

Exploración del suelo y subsuelo con un georadar en sitios selectos en la periferia de la zona urbana de Zacatecas y Guadalupe, Zacatecas, México

Gali Aleksandra Beltrán-Zhizhko¹, Felipe de Jesús Escalona-Alcázar², Ernesto Patricio Núñez-Peña², Jorge Bluhm-Gutiérrez², Santiago Valle-Rodríguez², Alicia Esparza-Martínez³

¹King Abdullah University of Science and Technology, Earth Science and Engineering Program
P.O. Box 4700, Código Postal 23955-6900, Thuwal-Jeddah, Arabia Saudita

²Universidad Autónoma de Zacatecas, Unidad Académica de Ciencias de la Tierra
Calzada de la Universidad 108, Fracc. Progreso, C.P. 98058, Zacatecas, Zacatecas, México

³Universidad Autónoma de Zacatecas, Unidad Académica de Cultura, Av. López Velarde 707-D,
Centro Histórico, Zacatecas, Zacatecas, México

Resumen

Se realizó un estudio con georadar, antena de 100 MHz, en cuatro sitios selectos hacia donde las ciudades de Zacatecas y Guadalupe están creciendo. Las unidades litológicas, fallas y fracturas de los cuatro sitios fueron observadas en los radargramas, los cuales fueron procesados con varios filtros para obtener una mejor resolución. Los resultados de esta investigación muestran la complejidad en la estructura del suelo y subsuelo en los primeros 14 m de profundidad. Las estructuras del mapa geológico coinciden con las interpretadas en los radargramas, y se interpretan también nuevas estructuras. Es necesario considerar en la planeación urbana los rasgos litológicos y estructurales presentados, a pesar de que estos aún no han afectado de forma significativa las escasas obras de infraestructura. El contraste entre las unidades litológicas no es claro; sin embargo, el control estructural es el que principalmente debe tomarse en cuenta para la construcción. Los documentos oficiales en los que se definen las políticas de crecimiento de las ciudades no consideran las variables antes mencionadas. Solamente mencionan el aprovechamiento sustentable del territorio, la regularización de los asentamientos humanos irregulares y minimizar el crecimiento en pendientes mayores a 30°. Por esta razón es necesaria la actualización y publicación del Atlas de Riesgo del estado de Zacatecas.

Palabras clave: Georadar, antena 100 MHz, planeación urbana, estructuras geológicas, Zacatecas, Guadalupe, riesgo.

Abstract

A study was conducted with georadar, 100 MHz antenna, in four selected sites toward where the cities of Zacatecas and Guadalupe are growing. The lithology, faults and fractures of the four sites were observed in the radargrams, which were processed with multiple filters to get a better resolution. The results of this study show the complexity in the structure of the soil and subsoil in the first 14 m of depth. The structures on the geological map coincide with the interpreted in the radargrams, and new structures are also interpreted. It is necessary to consider in the urban planning the lithology and structural features presented, despite the fact that these have not yet significantly affected the few works of infrastructure. The contrast between the rock units is not clear; however, the structural control is the one that should mainly be taken into consideration for the construction. The official documents that define the policies of growth of the cities do not consider the above variables; they only mention the sustainable development of the territory, the regularization of irregular settlements and to minimize the growth in slopes greater

than 30°. For this reason, the updating and publication of the Atlas of Risks of the state of Zacatecas is necessary.

Keywords: Georadar, 100MHz antenna, urban growth, geological structures, Zacatecas, Guadalupe, hazards.

Introducción

El crecimiento de las ciudades de Zacatecas y Guadalupe (Figura 1) ha sido regido principalmente por la ubicación de las zonas en donde se desarrollaban actividades mineras (Enciso-de la Vega, 1994) y, actualmente, por la cercanía con las principales vías de comunicación. En la planeación del desarrollo urbano no se consideran la forma del territorio, su cobertura, las características del suelo y subsuelo; por ende, tampoco se toman en cuenta las zonas de riesgo por fenómenos naturales, por ejemplo la erosión y su potencial para desarrollar zonas de peligro.

Los documentos que rigen el desarrollo urbano y el crecimiento de las ciudades de Zacatecas y Guadalupe señalan la importancia en el cuidado y protección del medio ambiente, sin embargo, los criterios para lograrlo están pobremente definidos (SECOP, 2004 y 2010; SEDESOL, 2008; Ayuntamiento de Guadalupe, 2013; Ayuntamiento de Zacatecas, 2010). En el Programa de Desarrollo Urbano de la conurbación Zacatecas-Guadalupe 2004-2030 (SECOP, 2004) se hace referencia a los procesos de erosión y su relación con zonas de riesgo (Escalona-Alcázar et al., 2003), aunque en la práctica no se toman en cuenta. Además, en pocas ocasiones se hace una evaluación de las condiciones del suelo y, raramente, del subsuelo. En los planes municipales de desarrollo solamente se considera que hay riesgos naturales por procesos hidrometeorológicos (Ayuntamiento de Guadalupe, 2013), asentamientos irregulares (Ayuntamiento de Zacatecas, 2013) o sin detallar el tipo ni su ubicación (SECOP, 2010). Aunque la erosión y su zonificación (Escalona-Alcázar et al., 2012), los procesos geomórficos, la edafología y la geología son mencionados en los documentos que rigen la planeación del desarrollo urbano,

aún no se les da la importancia que se debe, probablemente porque hasta el momento no han causado pérdidas humanas.

Los efectos de la erosión son la remoción del suelo, de los sedimentos poco consolidados y de los materiales de relleno. Esto provoca la inestabilidad de las obras civiles que normalmente se fracturan y ocasionalmente colapsan. Otro efecto es la caída de bloques de roca en donde la pendiente es subvertical y la roca está fallada y fracturada; el diámetro de los bloques es menor a 50 cm, aunque pueden ser de mayores dimensiones. La erosión ocurre de forma lenta y constante, principalmente en la temporada de lluvias, que es de mayo a septiembre.

El crecimiento de las ciudades requiere la modificación del paisaje y el cambio de uso del suelo. Cuando estos cambios ocurren es poco probable que puedan analizarse las condiciones originales del terreno, es decir la morfología, red hidrográfica, el suelo y la geología, en términos de la facilidad con que la estructura del suelo y subsuelo puedan desarrollar una zona de riesgo. Por esto, la exploración del subsuelo en los sitios hacia donde las ciudades crecen debe de realizarse con métodos geofísicos que permitan tener una perspectiva de la estructura de la parte superior del subsuelo. En este trabajo se presentan los resultados de la aplicación de un georadar, antena de 100 MHz, en cuatro sitios selectos hacia donde las ciudades de Zacatecas y Guadalupe están creciendo. En los lugares elegidos, los terrenos fueron modificados de la siguiente forma: dos con rellenos de poco menos de 10 m de espesor y en los dos restantes el suelo, de menos de 1 m de espesor, solamente fue emparejado.

Materiales y métodos

La exploración del subsuelo se realizó con un georadar marca Malå, antena de 100 MHz. La capacidad de penetración de la onda electromagnética depende de las condiciones de conductividad y permitividad del subsuelo, llegando aproximadamente a 14 m de profundidad. Esta profundidad de penetración fue seleccionada porque en dos sitios el espesor del suelo es espesor a 1 m. En los dos sitios restantes, los cauces rellenos tienen una profundidad menor a 10 m.

La antena de 100 MHz fue calibrada con los siguientes parámetros:

- Ventana de 294 ns, equivalente a aproximadamente 14 m de profundidad.
- Intervalo de traza fue de 0.049 m.
- Velocidad de propagación de la onda electromagnética de 90 m/ns.
- La ganancia se ajustó manualmente en cada sección para evitar la saturación en la parte

superior o de la inferior del radargrama.

El procesamiento de los radargramas se hizo con el programa RAMAC Ground vision Ver. 1.4.5. Los filtros que se utilizaron fueron remoción del background, ganancia automática, pasa bandas, substracción de la media y filtro exponencial de ganancia. Debido a que en cada sitio el espesor del suelo, el relleno (natural o escombros) y el tipo de subsuelo son distintos, los valores de los parámetros de cada filtro fueron diferentes para cada perfil. También, en caso de que la señal perdiera su intensidad o no mejorará la respuesta a profundidad se eliminó alguno de los filtros.

El trabajo de campo se realizó en el verano de 2012 en los límites de la traza urbana de Zacatecas y Guadalupe (Figura 1). Las condiciones de los terrenos fueron las siguientes: el terreno desmontado y emparejado, con una pendiente máxima de 5%, con escasas construcciones alrededor y trazos incipientes de calles.



Figura 1. Imagen de Google Earth con la ubicación del área de estudio así como de los perfiles de georadar y de los elementos geográficos y estructurales mencionados en el texto. Las líneas azul discontinuas son los segmentos de los arroyos que están en las zonas donde se obtuvieron los perfiles de georadar.

Marco geológico local

Las ciudades de Zacatecas y Guadalupe cubren la mayor parte de los afloramientos de la secuencia estratigráfica del área de estudio; sin embargo, los cortes en la roca, hechos para la construcción de obras de infraestructura, permiten tener un control de la litología y de las estructuras.

La secuencia estratigráfica de la zona urbana de Zacatecas, Guadalupe y sus alrededores (Figura 2) ha sido descrita por distintos autores. De la base a la cima está formada por el Grupo Zacatecas del Cretácico Inferior (Escalona-Alcázar et al., 2009 y 2014a) que está cubierto discordantemente por el Conglomerado Zacatecas del Paleoceno-Oligoceno (Edwards, 1954; Loza-Aguirre et al., 2008; Escalona-Alcázar et al., 2014b) que tiene interestratificadas y está cubierto por tobas e ignimbritas del Eoceno-Mioceno (Ponce y Clark, 1988; Escalona-Alcázar et al., 2003; Loza-Aguirre et al., 2008; Tristán-González et al., 2012). En este subcapítulo sólo se presenta una recapitulación de la estratigrafía.

La base del Grupo Zacatecas es la Formación Zacatecas, que en la parte inferior está formada principalmente por lutitas. Hacia la parte superior las lutitas están interestratificadas con areniscas de grano fino a medio y en contacto transicional con conglomerados polimícticos. A su vez los conglomerados están cubiertos por areniscas y lutitas. En la parte superior de la secuencia hay intercalados escasos derrames de lava que cuando son dominantes forman el Complejo Las Pilas. Los derrames de lava del Complejo tienen estructura masiva y almohadillada; tienen interestratificadas capas de lutita y wacka. La secuencia Mesozoica está intrudida por diques máficos y lacolitos dioríticos; además, tiene alteración hidrotermal y/o deutérica.

El Grupo Zacatecas está cubierto de forma discordante por el Conglomerado Zacatecas. El conglomerado es polimíctico, formado por

clastos de basalto, granito, lutita, cuarcita y riolita. En la parte inferior está bien consolidado, sin embargo, de la parte media hacia arriba la consolidación disminuye, principalmente donde está interestratificado con rocas volcánicas, donde es rico en clastos de granito y/o en donde los estratos de arenisca de grano medio a grueso son más abundantes. En la parte superior del Conglomerado Zacatecas hay interestratificadas capas de tobas riolíticas/dacíticas y está cubierto por la Secuencia Volcánica del Terciario, que son tobas e ignimbritas también de composición riolítica/dacítica. Toda la secuencia está cortada por diques y domos riolíticos.

Marco estructural local

El estilo de deformación de la secuencia estratigráfica del área de estudio fue presentado por Escalona-Alcázar et al. (2003 y 2009), por lo que aquí sólo se presenta una síntesis. Las lutitas de la Formación Zacatecas tienen foliación bien definida por sericita; en cambio en las areniscas y conglomerados está pobremente desarrollada. La Formación Zacatecas tiene pliegues de amplitud de centenas de metros, así como de menos de 50 m, ocasionalmente en chevron, asociados con las fallas inversas. En el Complejo Las Pilas los pliegues son escasos y, en las rocas sedimentarias y derrames de lava, el desarrollo de la foliación disminuye hacia la parte superior de la secuencia. El echado general de la foliación es menor a 15°; sin embargo, en donde hay fallas puede ser sub-vertical. El Grupo Zacatecas está cortado por fallas inversas, mientras que toda la secuencia estratigráfica está cortada por fallas normales.

La deformación dúctil del Grupo Zacatecas se desarrolló durante la orogenia Laramide del Cretácico Tardío al Eoceno (Aranda-Gómez et al., 2000). La deformación de principios del Cenozoico inició con el desarrollo del sistema de fallas San Luis-Tepehuanes que formó fallas normales orientadas WNW-WSW (e.g., Veta La

Cantera, Figura 2) (Loza-Aguirre et al., 2008). A partir del Oligoceno la deformación de Cuencas y Sierras formó fallas normales con orientación preferente de NNE a NNW (Aranda-Gómez et al., 2000; Nieto-Samaniego et al., 2005).

En el Grupo Zacatecas la intensidad del fallamiento y, por lo tanto, del fracturamiento es mayor porque ha estado sujeto a un número mayor de eventos de deformación que, aunados a la alteración hidrotermal, provocan que las rocas sean mecánicamente menos competentes, especialmente en donde la pendiente es casi vertical.

Resultados

Los perfiles de radar se realizaron en cuatro sitios (Figuras 1 y 2) con características litológicas y geomorfológicas distintas. En los radargramas se utilizaron como modelo en la interpretación los rasgos que se observan en las pendientes subverticales en donde la roca y los sedimentos

afloran, así como en donde el relleno de cauces de arroyos está en proceso (Figura 3).

En las figuras 4 a 7 se muestran los elementos interpretados, que son:

- 1) Rasgos continuos: pueden ser el contacto entre unidades litológicas, materiales con diferente granulometría (subhorizontales o subverticales), así como la base o etapas de relleno de un paleo-cauce.
- 2) Estructuras geológicas: pueden ser fallas o fracturas.
- 3) Lineamientos: son rasgos que posiblemente sean fracturas en los depósitos fluviales y, en los rellenos con escombros pueden ser el límite entre distintos depósitos de escombros.
- 4) Hipérbolas pequeñas (< 1m de ancho) con ondas múltiples debajo de ellas: son rasgos puntuales que pueden ser ductos de agua, drenaje, electricidad, teléfono o fragmentos de roca o escombros de menos de 1 m de diámetro.

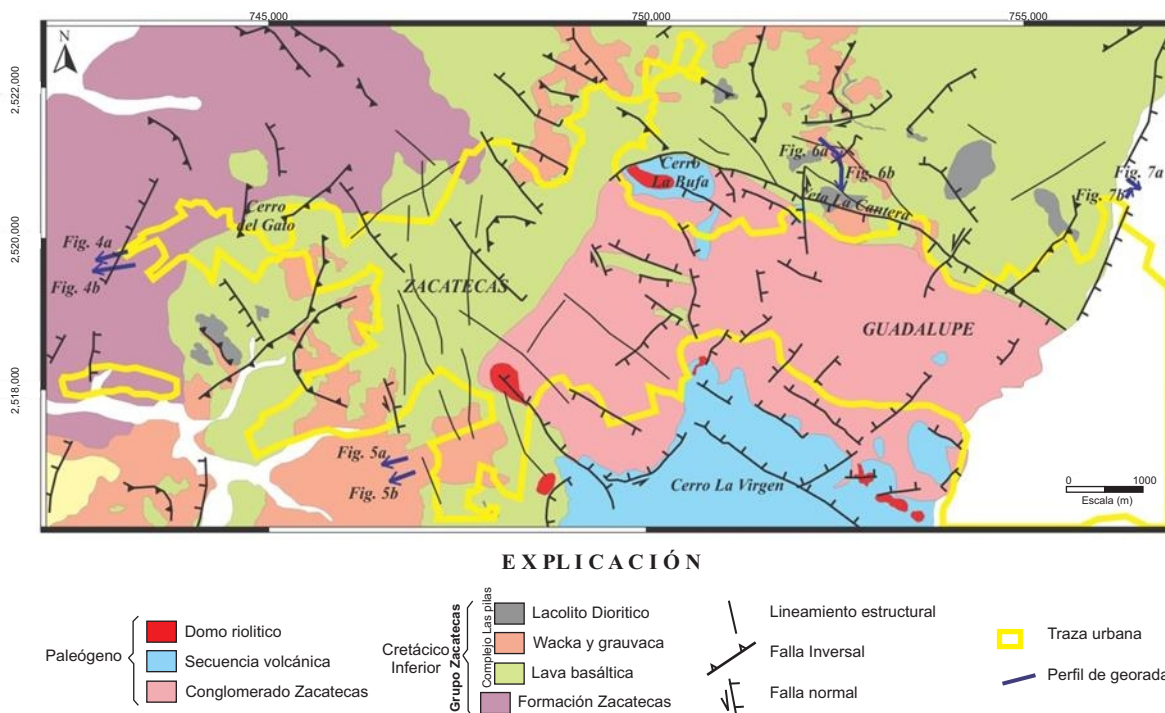


Figura 2. Mapa geológico simplificado de la zona urbana de Zacatecas-Guadalupe y sus alrededores (modificado de Enciso-de la Vega, 1994; Escalona-Alcázar et al., 2003, 2009 y 2014a). La traza urbana es de finales de 2012, la ubicación de los perfiles de georadar fue en los sitios hacia donde la ciudad estaba desarrollándose. En los perfiles la flecha indica la dirección en que fueron realizados.

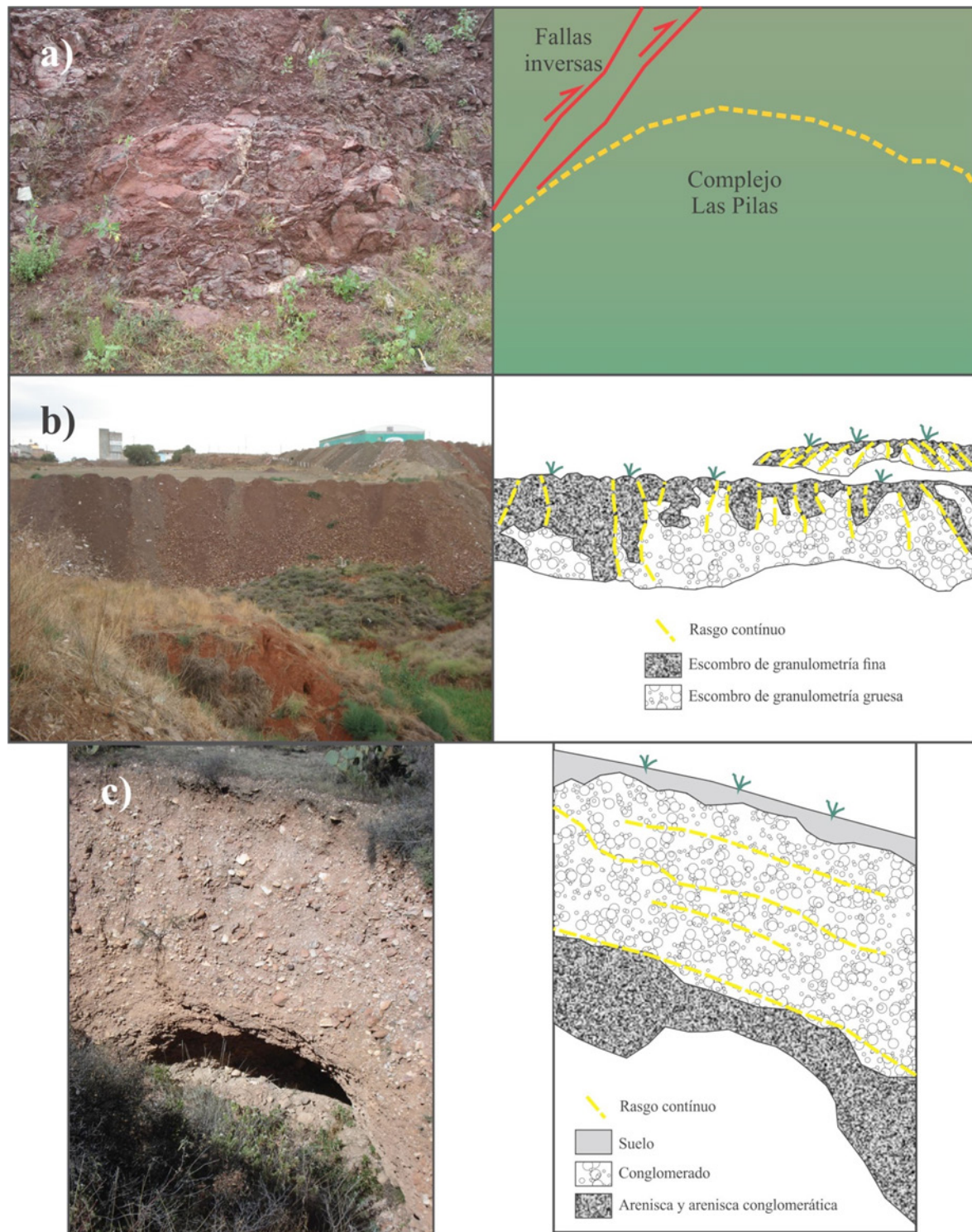


Figura 3. Los rasgos rectilíneos o curvos que se observan en secciones subverticales en la roca (a), en materiales de relleno (b) y en sedimentos (c) se utilizaron para la interpretación de los radargramas.

Plaza Universidad

En Plaza Universidad (Figura 4) las características geológicas y morfológicas son las siguientes. El sitio es el cauce de un arroyo y posiblemente de algunos tributarios que fueron rellenados con escombros; actualmente el terreno está emparejado y tiene un desnivel de menos del 5%. La profundidad máxima de relleno es a lo largo del eje del arroyo principal y es menor a 10 m. El arroyo está en la Formación Zacatecas, en las facies de lutita y limolita con escasas areniscas interestratificadas. Los sedimentos tienen foliación bien definida, subhorizontal, posiblemente con pliegues de gran amplitud. La Formación Zacatecas en esta parte está cortada por una falla normal que buza al W (Figura 2). En este sitio se realizaron seis perfiles, tres perpendiculares al arroyo y tres paralelos. En la Figura 4 (a y b) se muestran dos de los más representativos, que son los perpendiculares al arroyo y que cortan de forma oblicua a la falla normal.

En el perfil de la Figura 4a se observa que en los dos o tres primeros metros de profundidad hay capas subhorizontales que son el relleno final nivelado. En Plaza Universidad las únicas obras de infraestructura que hay son los registros de agua o drenaje que en el radargrama están bien definidos con una hipérbola de aproximadamente 2 m de ancho y sus múltiples. A profundidades que varían de 2 a 5 m hay escasas hipérbolas de más de 4 m de amplitud que están a 12, 30 y 250 m que posiblemente sean fragmentos de rocas o escombros utilizados para el relleno. Se interpretaron estructuras geológicas subverticales que son fallas y fracturas. La falla normal del mapa geológico (Figura 2) es cortada por el perfil de georadar a 100 m; a esta distancia se observan tres estructuras adyacentes a la falla principal. Entre 150 y 164 m hay una zona de falla normal con bloque que cae hacia el SW; la ubicación y actitud de estas estructuras coincide

con la orientación de las fallas que limitan a la sierra de Zacatecas. Después de los 192 m inicia el relleno del cauce en donde a partir de los aproximadamente 8 m de profundidad hay rasgos continuos subhorizontales que pueden ser las etapas de relleno del cauce, similares a los mostrados en la Figura 3b o bien estratos de la Formación Zacatecas que buzan al SW. Las fracturas que están a partir de los 234 m y que son más abundantes a partir de los 280 m probablemente son los contactos subverticales entre el escombros utilizado como relleno (Figura 3b). A 380 m está el cauce del arroyo principal, en donde también se observan lineamientos e hipérbolas que pueden ser fragmentos de roca o escombros (Figura 3b).

El perfil de la Figura 4b está aproximadamente a 150 m al sur del mostrado en la Figura 4a. La Formación Zacatecas abarca 410 m del perfil de la Figura 4b. De 90 a 320 m de longitud hay rasgos continuos subhorizontales que probablemente son contactos entre las facies de la Formación Zacatecas (Figura 3c). En los primeros 3 m de profundidad y después de los 320 m del origen hay hipérbolas pequeñas que pueden ser escombros o rocas. En la Figura 4b, a 310 m del origen, se observa la continuación de la falla normal del mapa geológico (Figura 2) y de la Figura 4a, aunque, en esta parte solamente hay una fractura asociada con la falla. De los 410 m y hasta el final del perfil es el relleno del cauce del arroyo principal cuya base se interpretó aproximadamente a 11 m de profundidad. En el material de relleno hay estructuras continuas subverticales que posiblemente son los límites entre el relleno con escombros (Figura 3b).

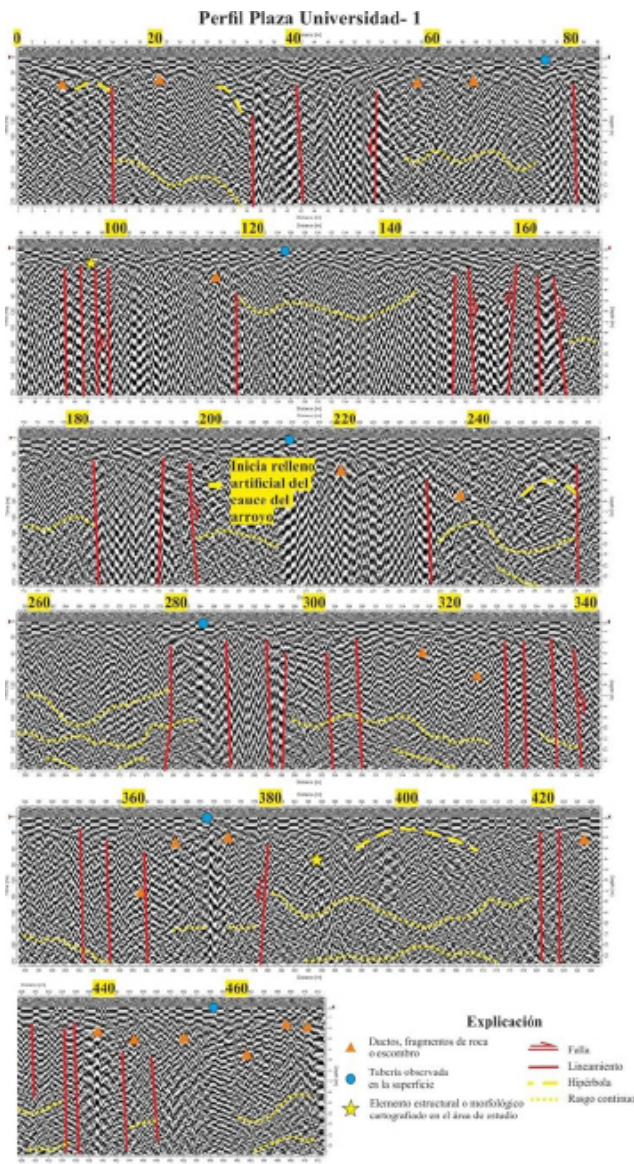


Figura 4a

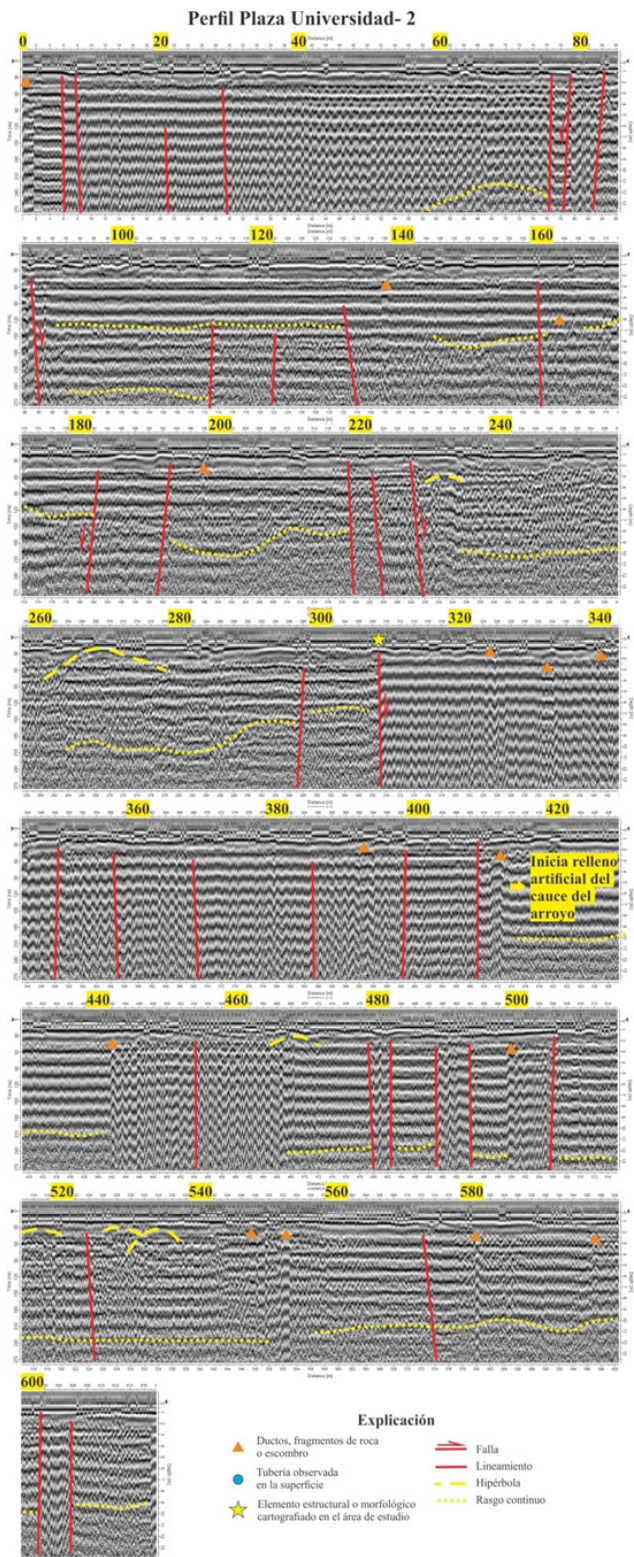


Figura 4b

Figura 4. Radargramas interpretados de Plaza Universidad. La estrella amarilla indica los rasgos superficiales que se observan en los radargramas. a) Perfil paralelo a la carretera; y b) perfil ubicado a aproximadamente 150 m al sur.

Colinas del Padre

En este sitio aflora el Complejo Las Pilas, que tiene interestratificadas wackas y grauvacas de espesor menor a 20 m (Figura 2). La estructura de la roca es masiva y almohadillada, con foliación bien definida en y adyacente a las fallas inversas y con menor intensidad en los contactos entre las almohadillas. Además, la secuencia está cortada por fallas normales orientadas NNW-SSE que pueden provocar el fracturamiento intenso adyacente a ellas o en la intersección con las fallas inversas. La roca presenta alteración hidrotermal que varía de moderada a intensa debido a su cercanía con una zona mineralizada. La pendiente de este sitio es de aproximadamente 8% y el espesor del suelo es menor a 1.5 m.

En este sitio se realizaron dos perfiles con georadar cuyos resultados se muestran en

la Figura 5. En los dos perfiles (Figuras 5a y b) hay hipérbolas pequeñas entre 2 y 4 m de profundidad que, por la litología del área, pueden ser fragmentos de roca, almohadillas o escombros utilizados para rellenar y emparejar el sitio. En ambos perfiles las estructuras geológicas, fallas y fracturas son abundantes, principalmente en el de la parte norte. Las fallas que tienen continuidad en ambos perfiles son las que están a 20, 60, 160, 260 y 280 m; la que está a 60 m es una falla normal con buzamiento hacia el W. En los dos perfiles hay hipérbolas amplias que por el tipo de roca pueden ser pliegues o paleo-tubos de lava. A más de 6 m de profundidad (Figura 5b), hay rasgos continuos que pueden ser el contacto entre los distintos derrames de lava que forman al Complejo las Pilas o a los sedimentos que están interestratificados.

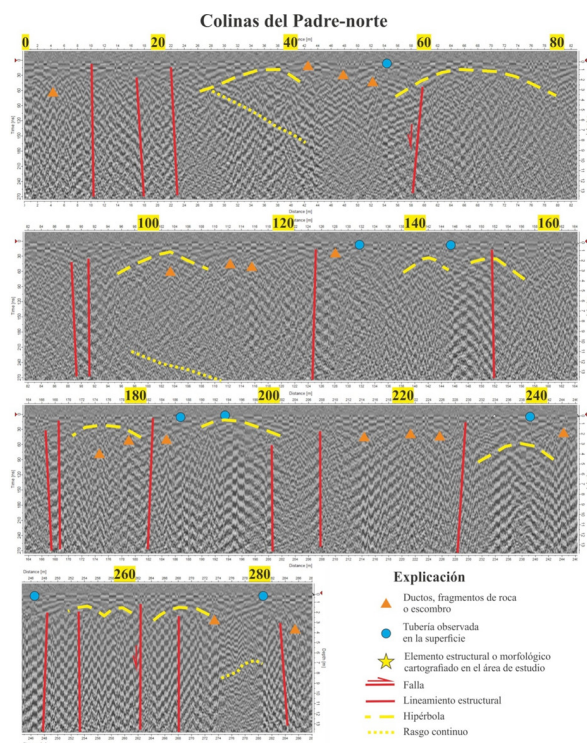


Figura 5a

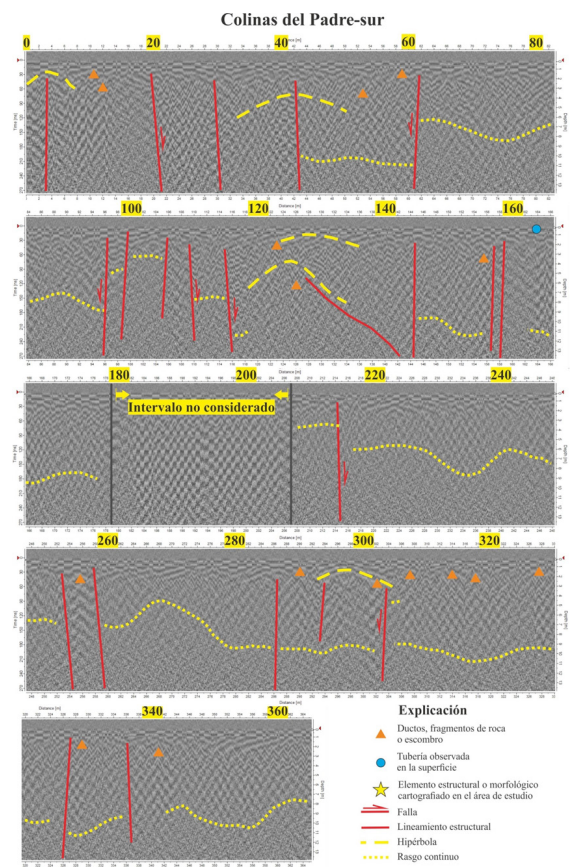


Figura 5b

Figura 5. Radargramas interpretados en Colinas del Padre. La explicación es la misma que en la Figura 4. En la Figura 5b en el “intervalo no considerado” hubo problemas en la recepción de la señal, por lo que este intervalo no se consideró en la interpretación.

Presa de Infante

Los perfiles se realizaron en un camino paralelo al cauce de un arroyo, cuya pendiente es menor a 8%. La secuencia estratigráfica está formada por derrames de lava de composición basáltica o andesítica basáltica que tienen interestratificadas capas de wacka y grauvaca de espesor aproximado 30 m. La secuencia está cortada por fallas normales de rumbo preferente WNW-ESE que son subparalelas a la veta La Cantera. Esta última es una falla normal mineralizada, de cerca de 7 km de longitud que pone en contacto al Grupo Zacatecas del Mesozoico con el Conglomerado Zacatecas y la Secuencia Volcánica del Terciario. Los perfiles se realizaron en la secuencia Mesozoica.

En la Figura 6 se muestran los perfiles de georadar de este sitio. El perfil de la parte norte (Fig. 6a) está en las rocas sedimentarias y derrames de lava. En este perfil las hipérbolas pequeñas están entre 2 y 5 m de profundidad. Dada la litología es probable que se deban a la estructura almohadillada de los derrames de lava, aunque, en el caso de las más someras (aproximadamente 2 m de profundidad) posiblemente se trate de escombros). En los primeros 100 m del perfil, los “rasgos continuos” probablemente son el contacto entre derrames de lava o bien con los sedimentos que hay interestratificados. Hay tres sitios con drenaje observados en superficie cuya ubicación es a aproximadamente 1 m de profundidad. A partir de los 100 m aproximadamente son comunes las fracturas y fallas normales, en este orden de abundancia. En la intersección del lineamiento estructural y la falla normal que corta el perfil (Figura 2), en el primero hay tres fracturas a aproximadamente 174 m; mientras que en el segundo hay tres fallas normales a 390 m del origen del perfil (Figura 6a). Hacia el sur (Figura 6b), el contacto de las rocas sedimentarias con los derrames de lava es por falla normal. En los derrames de lava también son comunes las estructuras geológicas, aunque, a diferencia del

perfil de la parte norte (Figura 6a), en este no se interpretaron fallas inversas. En la parte sur son comunes los rasgos continuos subhorizontales tanto rectilíneos como parábolas grandes. Debido al tamaño de los rasgos continuos y a la estructura de la roca observada en campo es probable que sean el contacto entre distintos derrames. A lo largo del perfil de la Figura 6b hay drenajes a menos de 3 m de profundidad que están marcados en el radargrama.

Unidad Deportiva sur

Los perfiles fueron realizados paralelo (Figura 7a) y perpendicular (Figura 7b) al cauce de un arroyo y a las fallas normales que limitan al área mostrada en la Figura 2. En el sitio donde se realizaron los perfiles hay un escalón en la orientación de las fallas normales que limitan a la sierra. Los perfiles están en la zona de piamonte, en depósitos fluviales y en el relleno del cauce del arroyo, cuya pendiente es de menos de 5% (Figura 2).

En el perfil paralelo al arroyo, oriental (Figura 7a), hay depósitos fluviales y escaso material de relleno que se utilizó para emparejar el área. En los radargramas de la Figura 7a se observan cambios en la amplitud e intensidad de las ondas electromagnéticas que pueden deberse a las fases de relleno tanto natural como artificial del arroyo. Por los cambios en la amplitud de la señal se observan al menos tres capas: la superficial, que va de cero a dos o tres metros de profundidad y que es el relleno utilizado para emparejar el área; una capa intermedia que disminuye su espesor hacia el SE y la capa inferior, cortada por fallas que también disminuye su espesor hacia el SE. Las capas intermedia e inferior son el relleno natural del arroyo, como se muestra en la Figura 3c. Entre 44 y 70 m se interpretaron dos fallas normales que cortan a las unidades intermedia e inferior. Los lineamientos en los sedimentos se interpretan como fracturas (Figura 7a); una explicación alternativa es que se trate

de los límites de zonas de escombro, como los mostrados en la Figura 3b.

En cambio el perfil perpendicular al arroyo (Figura 7b) es un depósito de piamonte que fue emparejado, cuya pendiente es de aproximadamente 7%. En este sitio la intensidad de la señal se pierde a profundidad por lo que el procesamiento fue difícil y la interpretación aporta poca información de la estructura del subsuelo. A pesar de estas limitantes, las

hipérbolas pequeñas de este sitio se interpretan como fragmentos de roca del piamonte. La profundidad a la que se encuentran varía de 3 a 7 m. Los lineamientos que se interpretaron probablemente son fracturas en los sedimentos, o sitios en donde la poca penetración de la señal y las irregularidades del terreno confluyen para producir un rasgo lineal que no necesariamente es real.

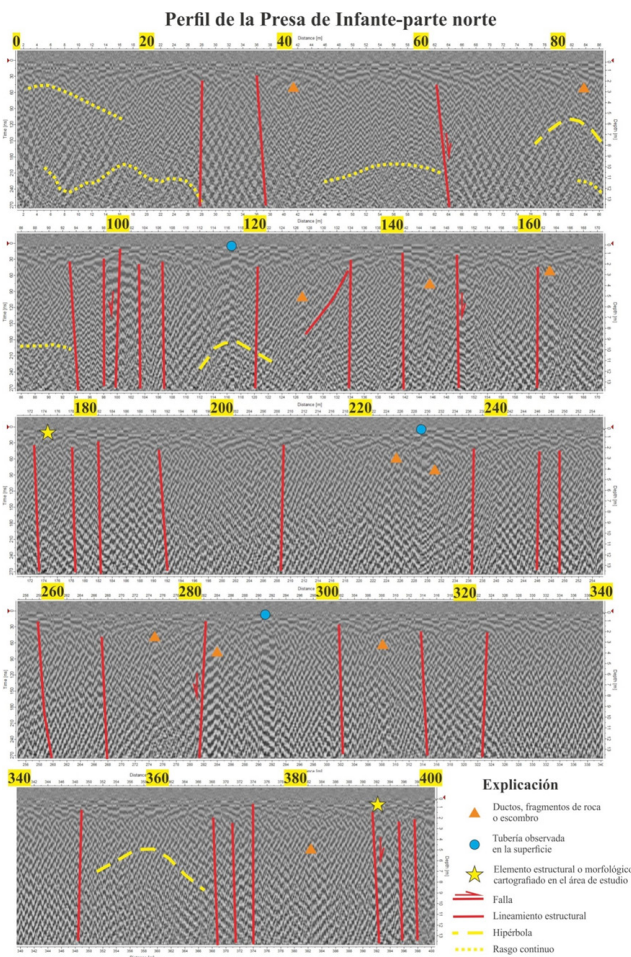


Figura 6a

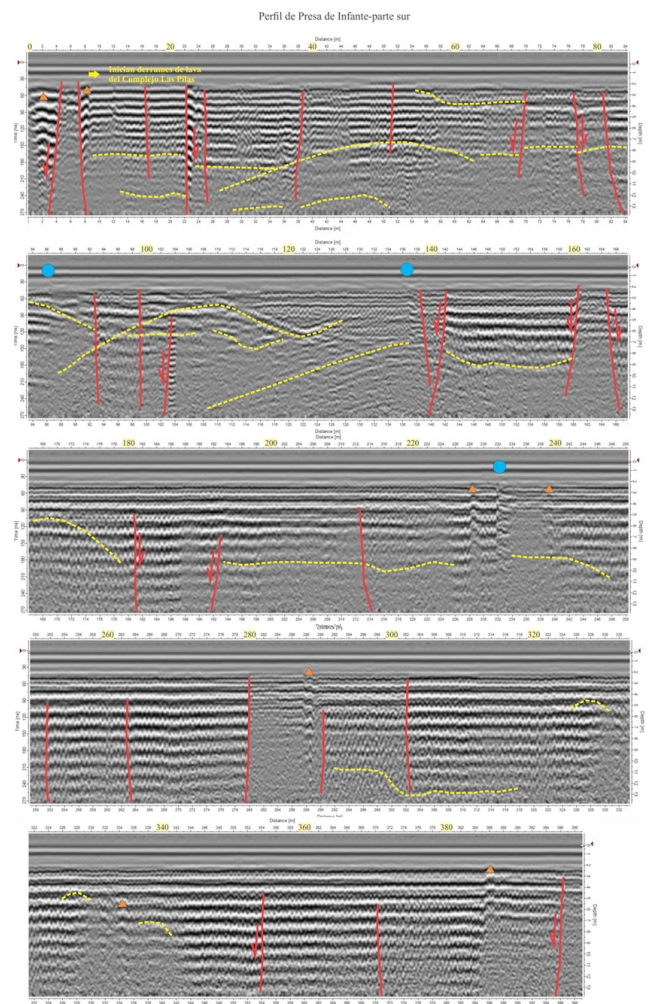


Figura 6b

Figura 6. Radargramas interpretados en Presa de Infante. La explicación es la misma que en la Figura 4. La estrella amarilla indica los rasgos superficiales que se observan en los radargramas.

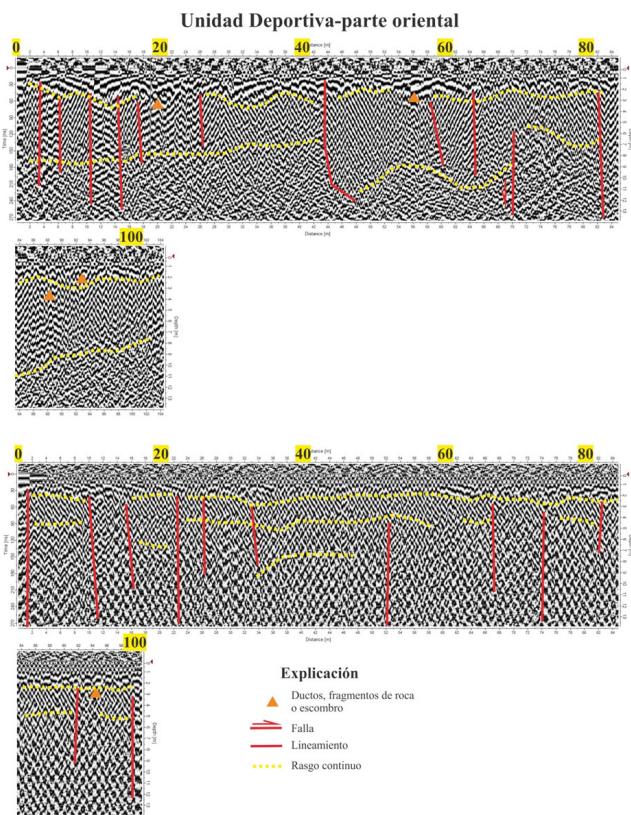


Figura 7a

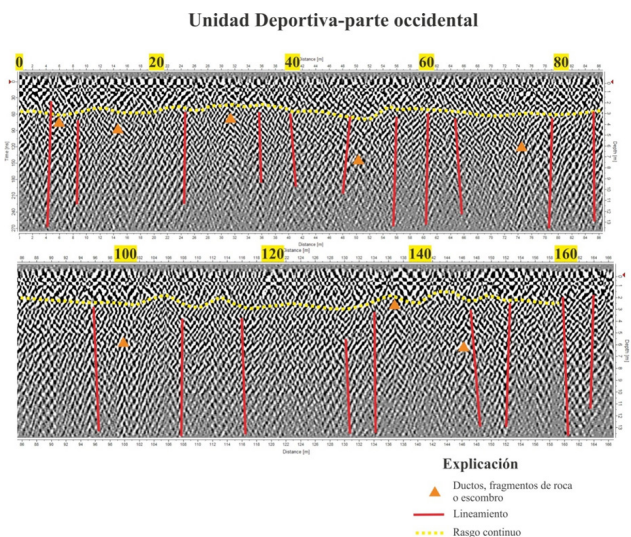


Figura 7b

Figura 7. Radargramas interpretados en la Unidad Deportiva Sur. La explicación es la misma que en la Figura 4. En esta figura el radargrama se muestra en dos partes debido a que por dificultades técnicas el georadar se tuvo que suspender y reiniciar en el mismo sitio.

Discusión

Los resultados mostrados en este trabajo son de cuatro sitios hacia donde las ciudades de Zacatecas y Guadalupe están creciendo. De ahí la importancia de este estudio. Los perfiles de georadar fueron tomados a finales de mayo y en junio de 2012. En estos meses la precipitación máxima en el estado de Zacatecas fueron de 9.1 y 38.1 mm, respectivamente (CONAGUA, 2012). La escasa precipitación permitió que el suelo estuviera seco, de esta manera la humedad tuvo poca influencia en las propiedades eléctricas del subsuelo, por lo que se pudieron realizar los perfiles.

Los filtros utilizados en el procesamiento de los radargramas permitieron interpretar la estructura del subsuelo (figuras 4 a 7). Este procesamiento ha sido utilizado en otros sitios para determinar el fracturamiento y su relación con la litología (Bano et al., 2000; Knight, 2001; Cerca et al., 2010). En este estudio no se realizó un procesamiento más complejo (e.g. deconvolución, migración) debido a que no se cuenta con otro tipo de equipos geofísicos para correlacionar los resultados.

En los radargramas no fue posible diferenciar las unidades litológicas del área de estudio. Solamente se interpretaron los rasgos que pueden estar asociados con la estructura, como son tubos de lava, pliegues, contactos entre derrames o contactos litológicos. En el caso de las fallas del mapa geológico (Figura 2), estas están mejor definidas en los radargramas porque no solamente se observan las estructuras cartografiadas sino también las fallas sintéticas o fracturas adyacentes, esto es, la estructura principal tiene una zona de influencia que se extiende por aproximadamente 20 m. Además de las fallas cartografiadas también se interpretaron estructuras que no se observaron en superficie, posiblemente por la modificación de las condiciones naturales del suelo en donde se realizaron los perfiles. Estas estructuras pueden

estar solas o en grupos de hasta 4 en distancias cortas (~ 20 m).

Los rasgos continuos interpretados son lineamientos subverticales y subhorizontales. En el caso de los primeros están en zonas de relleno por lo que posiblemente son el contacto entre el escombros utilizado para el relleno. En cuanto a los subhorizontales es probable que sean el contacto entre facies sedimentarias, parte de los cauces rellenos. En donde hay rocas es probable que se trate de cambios de facies de la Formación Zacatecas o bien el contacto entre diferentes derrames de lava.

En verano de 2014 se visitaron los sitios en los que se realizaron los perfiles y se encontró que en dos no ha habido cambios (figuras 8a y d) y en los otros dos hay calles pavimentadas y banquetas

(figuras 8b y c). En las calles y banquetas se buscaron elementos que pudieran tener respuesta en los radargramas (e.g., fracturas, hundimientos, socavación). Sin embargo, como en el proceso de desarrollo urbano solamente se han proporcionado los servicios de infraestructura básica como son las calles, guarniciones de las banquetas, agua, drenaje y luz, los efectos de la estructura del subsuelo en estos sitios son incipientes (Figura 9). En Colinas del Padre hay un fraccionamiento pavimentado y con banquetas, y se han empezado a construir un par de casas. Aquí se encontraron algunos elementos en superficie, como fracturas en el pavimento (Figura 9a), hundimientos leves y señales de socavación. Cerca de la presa de Infante (Figura 3c) está en proceso de construcción un parque ecológico. Al parecer el parque solamente tendrá una barda perimetral de piedra (Figura 8c), aunque el arroyo que está paralelo a la carretera está en proceso de ser rellenado y ha sido objeto de reparaciones (Figura 9b).

Los resultados presentados en este trabajo muestran la complejidad en la estructura del suelo y subsuelo en los primeros 14 m de profundidad. A pesar de que los rasgos litológicos y estructurales aquí presentados aún no han afectado de forma significativa las escasas obras de infraestructura, es necesario considerarlas en la planeación de lo que se construirá sobre ellos. Esto es, debe tomarse en cuenta la variable geológico-estructural en la planeación del desarrollo urbano. Los documentos oficiales en los que se definen las políticas de crecimiento de las ciudades no consideran las variables antes mencionadas. En los programas oficiales de desarrollo urbano y ordenamiento territorial solamente se menciona el aprovechamiento sustentable del territorio, la regularización de los asentamientos humanos irregulares e inhibir el crecimiento en pendientes mayores a 30°.

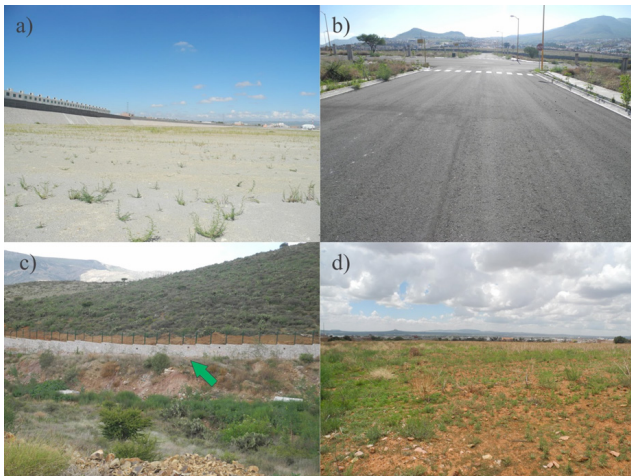


Figura 8. Condiciones actuales de los sitios en donde se realizaron los perfiles con el georadar: a) En Plaza Universidad las condiciones no han cambiado desde 2012 en que se realizaron los perfiles; b) En Colinas del Padre las calles están pavimentadas y hay servicios de luz, agua y drenaje, aunque aún no hay casas; c) En Presa de Infante la flecha verde indica en donde está la carretera pavimentada y la barda recién construida; y d) En la unidad Deportiva Sur el terreno está abandonado

A los resultados aquí mostrados es necesario integrarles la información geológica, estructural y geomorfológica para que haya un mejor criterio en el uso y aprovechamiento del territorio. Es necesario que haya un mapa de riesgos publicado que sirva de documento de consulta para tomar las mejores decisiones en la planeación del desarrollo urbano.

Conclusiones

El procedimiento utilizado para el procesamiento de los radargramas permitió identificar las estructuras, no solamente las observadas en el campo sino también las que están cubiertas. Las estructuras del mapa geológico coinciden con las interpretadas en los radargramas; además, se interpretaron nuevas estructuras. Las fallas principales tienen adyacentes a ellas fracturas.

Las fallas, aunque no están activas, son zonas de debilidad que pueden afectar a las construcciones que sobre ellas se hagan. Para mitigar este efecto se sugiere realizar un estudio de mecánica de rocas y de suelos que proporcionen certeza en la capacidad de carga de las rocas o suelos. Aunado a esto, es importante conocer los efectos de la erosión por la modificación del paisaje y el cambio de uso del suelo.

El contraste entre las unidades litológicas no es claro; sin embargo, el control estructural es el que principalmente debe de tomarse en cuenta para la construcción de obras civiles y de infraestructura.

Agradecimientos

Este estudio forma parte del proyecto “Análisis multivariado de los efectos de la erosión en la zona urbana de Zacatecas y Guadalupe” de Felipe Escalona, con registro UAZ-2014-36597. Los autores agradecen a Adriana Arteaga-Trejo por su apoyo en la realización de los perfiles y el procesamiento preliminar de los radargramas. En este trabajo también se contó con la colaboración de Carlos Carrillo-Castillo, Diana García-Robles y Paola del Río-Varela. Gali Beltrán agradece a la Universidad de Ciencia y Tecnología Rey Abdullah (KAUST) por la beca para realizar una estancia de verano en la Unidad Académica de Ciencias de la Tierra de la Universidad Autónoma de Zacatecas. Los autores agradecen especialmente al Dr. Carlos Ortiz, de Bosque de las Cumbres

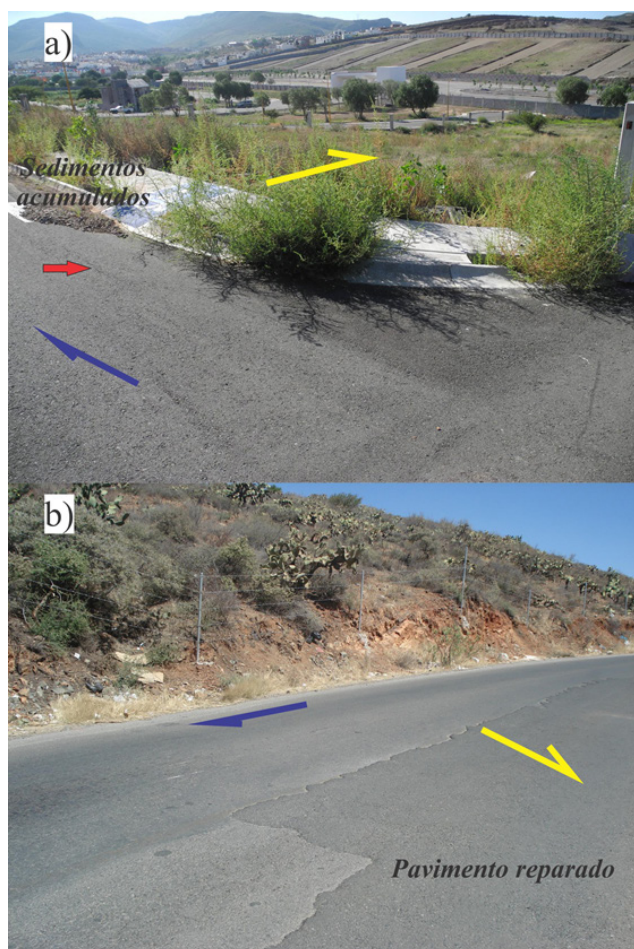


Figura 9. Elementos observados en los sitios donde han cambiado las condiciones de los sitios de los perfiles. La flecha azul indica la dirección y sentido donde se obtuvieron los perfiles y la flecha amarilla indica la dirección de la pendiente. a) En Colinas del Padre se observa un fracturamiento incipiente en el pavimento (flecha roja) perpendicular a la dirección de la pendiente, además de que hay acumulación de sedimentos transportados por las lluvias; b) en la presa de Infante la reparación de la carretera es perpendicular a la pendiente (foto tomada a finales de 2013).

(Colinas del Padre) la autorización para publicar los perfiles de su predio. El contenido de este trabajo fue mejorado gracias a los comentarios y sugerencias de un revisor anónimo.

Referencias

- Aranda-Gómez, J.J., Henry, C.D. y Luhr, J. F., 2000, Evolución tectonomagmática post-paleocénica de la Sierra Madre Occidental y la porción meridional de la provincia tectónica de Cuencas y Sierras, México, Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, V. LIII, p. 59-71
- Ayuntamiento de Guadalupe, 2013, Plan Municipal de Desarrollo 2014-2016, 50 pp.
- Ayuntamiento de Zacatecas, 2013, Plan Municipal de Desarrollo Zacatecas 2013-2016, 87 pp.
- Bano, M., Marquis, G., Nivière, B., Maurin, J.C. y Cushing, M., 2000, Investigating alluvial and tectonic features with ground-penetrating radar and analyzing diffractions patterns, Journal of Applied Geophysics, v. 43, p. 33-41.
- Cerca, M., Carreón-Freyre, D.C. y Gutiérrez, R., 2010, Instability of the urbanized flank of El Peñón del Marques volcanic edifice and its relation to land subsidence in Mexico City, Proceedings of EISOLS, 2010, Querétaro, México, 17-22 de Octubre de 2010, IAHS Publication 339, p. 219-223.
- CONAGUA, 2012, Precipitación a nivel nacional y por entidad federativa, 1 pp.
- Edwards, J.D., 1954. Studies of some Early Tertiary red conglomerates of central Mexico. United States Geological Survey, Professional Paper 264, p. 153-186
- Enciso-de la Vega, S., 1994, Crecimiento urbano de la ciudad de Zacatecas y sus asentamientos humanos en zonas mineralizadas polimetálicas, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v.11 (1), p. 106-112.
- Escalona-Alcázar, F.J., Suárez-Plascencia, C., Pérez-Román, A.M., Ortiz-Acevedo, O. y Bañuelos-Álvarez, C., 2003, La secuencia volcánica Terciaria del cerro La Virgen y los procesos geomorfológicos que generan riesgo en la zona conurbada Zacatecas-Guadalupe, GEOS, v. 23(1), p. 2-16.
- Escalona-Alcázar, F.J., Delgado-Argote, L.A., Weber, B., Núñez-Peña, E.P., Valencia, V. y Ortiz-Acevedo, O., 2009, Kinematics and U-Pb dating of detrital zircons from the Sierra de Zacatecas, Mexico, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 26(1), p. 48-64.
- Escalona-Alcázar, F.J., Delgado-Argote, L.A., Nebel, O., Velasco-Tapia, F., Weber, B., Núñez-Peña, E.P., 2014a, Maturing arc signatures monitored by trace element and Hf isotope systematics in the Early Cretaceous Zacatecas Volcanic Field, The Journal of Geology, v. 122(5), p. 549-566.
- Escalona-Alcázar, F.J., Solari, L., García y Barragán, J.C., Carrillo-Castillo, C., Núñez-Peña, E.P., Bluhm-Gutiérrez, J., y Esparza-Martínez, A., 2014b, The latest Cretaceous-Early Oligocene Zacatecas Conglomerate, Mexico: Sedimentology, Detrital Zircons U-Pb Age and Sandstone Provenance, Sometido a International Geology Review.
- Knight, R., 2001, Ground Penetrating Radar for environmental applications, Annual Review of Earth and Planetary Sciences, v. 29, p. 229-255.
- Loza-Aguirre, I., Nieto-Samaniego, A.F., Alaniz-Álvarez, S.A. e Iriondo, A., 2008, Relaciones estratigráfico-estructurales en la intersección del sistema de fallas San Luis-Tepehuanes y el graben de Aguascalientes, México central, Revista Mexicana de Ciencias Geológicas, v. 25(3), p. 533-548.
- Nieto-Samaniego, A.F., Alaniz-Álvarez, S.A. y Camprubí í Cano, A., 2005, La Mesa Central de México: estratigrafía, estructura y evolución tectónica cenozoica. Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana, v. LVII(3), p. 285-318.

- Ponce, B.F. y Clark, K.F., 1988, The Zacatecas mining district: A tertiary caldera complex associated with precious and base metal mineralization, *Economic Geology*, v. 83, p. 1668-1682.
- SECOP, 2004, Programa de desarrollo urbano de la conurbación Zacatecas-Guadalupe 2004-2030, 273 pp.
- SECOP, 2010, Programa subregional de ordenamiento territorial Zacatecas, 178 pp.
- SEDESOL, 2008, Atlas de riesgo de la ciudad de Zacatecas, 119 pp.
- Tristán-González, M., Torres-Hernández, J.R., Labarthe-Hernández, G., Aguillón-Robles, A., e Yza-Guzmán, R., 2012, Control estructural para el emplazamiento de vetas y domos félsicos en el distrito minero de Zacatecas, México, *Boletín de la Sociedad Geológica Mexicana*, v. 64(3), p. 353-367.

Recibido: 1 de octubre de 2014

Recibido corregido por el autor: 16 de diciembre de 2014

Aceptación: 15 de enero de 2015