volumen disponible para otorgar nuevas extracciones, ya que se encuentra sobreexplotado de su capacidad. Por el contrario, encontramos que el acuífero tiene un déficit de 26,288,970 m³ anuales que se están extrayendo a causa del almacenamiento no renovable del acuífero [10]. En consecuencia, creemos que esto podría ser un serio influyente en los fenómenos que se han venido presentando en la zona.

La tomografía eléctrica emplea los valores de resistividad aparente medidos con los dispositivos geoelectrónicos sobre la superficie del terreno, para generar imágenes del subsuelo donde se representan los valores de la resistividad verdadera de las diferentes zonas del subsuelo. La relación entre la resistividad aparente y la resistividad verdadera es una relación compleja. Para determinar la resistividad verdadera del subsuelo a partir de los valores de la resistividad aparente, se aplica la técnica de la “inversión” [12].

Por ello, el objetivo de este trabajo es caracterizar las grietas y los hundimientos presentes en Ciudad Guzmán.

mán e identificar su relación con la extracción de los recursos hídricos del acuífero 1406. Como objetivos específicos primero se localizar geográficamente las grietas y/o hundimientos visibles en la ciudad. Lo segundo es realizar mediciones geoelectricas en puntos estratégicos con los arreglos Wenner y Dipolo-Dipolo, y finalmente se analizaron e interpretaron los datos.

MATERIAL Y MÉTODOS

Se realizó un trabajo de campo en el cual se ubicaron y georreferenciaron las grietas y hundimientos más visibles y/o conocidos en la ciudad mediante el programa ArcGIS 12.0. con el mapeo mediante imágenes satelitales y Modelo Digital de Elevación DEM.

Para la prospección, se utilizó la técnica de tomografía eléctrica con los arreglos Wenner y Dipolo-Dipolo. En esta etapa se seleccionaron puntos estratégicos para realizar los perfiles. Se eligió el fraccionamiento La Primavera dado que es una de las zonas, que actualmente, se encuentra con fuertemente afectaciones de agrietamientos en las viviendas.

Como material para prospección, se utilizó El resistivímetro Syscal pro de 24 electrodos de la empresa IRIS Instruments Figura1. Es un sistema de resistividad multinode e induce polarización, sondeo y perfilado, reúne un receptor de 10 canales y un transmisor interno de 250 W. Con un voltaje de salida máximo de 2,000 Vpp.

Para el trabajo de campo, configuró el Syscal Pro una separación entre los electrodos de 10 metros y 5 metros, con la idea de llegar a una profundidad aproximada de 50 metros.



Figura 1. Instrumento Syscal Pro de 24 electrodos. IRIS Instruments.

Fuente: Elaboración propia.

Junto con el Syscal Pro, también se hizo uso de sus accesorios:

- Cables Inteligentes: Utilizados para conectar los transmisores y receptores a los electrodos, son cables re-

forzados con su específico carrete, cuenta con cables inteligentes, por lo que estos cables se conectan a los electrodos y el equipo manda corriente solo a ciertos electrodos. No hay la necesidad de mover constantemente el dispositivo electrónico.

- Clip de cable: Utilizado para unir la toma del cable a los electrodos.
- Electrodo: Hechos de acero inoxidable y con una longitud de 33 cm.
- Cables para batería: Cable con pinzas para la batería externa

Así como también es necesario el uso de herramientas externas al equipo, entre estas herramientas estarán: martillos y mazos, cinta métrica, pinzas de presión, pinzas de mecánico, una Laptop y una memoria USB.

La adquisición de datos se realizó mediante el software PROSYS II, ya que permite transferir, editar, procesar y exportar los datos de resistividad y de cargabilidad de los resistivímetros de IRIS Instruments (SYSCAL), mientras que la descarga de datos se realizó mediante un enlace USB [13]. Para analizar los datos se usó el programa RES2DINV, el cual determina automáticamente un modelo de resistividad de dos dimensiones (2-D) para el subsuelo con los datos obtenidos [14].

RESULTADOS

Zona de estudio

El municipio de Zapotlán el Grande colinda al norte con los municipios de Sayula, Gómez Farías y Tamazula de Gordiano; al este con los municipios de Tamazula de Gordiano y Zapotiltic; al sur con los municipios de Zapotiltic, Tuxpan y San Gabriel; al oeste con los municipios de San Gabriel y Sayula. Se encuentra ubicado entre los paralelos 19°36' y 19°48' de latitud norte; los meridianos 103°24' y 103°38' de longitud oeste; altitud entre 1 500 y 2600 metros [15].

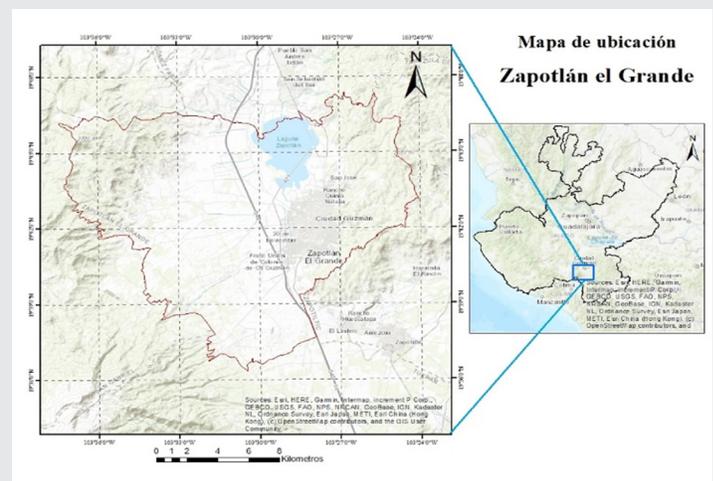


Figura 2. Mapa de localización municipio Zapotlán el Grande. Elaboración propia con datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI).

Descripción Geológica

Ciudad Guzmán se localiza en la provincia del Eje Neovolcánico, al sur del estado de Jalisco en la subprovincia de Chapala [15]. De acuerdo con el Servicio Geológico Mexicano y el INEGI, la ciudad está asentada sobre depósitos aluviales del Cuaternario que rellenaron, a lo largo de milenios, que algunos han denominado como graben de Ciudad Guzmán [15]. Dicho graben obedece al hundimiento general o diferencial de los bloques que constituyen y dan forma al basamento sobre el cual descansan los depósitos de suelo de Ciudad Guzmán; cuyos espesores para esta zona, se han estimado entre 300 y 2,000 metros [16]. Un estudio realizado por la Universidad de Guadalajara en 1995 denomina a los depósitos de suelo de Ciudad Guzmán como depósitos “volcanoclasticos débilmente litificados” cuyos componentes (arenas, limos, arcillas y gravas) son producto de la erosión y destrucción de las rocas volcánicas circundantes que al ser arrastradas por el agua y el viento se depositaron en las planicies donde se asientan Sayula y Ciudad Guzmán [15].



Figura 3. Mapa con imagen satelital Landsat 8 y DEM con la ubicación geográfica de los puntos con grietas y/o hundimientos localizados. Elaboración propia con datos del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI) y la imagen satelital fue obtenida del portal del Servicio Geológico de los Estados Unidos USGS. Fuente: Elaboración propia.

Mapeo mediante imagen satelital y DEM

El levantamiento de los datos se llevó a cabo sobre 3 calles, la calle Violeta correspondiente a la línea 1, la calle Petunias correspondiente a la línea 2, y la calle Lavandas correspondiente a la línea 3.



Figura 4. Líneas del levantamiento en las calles del fraccionamiento La Primavera, modificado de Google Earth Pro. Fuente: Elaboración propia.

A continuación, se presentan los perfiles 2D con datos finales y con inversión. La descripción de los datos de resistividades se realizó por cada perfil y la interpretación se realizó de manera horizontal y vertical.

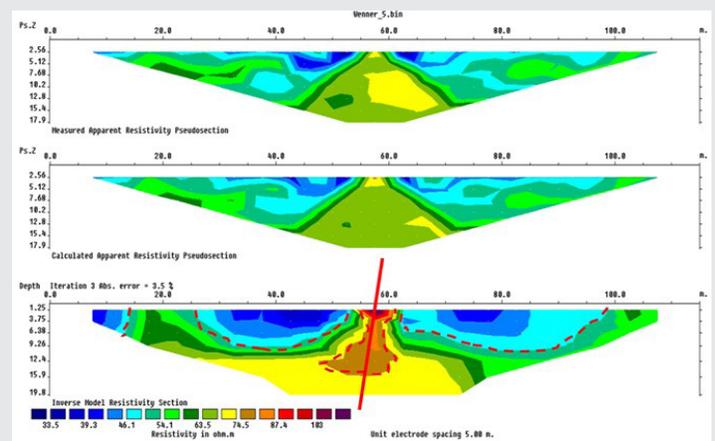


Figura 5. Perfil de línea 1, separación de 5 metros con arreglo Wenner sobre la calle: Violeta. Fuente: Elaboración propia.

El modelo de resistividad de la sección Figura 5 muestra fuertes contrastes en resistividad eléctrica con la presencia de varios niveles eléctricamente diferenciados. En efecto; la interpretación de estos datos conduce a un modelo de resistividad intrínseco formado por dos terrenos:

Una tierra de superficie conductora (menos de 40 Ohm·m) correspondiente a las tierras de la cubierta; este terreno presenta un aspecto discontinuo por el levantamiento de una masa resistente profunda a favor de una falla central.

Un segundo suelo mediante resistencia profunda hasta 20 m de profundidad (65-80 Ohm·m) correspondiente a los suelos sedimentarios.

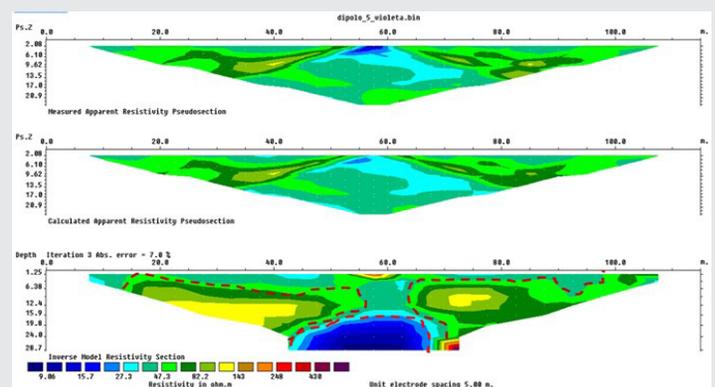


Figura 6. Perfil de línea 1, separación de 5 metros con arreglo Dipolo-Dipolo sobre la calle: Violeta. Fuente: Elaboración propia.

El modelo de resistividad de la sección Figura 6 muestra varios niveles eléctricamente diferenciados pero discontinuos y confirma que la región ha sufrido tectónica de distensión. Sin embargo, los valores registrados en esta sección son mucho más bajos que los de

las secciones anteriores como lo muestra el modelo de resistividad eléctrica. Se puede observar un bloque muy conductor probablemente correspondiente a una masa de arcilla que ocupa la parte central y profunda del perfil, seguido de un nivel discontinuo y dislocado de resistividad eléctrica media.

El modelo eléctrico Figura 7 correspondiente a este apartado tiene un aspecto similar al anterior. Se trata de un único bloque monótono más resistente que el anterior y presentando zonas o masas más resistentes y discontinuas a distintas profundidades. Esta es una sección transversal típica de un modelo monótono con la presencia de discontinuidades más resistentes.

La interpretación de estos datos conduce a un modelo de resistividad intrínseco formado por dos terrenos:

- I. Un suelo superficial moderadamente resistente (40-60 Ohm·m) correspondiente a los terrenos de cobertura;
- II. Una segunda tierra conductora profunda (12-30 Ohm·m) correspondiente al nivel de arcilla ya identificado anteriormente.

Una tierra intermedia resistente que tiene una resistividad de 115 Ohm·m asignada lechos discontinuos o heterogeneidades aluviales; un suelo profundo relativamente resistente (más de 350 Ohm·m).

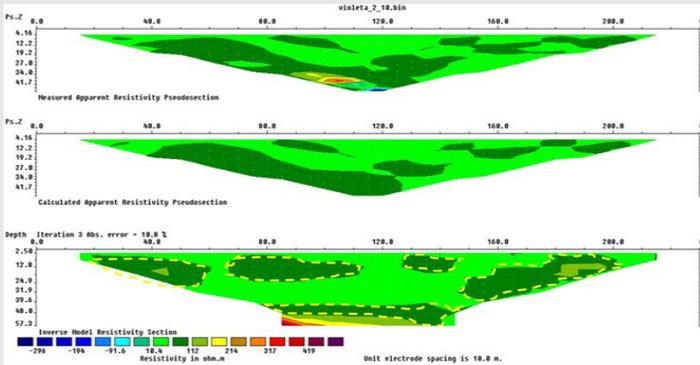


Figura 7. Perfil de línea 1, separación de 10 metros con arreglo Dipolo-Dipolo sobre la calle: Violeta.
Fuente: Elaboración propia.

El modelo eléctrico Figura 7 correspondiente a este apartado tiene un aspecto similar al anterior. Se trata de un único bloque monótono más resistente que el anterior y presentando zonas o masas más resistentes y discontinuas a distintas profundidades. Esta es una sección transversal típica de un modelo monótono con la presencia de discontinuidades más resistentes. La interpretación de los datos registrados en esta sección resultó en un modelo geoelectrico formado por los siguientes tres niveles:

Una carcasa conductora cuya resistividad varía de 15 a 50 Ohm·m correspondiente a las facies dominantes del área de estudio.

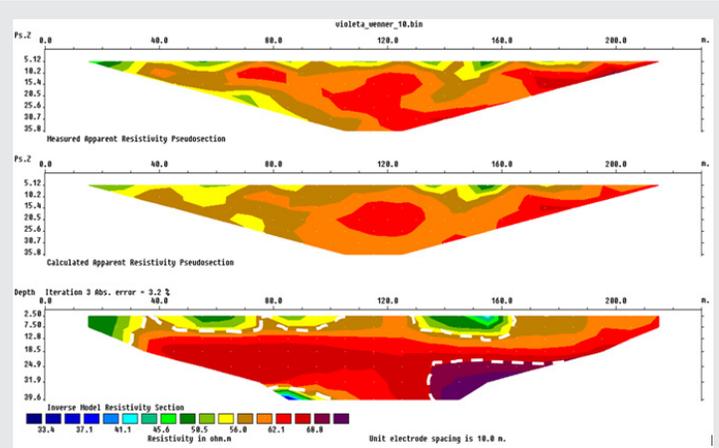


Figura 8. Perfil de línea 1, separación de 10 metros con arreglo Wenner sobre la calle: Violeta.
Fuente: Elaboración propia.

Esta sección muestra en el modelo de resistividad (Figura 8) un terreno exclusivamente resistente probablemente correspondiente al basamento geológico de la región. Se identificaron bolsas de relleno posteriores en la superficie. Es evidente que se trata de depósitos aluviales que ocupan depresiones resultantes de la erosión del subsuelo.

El modelo no presenta discontinuidad litológica como fallas, fisuras o fracturas; sin embargo, la geometría de la tierra presente muestra que la región ha sufrido los efectos de la tectónica compresiva seguida de una erosión intensiva.

El mapeo de cuerpos subterráneos requiere una mayor investigación con un espaciado entre electrodos más estrecho para comprender mejor la geometría de estos cuerpos y su extensión lateral. Mediante una malla fina, también se pueden comprender los diferentes tipos de contactos entre las masas subterráneas y su extensión en profundidad.

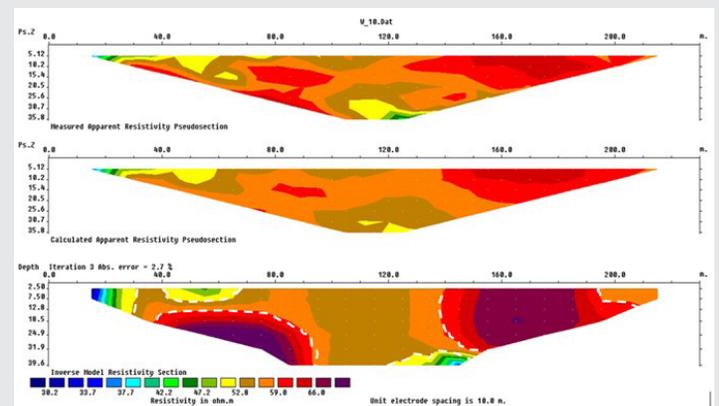


Figura 9. Perfil de línea 2, separación de 10 metros con arreglo Wenner sobre la calle: Petunias
Fuente: Elaboración propia.

En esta sección Figura 9 se muestra una base de tierra fuertemente fragmentada por la tectónica frágil. Esta

tectónica provocó una dislocación del macizo rocoso con una liberación significativa superior a 50 m. Esta base tiene forma de bloque parcialmente resistente en la superficie. Por encima de esta masa resistente, se observa una cubierta de suelo moderadamente resistente entrecruzado por algunas depresiones conductoras.

Parece claramente que el área en cuestión ha sufrido una tectónica significativa, revelando un paseo de corte entre las masas resistentes. Posteriormente, este corredor se rellenó con materiales menos resistentes hasta profundidades superiores a los 25 m.

En la parte inferior de la serie, hay un terreno conductor visto en las secciones anteriores a una profundidad de aproximadamente 22 m. La profundidad de investigación que marca la longitud del perfil no permite seguir la extensión en profundidad de esta última formación.

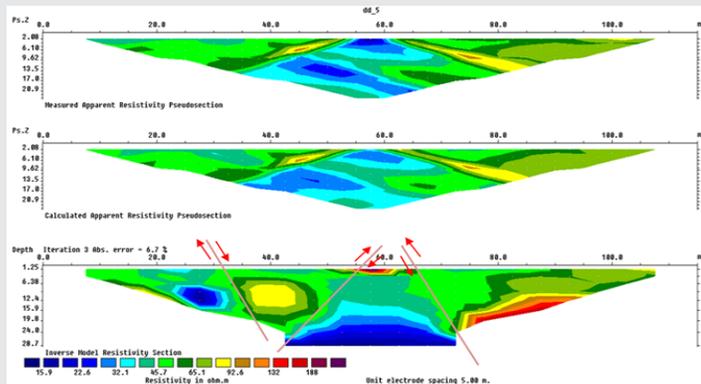


Figura 10. Perfil de línea 2, separación de 5 metros con arreglo Dipolo-Dipolo sobre la calle: Petunias. Fuente: Elaboración propia.

El modelo de resistividad de la sección Figura 10 dd_5 muestra un terreno fuertemente tectonizado y defectuoso. Varias unidades se han individualizado como bloques separados de diferentes resistividades.

La base de la serie está formada por suelos arcillosos o arcillosos limosos con resistividad menor a 30 Ohm.m. En la parte superior se encuentra un material moderadamente resistente pero muy heterogéneo. También se observaron fragmentos de arcilla en el modelo de resistividad.

La base resistente aparece en la profundidad, pero dislocada por el sistema de fallas que afecta a la serie.

Aquí de nuevo en esta sección; se nota una erosión intensa que conduce a una penetración del terreno prospectado.

Esta sección Figura 11 muestra en el modelo de resistividad un terreno exclusivamente resistente probablemente correspondiente al basamento geológico de la región. Aparecen bolsas conductoras muy localizadas

en la base. Probablemente sea una cavidad llena de arcilla o agua; los valores de la resistividad eléctrica no superan los 20 Ohm.m. Parece claro que se trata de una base fuerte formada por rocas endógenas con una inclinación de unos 45°.

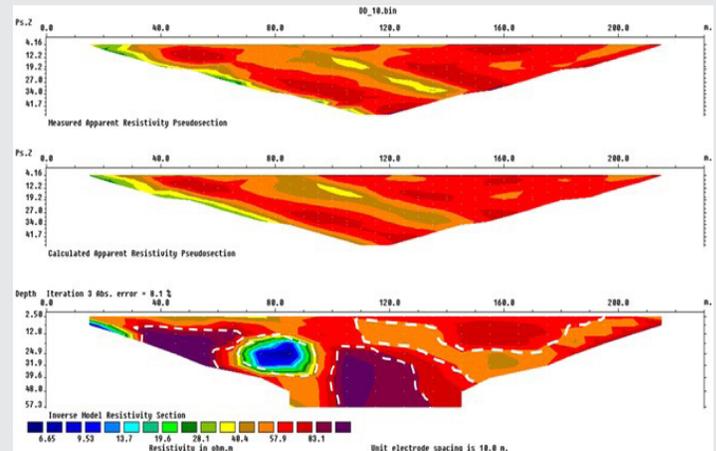


Figura 11. Perfil de línea 2, separación de 10 metros con arreglo Dipolo-Dipolo sobre la calle: Petunias. Fuente: Elaboración propia.

El modelo no presenta discontinuidad litológica como fallas, fisuras o fracturas; sin embargo, la presencia de anomalías conductoras dentro del macizo rocoso aboga a favor de fenómenos de disolución o des carbonatación. En efecto; la forma ovoide de la estructura y la naturaleza altamente conductora de su respuesta geofísica argumentan a favor de un vacío subterráneo con posterior relleno de arcilla o agua.

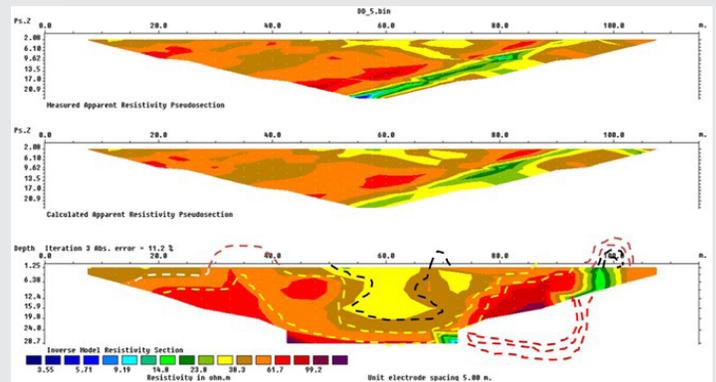


Figura 12. Perfil de línea 3, separación de 5 metros con arreglo Dipolo-Dipolo sobre la calle: Lavanda. Fuente: Elaboración propia.

El análisis de esta sección de resistividad Figura 12 muestra la presencia de tres bloques de resistividad que forman una estructura sinclinal:

Un primer grupo que constituye un bloque de la región cuya resistividad supera los 60 Ohm*m. Sin duda, este bloque sufrió una fuerte compresión que dio lugar a la formación de una fosa sinclinal con una profundidad media de unos 25 m. este pozo se rellenó con materiales posteriores.

Un segundo grupo en forma de capa subsuperficial fuertemente plegada y erosionada, cuya resistividad varía entre 40 y 60 Ohm·m.

Un tercer grupo que constituye un material de relleno que está en el centro del sinclinal con una resistividad eléctrica entre 30 y 40 Ohm·m.

Al final de la sección; se puede observar claramente que la compresión condujo a un aumento de materiales conductores con resistividad menor a 20 Ohm·m. Se ha observado una erosión generalizada en el subsuelo que conduce a una yuxtaposición de las facies mencionadas anteriormente.

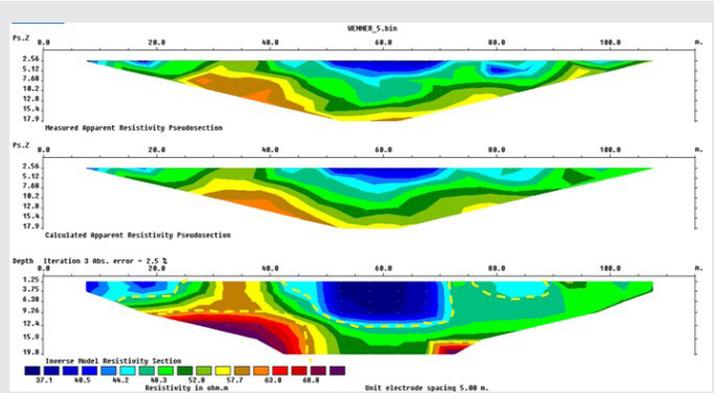


Figura 13. Perfil de línea 3, separación de 5 metros con arreglo Wenner sobre la calle: Lavanda.
Fuente: Elaboración propia.

El modelo eléctrico de esta sección (Figura 13) tiene un aspecto similar al anterior de la línea 1 con separación de 5 metros con arreglo Wenner en la calle Violeta. Ésta es una curva típica de una superposición de tres pistas. La interpretación de los datos registrados resultó en un modelo geoelectrico formado por las siguientes tres capas: Un suelo resistente C1 profundo (más de 63 Ohm·m) correspondiente a la base resistente del área de estudio; un suelo intermedio resistente R1 con una resistividad de aproximadamente 55 Ohm·m atribuida a rocas sedimentarias dislocadas por tectónica frágil; una superficie C2 relativamente conductora (menos de 42 Ohm·m).

La misma observación confirma en esta sección el aspecto discontinuo de las masas conductoras y confirma que la región ha sufrido tectónica de distensión. Sin embargo, los valores registrados en esta sección son mucho más bajos que los de las secciones anteriores. Observamos así un bloque muy conductor probablemente correspondiente a una masa de arcilla que ocupa la parte central y profunda del perfil seguido de un nivel discontinuo y dislocado de resistividad eléctrica media.

CONCLUSIONES

Los resultados de la resistividad eléctrica y los modelos realizados en la zona de estudio demuestran que el tipo de suelo es de origen lacustre con depósitos

aluviales. Este tipo de suelo es muy susceptible a fenómenos con la subsidencia. Según CENAPRED (2014) la subsidencia se presenta más comúnmente en suelos de origen lacustre y en depósitos aluviales y fluviales, constituidos por partículas finas de suelo como arcillas, limos y arenas finas [17]. Estos coinciden con el tipo de suelo de Ciudad Guzmán. Es bien sabido que son varias las causas que pueden provocar la deformación por subsidencia del terreno [18, 19]. Sin embargo, el proceso que más influye es el hundimiento por extracción de agua [20]. No obstante, en perfil número 5 se detectó una falla profunda que puede ser la causa agravante de la zona de estudio. Ciudad Guzmán es una zona activa desde el punto de vista sísmico [21]. Cabe mencionar que ya existen trabajos realizados por el CENAPRED en Ciudad Guzmán con el tema de las afectaciones por hundimientos y agrietamientos y acorde con este, estimaron que estos daños han estado presentes desde más de 30 años afectando a decenas o cientos de viviendas, así como a obras de infraestructura, caminos, carreteras y banquetas. De los daños que aparentemente son nuevos en la zona de estudio, se concluye que también se deben al fenómeno de subsidencia, y estos se pueden estar generando y acelerando por la presente y continua sobreexplotación del acuífero.

Estos resultados esperamos que sean de gran utilidad para protección civil del estado, así como la municipal para que creen estrategias que ayuden a mitigar los riesgos, pero sobre todo es para la comunidad, que en general son los que están más afectados con estas apariciones. Además, se sugiere que lo prudente es llevar a cabo monitoreos periódicos de este tipo de construcciones a fin de poder usar sus indicios estructurales como alerta temprana.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Loupasakis, C.; Rozos, D. (2009). *Finite-element simulation of land subsidence induced by water pumping in Kalochori village, Greece*. Q. J. Eng. Geol. Hydrogeol., 42, 369-382.
- [2] Raspini, F.; Loupasakis, C.; Rozos, D.; Adam, N.; Moretti, S. (2014). *Ground subsidence phenomena in the Delta municipality region (Northern Greece): Geotechnical modeling and validation with Persistent Scatterer Interferometry*. Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf., 28, 78-89.
- [3] Iliá, I.; Loupasakis, C.; Tsangaratos, P. (2016). *Assesing ground subsidence phenomena with Persistent Scatterer Interferometry data in Western Thessaly, Greece*. In *Proceedings of the 14th International Congress of the Geological Society of Greece, Thessaloniki, Greece*, 25-2.
- [4] Rodríguez-Castillo, R., & Rodríguez-Velázquez, I. (2007). *Consecuencias sociales de un desastre inducido, subsidencia*. Septiembre, 2021, de Bole-

fín de la Sociedad Geológica Mexicana Sitio web: <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM2006v58n2a10>.

[5] Kakar, N., Kakar, D. M., and Barrech, S. (2020): Land subsidence caused by groundwater exploitation in Quetta and surrounding region, Pakistan, Proc. IAHS, 382, 595-607, <https://doi.org/10.5194/piahs-382-595-2020>.

[6] CENAPRED. (2019). Estimación del hundimiento diferencial del terreno utilizando la técnica double-pass para la grid en la ciudad de México. Octubre, 2021, de Centro Nacional De Prevención De Desastres Sitio web: https://www1.cenapred.unam.mx/DIR_INVESTIGACION/2020/1er_Trimestre/FRACCION_XLI/DSyPG/2019_Estimacion_del_hundimiento_diferencial_del_terreno_utilizando.pdf.

[7] Galloway, D.L.; Burbey, T.J. (2011) Review: Regional land subsidence accompanying groundwater extraction. *Hydrogeol. J*, 19, 1459-1486.

[8] Tsangaratos, P.; Iliá, I.; Loupasakis, C. Land subsidence modelling using data mining techniques. The case study of Western Thessaly, Greece. In *Natural Hazards GIS-Based Spatial Modeling Using Data Mining Techniques*; Pourghasemi, H.P., Rossi, M., Eds.; Springer Nature Switzerland AG: Cham, Switzerland, 2019; pp. 79-103.

[9] Hu, R.; Yue, Z.; Wang, L.u.; Wang, S. Review on current status and challenging issues of land subsidence in China. *Eng. Geol.* 2004, 76, 65-77. [Google Scholar] [CrossRef].

[10] CONAGUA. (2020). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero ciudad guzmán (1406), estado de jalisco. Septiembre, 2021, de Comisión Nacional del Agua sitio.web:https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/jalisco/DR_1406.pdf.

[11] Cardi. (2019). Subsistencia urbana. Agosto, 2021, de Instituto de Geofísica, UNAM. Sitio web: <http://cardi.geofisica.unam.mx/subsistencia/styled-7/index.html>.

[12] Arlandí, M. (2007). Geofísica Aplicada a la Obra Civil. Método Geoeléctrico y Sísmica de Refracción. Septiembre 17, 2021, de Geoconsult Ingenieros Consultores. Sitio web: <http://www.lapisspecularis.org/Art%C3%ADculos/geofisicaObraCivil.pdf>.

[13] IRIS Instruments. (2021). Software de procesamiento Resistividad, software de polarización inducida. ProsysII. Septiembre 26, 2021, de IRIS Instrument Sitio web: http://www.iris-instruments.com/Pdf_file/Prosys_Gb.pdf.

[14] Geotomo Software. (2010). RES2DINV. 3.59. septiembre 26, 2021, de Geotomo Software Sitio web: <https://pdfcoffee.com/res2dinv-2enes-1-traducido-pdf-free.html>.

[15] CENAPRED. (2013). Visita técnica al municipio de Zapotlán el Grande, Jalisco, para revisar los daños producidos por los agrietamientos y hundimientos que afectan a decenas de viviendas y obras de infraestructura de ciudad guzmán. Agosto, 2021, de Centro Nacional de Prevención de Desastres Sitio web: https://www1.cenapred.unam.mx/DIR_SERVICIOS_TECNICOS/SANI/PAT/2018/3er%20trimestre%202018/2832%20DI/12973/07%20Julio/Docs%20Probatorios/Notas%20t%C3%A9cnicas/4.-%20Inf%20Cd%20Guzman%20Grietas%20Agosto_2013%20vFinal%20Rev.pdf.

[16] Alencáster, G; Jerjes Pantoja, J, (1986). AlorCoalcomána ramosa (Boehm) (Bivalvia-hippuritacea) del Albiano Temprano del Cerro de Tuxpan, Jalisco. *Bol. Soc. Geol. Mexicana*, Tomo XLVII. No. 1. <http://dx.doi.org/10.18268/BSGM1986v47n1a3>.

[17] Centro Nacional de Prevención de Desastres (CENAPRED) (2014). "Informe Global Hundimiento Regional y Agrietamiento del Terreno". Secretaría de Gobernación.

[18] Feng, Q.-Y.; Liu, G.-J.; Meng, L.; Fu, E.-J.; Zhang, H.-R.; Zhang, K.-F. (2008). Land Subsidence Induced by Groundwater Extraction and Building Damage Level Assessment—A Case Study of Datun, China. *J. China Univ. Min. Technol.* 18, 556-560.

[19] Awasthi, S.; Varade, D.; Bhattacharjee, S.; Singh, H.; Shahab, S.; Jain, K. (2022). Assessment of Land Deformation and the Associated Causes along a Rapidly Developing Himalayan Foothill Region Using Multi-Temporal Sentinel-1 SAR Datasets. *Land*, 11,2009. <https://doi.org/10.3390/land11112009>.

[20] Chaussard E, Havazli E, Fattahi H, Cabral-Cano E, Solano-Rojas D (2021) Over a century of sinking in Mexico City: no hope for significant elevation and storage capacity recovery. *J Geophys Res Solid Earth* 126(4):1-18. <https://doi.org/10.1029/2020JB020648>.

[21] Brunori, C.A.; Bignami, C.; Albano, M.; Zucca, F.; Samsonov, S.; Groppelli, G.; Norini, G.; Saroli, M.; Stramondo, S. (2015). Land subsidence, Ground Fissures and Buried Faults: InSAR Monitoring of Ciudad Guzmán (Jalisco, Mexico). *Remote Sens.* 2015, 7, 8610-8630. <https://doi.org/10.3390/rs70708610>.