

USO DEL GEORADAR COMO HERRAMIENTA PARA LA EVALUACIÓN DE AMENAZA SÍSMICA: CASO EL ZUMBADOR, VENEZUELA

JÉLIME ARAY^{1*}, FRANCK AUDEMARD², LUZ MARÍA RODRÍGUEZ², MICHAEL SCHMITZ¹, JESÚS ÁVILA¹

¹ Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS). Departamento de Geofísica. e-mail: jelimearay@gmail.com, mschmitz@funvisis.gob.ve, jesavila@gmail.com

² Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS). Departamento de Ciencias de la Tierra. e-mail: faudemard@funvisis.gob.ve, lrodriguez@funvisis.gob.ve

RESUMEN

En este trabajo se presentan los resultados obtenidos para perfiles de georadar (GPR) adquiridos sobre la falla de Boconó en la zona de El Zumbador (Estado Táchira, Venezuela), con la finalidad de mostrar la utilidad de esta herramienta geofísica en los estudios de amenaza sísmica. Cuatro perfiles fueron dispuestos sobre un escarpe generado por la traza de falla en el sector, para caracterizar la naturaleza y geometría de la discontinuidad inferida. La localización de planos de falla interpretados en los distintos radargramas se corresponde con la ubicación inferida de los principales accidentes tectónicos que afectan la zona y que han sido interpretados por fotografías aéreas y observaciones de campo anteriormente. Los resultados de georadar, para la zona de El Zumbador, facilitó la mejor ubicación de una trinchera de excavación paleosísmica y la planificación de potenciales excavaciones sobre fallas secundarias en la misma zona. Estos estudios demostraron la potencialidad del georadar para corroborar las formas de relieve de actividad tectónica que se han mapeado como fallas Cuaternarias en otras regiones y estas nuevas observaciones sugieren actividad reciente de la falla de Boconó en la zona de estudio. Nuestros resultados podrían ser aplicados para definir sitios ideales para excavaciones paleosísmicas en regiones de difícil reconocimiento de morfologías tectónicas, para condiciones tropicales como en Venezuela.

Palabras Clave: GPR, Georadar, Radargrama, Fallas activas, Amenaza sísmica, Sistema de fallas de Boconó, zona de falla.

GPR AS A TOOL FOR SEISMIC HAZARD ASSESSMENT: CASE EL ZUMBADOR, VENEZUELA

ABSTRACT

Results from GPR (ground-penetrating radar) profiles acquired across the Boconó active strike-slip fault, within El Zumbador (Táchira State, Venezuela) are presented in this paper to show the utility of this geophysical tool in seismic threat studies. Four profiles were acquired on a scarp generated by the fault movement to characterize the nature and geometry of the inferred discontinuity. The location of fault planes interpreted from radargrams corresponds with the inferred location of the main tectonic accidents which affect the area and that have been interpreted previously by aerial photographs and field observations. The GPR results for the El Zumbador zone allowed proposing the best location for a paleoseismic trench, as well as, planning of additional potential trench sites. This study demonstrated the potential of the georadar as an efficient geophysical tool which could help to corroborate the landforms of tectonic activity that have been mapped or inferred as Quaternary faults in other regions. The new results of this work suggest recent activity of the Boconó fault in the study area. Such results could be applied to define ideal sites for paleoseismic excavations in regions of difficult recognition of tectonic morphologies, for tropical conditions such as in Venezuela.

Keywords: GPR, Radargram, Active faults, Seismic hazard, Boconó faults system, Fault zones.

INTRODUCCIÓN

Las regiones más pobladas de Venezuela se asientan donde se concentra la principal actividad sísmica. El peligro que significa la convivencia de la población con niveles elevados de actividad sísmica requiere, por parte del Estado, una instrumentación de políticas públicas de reducción de riesgo en materia de construcción y que tomen en cuenta la importancia de la amenaza sísmica discriminada de manera regional y local (Singer, 2012).

La Amenaza Sísmica es un término técnico mediante el cual se describe un factor que representa la ocurrencia de cierta intensidad sísmica (o aceleración del suelo) en un sitio determinado, durante un período de tiempo. Para el estudio de la amenaza sísmica se realizan aproximaciones para la determinación de parámetros de evaluación acordes con la escala del problema, desde la caracterización general y regional de las fuentes de actividad sísmica, para evaluar luego las modificaciones que sufren las ondas sísmicas con la distancia entre una determinada fuente sísmica y el sitio de interés donde impactan las mismas (Singer, 2012). Para el cálculo de la Amenaza Sísmica se deben considerar los parámetros de fuentes tectónicas, así como también los registros de eventos sísmicos ocurridos en cada zona fuente y la atenuación del movimiento del terreno. Es por ello, la importancia de caracterizar las áreas con esta potencial amenaza para generar planes de prevención que permitan reducir el riesgo asociado y proporcionar a la población herramientas para su mejor desenvolvimiento en estas áreas. Las técnicas de estudios geofísicos someros no invasivos han avanzado significativamente en las últimas décadas y juegan un papel importante en la construcción, planificación, seguridad operacional y manejo sustentable de daños. La aplicación de la ingeniería geofísica en la caracterización de sitios durante la fase de investigación de factibilidad ya es parte de la práctica estándar (Lin *et al.*, 2018).

Con la finalidad de contribuir con los estudios de amenaza sísmica en el occidente de Venezuela, es crucial contar con numerosos registros de rupturas co-sísmicas para poder analizar las zonas de fallas activas. El rasgo más resaltante en esta zona lo constituye la falla de Boconó, una estructura rumbo deslizante transcurrente dextral que se extiende por alrededor de 500 km por la columna vertebral de los Andes de Mérida (AM). Esta falla corre ligeramente oblicua al eje de la cadena AM y limita el rango costero del Caribe, al norte de Venezuela, en el oeste, extendiéndose así entre la depresión del Táchira, en la frontera entre Colombia y Venezuela, y Morón, en la costa del Caribe de Venezuela (Audemard, 2003b). Las complicaciones estructurales del sistema de fallas de Boconó permite la

ramificación de la traza principal activa en una serie de fallas secundarias en el extremo suroeste.

La paleosismología ha evolucionado en el número de aproximaciones para documentar la historia reciente de terremotos (e.g. Audemard, 1996, 1998, 1999, 2002; FUNVISIS, 1987a, 1987b), sin embargo, las técnicas están limitadas por la complejidad estructural, sedimentaria y geomorfológica del medio ambiente que restringe un registro adecuado de las capas del subsuelo por erosión y movimiento del suelo en la tierra. La práctica más común de la paleosismología ha sido mediante excavaciones (e.g., Audemard 2003a, 2005), no obstante, la ubicación adecuada de trincheras puede resultar difícil donde las fallas se encuentren selladas por sedimentos superficiales o donde la erosión impida determinar la ubicación de la falla desde su último movimiento.

En el marco del proyecto GIAME (Geociencia Integral de Los Andes de Mérida) se planificó la evaluación de zonas de fallas activas con levantamientos GPR en diferentes áreas, durante campañas de adquisición de datos de georadar realizadas en el año 2012 (Aray, 2016), entre las cuales el páramo El Zumbador resultó una de las principales zonas de interés por su contexto tectónico regional, su accesibilidad y su importancia en la caracterización de la falla de Boconó. En este contexto, el principal objetivo de este trabajo es identificar, localizar y caracterizar la geometría en subsuelo de los principales rasgos de deformación por actividad de la falla de Boconó, con el empleo de la técnica de georadar, en un área rural (finca El Palmar) al sur de la población de El Cobre, en el páramo El Zumbador, estado Táchira- Venezuela, y de esta manera identificar el lugar más idóneo para la excavación de una trinchera paleosísmica (Rodríguez *et al.*, 2015). La ubicación de la zona de estudio se muestra en la Figura 1.

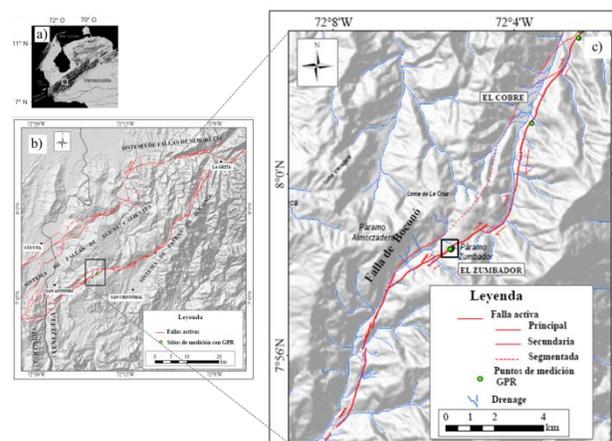


Figura 1. Localización del área de estudio al suroeste de

los Andes de Mérida, Venezuela. a) Venezuela occidental mostrando la falla de Boconó que atraviesa los Andes venezolanos, y la zona central de la cordillera considerada para el presente estudio (Modificado de Audemard *et al.*, 2006). b) Ubicación relativa del sitio de adquisición mostrando la ubicación de los poblados de El Cobre y San Cristóbal. Mapa de relieve y sombra tomado de Garrity *et al.* (2010). Fallas compiladas: FUNVISIS (1991), Rodríguez *et al.* (2017).

Perfiles de georadar de alta resolución, reflejan la imagen en profundidad de la estructura de la falla de Boconó en la zona de estudio. La principal deformación observada en los radargramas, pudo ser asociada con la deformación ejercida por la traza de activa de la falla de Boconó expuesta en la pared de la trinchera descrita por Rodríguez *et al.* (2015).

METODOLOGÍA

El georadar (GPR) es un método geofísico no destructivo y no invasivo basado en la propagación, reflexión y dispersión de ondas electromagnéticas de altas frecuencias (desde 10 a 1000 MHz) que se utiliza con la finalidad de generar imágenes transversales del subsuelo somero, que pueden alcanzar entre 0 y 50 m de profundidad dependiendo de la frecuencia empleada (Daniels *et al.*, 1998; Davis & Annan, 1989). La imagen resultante, llamada radargrama, es muy similar, en visualización, a un perfil de sísmica de reflexión. La técnica esta basada en las medidas en subsuelo de los ecos de las ondas electromagnéticas de altas frecuencias (EM, típicamente de 16 MHz a 1000 GHz). Una antena transmisora sobre el terreno emite ondas EM en distintos pulsos (fuente) que se propagan a través del terreno y se reflejan o difractan en las interfaces donde la permitividad dieléctrica cambia. Para una descripción más completa acerca de la teoría y los pasos básicos para la adquisición con georadar se sugiere consultar los trabajos de Davis & Annan (1989), Jol & Bristow (2003), Neal (2004), entre otros.

Los levantamientos GPR son ampliamente usados por hidrogeólogos, geotecnistas, ambientalistas y arqueólogos (e.g., Mas *et al.*, 2018), así como, en propósitos forenses y aplicaciones geológicas incluyendo la imagen de estructuras sedimentarias en el subsuelo somero (e. g. Jol & Bistrow, 2003; Ollarves *et al.*, 2004; Audemard *et al.*, 2006; Kaufmann *et al.*, 2018). El uso del georadar permitiría la identificación de una variedad de rasgos geológicos producidos en zonas de fallas, dependiendo de la frecuencia y orientación de la antena, la heterogeneidad del material con fallas y la caída y la longitud de la zona de ruptura (Beres *et al.*,

1999; Lehmann & Green, 2000). Para una adecuada adquisición de datos de georadar se deben seguir unos pasos básicos los cuales se enumeran a continuación: 1) recopilar información referente a las condiciones del subsuelo del área de estudio, 2) definir el objetivo que se desea caracterizar y su profundidad estimada, 3) seleccionar la o las frecuencias de operación de las antenas de georadar que sean más adecuadas para alcanzar la profundidad y resolución deseada de acuerdo al objetivo planteado, 4) disponer perfiles lo más transversal posible al objetivo de interés (en caso de elementos lineales) o diseñar un mallado de adquisición que permita la cobertura de un área a detalle para poder realizar correlaciones de perfiles en diferentes direcciones y generar una visualización de un cuerpo en profundidad con resolución y alcance adecuado.

Para la adquisición de datos del presente trabajo fue empleado un sistema GPR de la marca IDS (*Ingegneria Dei Sistemi*, Italy). Para los datos presentados, la frecuencia media de las antenas fue de 80 y 200 MHz. Durante los levantamientos de datos, la información fue visualizada en tiempo real con el uso de una computadora portátil de campo, realizando así un control de calidad de los mismos durante su adquisición.

Los perfiles de adquisición se dispusieron de forma perpendicular a la traza inferida de la falla objetivo y se ubicaron donde el impacto de las irregularidades del terreno fueran mínimas. La ubicación de los perfiles se muestra en la figura 2. La nomenclatura empleada para cada registro GPR corresponde con la orientación (T para transversal de acuerdo a una convención particular), seguido del número de perfil que corresponda en secuencia y finalmente la frecuencia de operación de la antena GPR empleada.

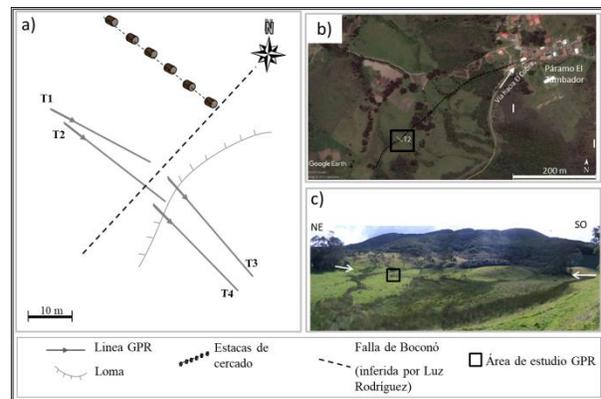


Figura 2. Disposición de perfiles de medición GPR en El Zumbador (estado Táchira, Venezuela). a) Esquema de adquisición de datos, b) vista en plano de la zona de

estudio indicando la ubicación del perfil T2 como referencia y el recuadro en negro donde se ubicaron los perfiles que se disponen como el esquema, c) vista oblicua de la zona de estudio indicando la orientación de la falla (flechas en blanco).

Los datos crudos de GPR fueron procesados usando el software Reflex2DQuick v2.0 desarrollado por Sandmeier (2016). La secuencia de procesamiento empleada para cada registro fue la siguiente: *move start time* (i. e. corrección de tiempo cero) para recorrer el tiempo de inicio por desplazamiento del tiempo cero en la mayoría de las líneas, *background removal* (obtenido a partir de la sustracción de una traza promediada la cual se construyó a partir del rango completo de tiempo del registro), filtro pasa banda vertical (considerando las frecuencias características de cada registro) y función de ganancia lineal (igual a 1) a las características de las trazas aplicado desde el tiempo de inicio igual a 0. La escogencia de los parámetros de procesamiento para cada registro se realizó tomando en cuenta el espectro de frecuencias de cada señal para determinar el rango de valores (variables de acuerdo a cada registro a procesar) apropiados para la aplicación de los filtros en el software, de forma de mejorar la visualización de las anomalías en los radargramas a interpretar. La conversión del eje de tiempo (tiempo doble en ns) a profundidad, en los radargramas presentados, se realizó empleando constantes de velocidad de propagación entre 0.10 y 0.15 m/ns, las cuales corresponden con valores de velocidad de suelos arcillosos y arenosos considerando los promedios sugeridos por Annan (1992).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El área de estudio consistió en una zona sin intervención humana, con una pequeña loma en una zona de grama y algunos pastizales como se muestra en la imagen de la figura 2. La variación topográfica más relevante lo constituye el desnivel generado por actividad de la falla de Boconó en forma de escarpe de falla en este sector, en dirección noreste-suroeste como se muestra en la figura 2.

En la figura 3 se muestra el registro obtenido para el perfil T2 con las antenas de 80 MHz (T2_80) en el cual se identificaron terminaciones en los reflectores de la capa más somera, alrededor de 20 m de distancia a lo largo del perfil, que se inclinan en forma más pronunciada en el centro del depocentro, en una disposición de traslapo inferior (*downlap*) contra los

estratos de la secuencia subyacente que presenta inclinación aparente más suave. Estas terminaciones permitieron definir el límite de secuencia indicado por la línea gris continua que se muestra a 1 metro de profundidad. La secuencia superior, limitada en la base por este horizonte, se caracteriza por presentar reflectores sub-horizontales continuos (líneas segmentadas) a lo largo del perfil. Esta capa descansa en discordancia erosiva sobre una secuencia con numerosas discontinuidades laterales y truncamientos al tope. El carácter de los reflectores de cada secuencia descrita está relacionado con el contenido geológico de cada una de ellas, de esta forma, la secuencia superior se relaciona con sedimentos finos posiblemente de laguna y las secuencias inferiores con sedimentos más gruesos posiblemente de material coluvial como el observado en superficie.

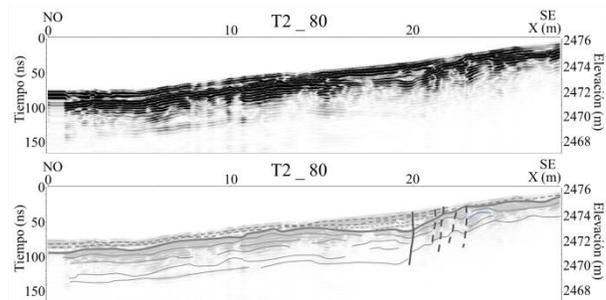


Figura 3. Registros GPR obtenido con antenas de 80 MHz sobre el perfil T2, ubicado transversal al escarpe de la falla de Boconó en la zona de estudio. Superior: sección sin interpretar. Inferior: sección interpretada. La línea sólida en color negro representa la falla principal y las líneas segmentadas representan los planos de debilidad o fallas secundarias.

En el registro se identificaron una serie de discontinuidades verticales (líneas segmentadas en negro) que cruzan los reflectores subverticalmente, visible hasta el alcance máximo en profundidad del registro (5 m aprox.). Estas discontinuidades permitieron interpretar una serie de fallas que de acuerdo a lo observado en el registro, muestran la zona de deformación principal a una distancia alrededor de 20 m a lo largo del perfil, donde se identificó una depresión que profundiza hasta alcanzar alrededor de 1.5 m.

En la figura 4a se muestra el radargrama interpretado del perfil T1 adquirido con antenas de 200 MHz (T1_200). En este registro se pudo observar un número de discontinuidades en los reflectores (líneas subverticales en negro), entre 18 y 23 m de distancia a lo largo del perfil, las cuales fueron asociados con fallas que cortan las secuencias sedimentarias hasta profundidades alrededor de 3 m. Se interpretan dos secuencias

principales de depositación, continuas a lo largo del perfil, que se delimitan por los horizontes continuos en gris. La secuencia superior que alcanza alrededor de 0.5 m de profundidad presenta reflectores ligeramente deformados los cuales se correlacionan con suelo

orgánico. La secuencia intermedia, la cual profundiza hasta alrededor de 2 m, muestra una depresión, entre los 15 y 20 m de distancia a lo largo del perfil, la cual se asocia con una zona de deformación frágil de las secuencias.

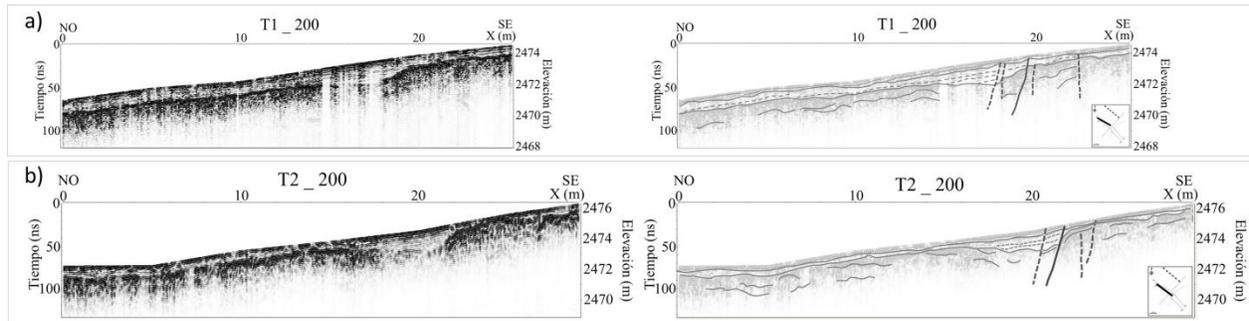


Figura 4. Registros GPR obtenidos con antenas de 200 MHz sobre los perfiles T1 (a) y T2 (b) ubicados transversales al escarpe de la falla de Boconó en la zona de estudio. Izquierda: sección sin interpretar. Derecha: sección interpretada. La línea sólida en color negro representa la falla principal y las líneas segmentadas representan los planos de debilidad o fallas secundarias.

El perfil T2 adquirido con las antenas de 200 MHz (T2_200) se muestra en la figura 4b. En este registro se interpretó una importante deformación a aproximadamente 20 m de distancia a lo largo del perfil, la cual alcanza 1.5 m de profundidad. La secuencia superior limitada en la base por el horizonte de línea sólida en gris, muestra reflectores subhorizontales poco deformados lo largo del perfil. Esta interpretación muestra un rasgo similar al descrito para el perfil T1_200 (Figura 4a), siendo ambos perfiles paralelos entre si, lo que corrobora la presencia de una zona de deformación que tiene extensión lateral. Las deformaciones observadas para el perfil T2_200 (Figura 4b), alrededor de 20 m de distancia sobre el perfil, se interpretan como fallas que cortan los reflectores subverticalmente hasta profundidades de alrededor de 4 m (máximo alcance del registro con esta frecuencia de antenas GPR). La interpretación de los dos perfiles T1 y T2, sugiere que el plano de falla principal corresponde, dentro de unos pocos metros, a su ubicación inferida en superficie.

El resultado obtenido con antenas de 80 MHz para el perfil T2 (Figura 3) permitió identificar la continuidad en profundidad de rasgos de deformación asociados a la actividad de la falla principal. Para el mismo perfil T2, con las antenas de 200 MHz (Figura 4b) se pudo observar que el registro presenta mayor resolución que el obtenido con antenas de 80 MHz y muestra una zona

de deformación apreciable desde pocos metros de profundidad. El empleo de diferentes frecuencias de operación de las antenas de GPR permite obtener diferentes niveles de resolución de la señal para un mismo registro, pudiendo identificar rasgos de interés a diferentes escalas, desde capas someras a capas más profundas, con antenas de mayor o menor frecuencia, respectivamente.

Para esta zona, el GPR resultó de utilidad para definir la mejor ubicación de la trinchera paleosísmica El Zumbador (Rodríguez *et al.*, 2015, 2017) y contribuyó a delimitar la zona de interés donde se ubicaba la principal zona de deformación en el subsuelo. En la figura 5 se muestra una comparación entre el radargrama obtenido sobre el perfil T2 (perfil ubicado sobre la excavación) y la interpretación de la pared sur de la trinchera paleosísmica. El suelo encontrado en la trinchera se correlaciona con la secuencia de reflectores más someros identificada en el radargrama (entre 0 y 0.5 m de profundidad). La capa intermedia (de 0.5 a 2 m de profundidad), identificada en el radargrama (Figura 5b) se correlacionó con los sedimentos lacustrinos descritos en la pared de la trinchera (ver figura 5a), ligeramente buzando en dirección noroeste (NO). La capa más profunda, de comportamiento caótico y discontinuo en el radargrama (a partir de 2 m de profundidad), se asoció con la respuesta de los flujos de detritos identificados en superficie y durante la apertura de la trinchera. La

principal deformación observada alrededor de 20 m de distancia a lo largo del perfil T2_200 (ver figuras 4b y 5b) pudo ser asociada con la deformación ejercida por la

traza de activa de la falla de Boconó sobre los sedimentos cuaternarios, expuesta en la pared de la trinchera descrita por Rodríguez *et al.* (2015).

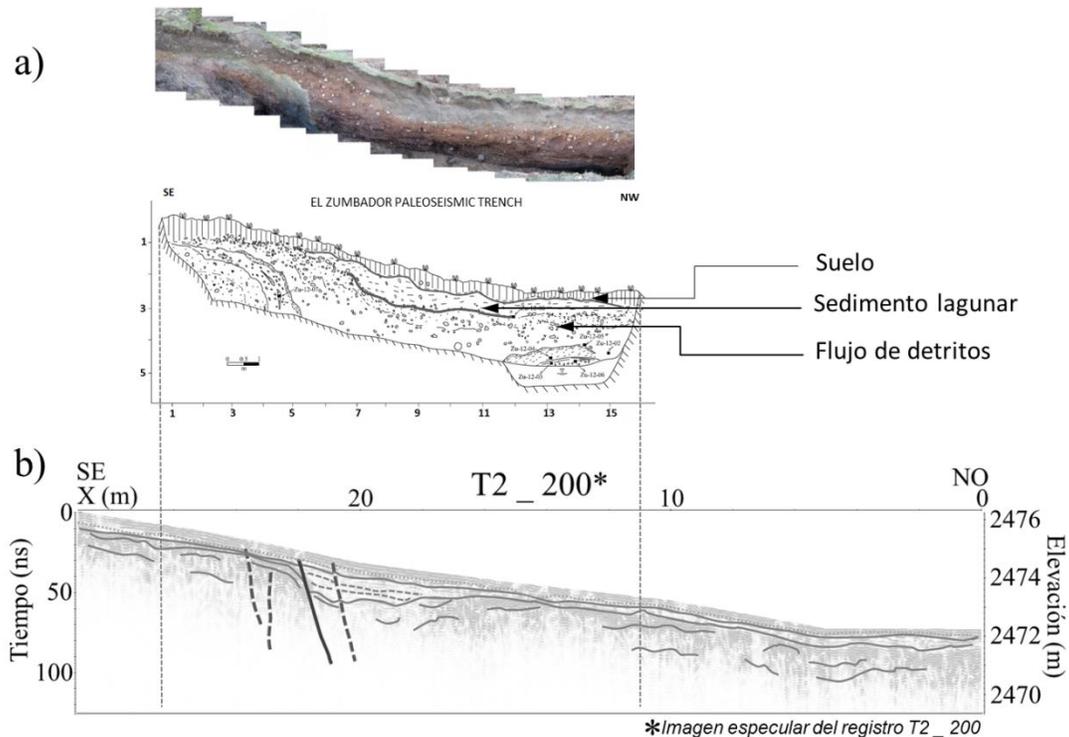


Figura 5. Correlación escalada de la pared sur de la trinchera paleosísmica y el radargrama obtenido con la antenna de 200 MHz sobre el perfil T2 en El Zumbador. **a)** Foto mosaico y sección interpretada (*log*) de la pared sur de la trinchera El Zumbador (Modificado de Rodríguez *et al.*, 2015). **b)** Imagen en espejo (girada en horizontal para orientación similar con la pared de la trinchera) del radargrama interpretado del perfil T2_200.

En el registro obtenido para el perfil T3 con antenas de 200 MHz (Figura 6a) fue posible identificar una zona de deformación alrededor de 15 m de distancia a lo largo del perfil, descrita con una serie de líneas segmentadas en negro que cruzan subverticalmente los reflectores. Esta deformación estuvo caracterizada por una

depresión entre 1 a 3 m de profundidad, cuya respuesta en los reflectores es similar a la observada en el perfil T2_200 (Figura 6b) ubicado más hacia el oeste. Este comportamiento particular se asoció a la actividad de otra posible traza de falla localizada hacia el sur de la traza principal.

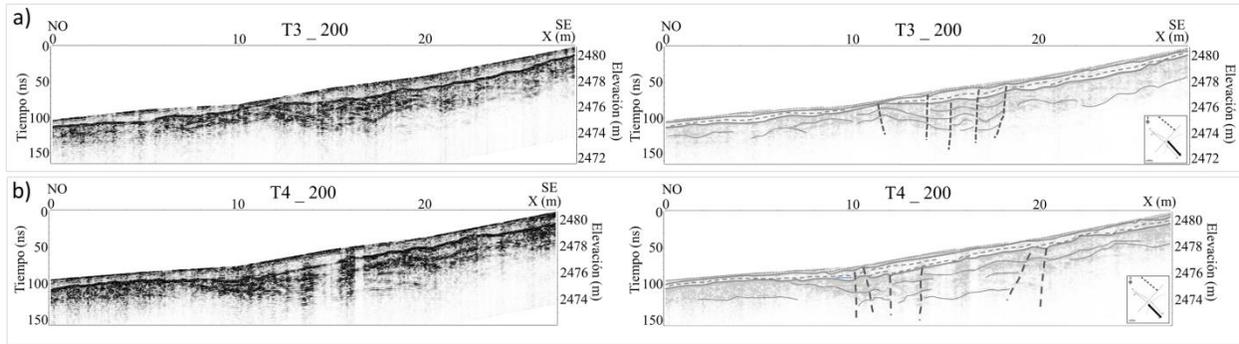


Figura 6. Registros GPR obtenidos con antenas de 200 MHz sobre los perfiles T3 (a) y T4 (b) ubicados al sur del escarpe de la traza principal de la falla de Boconó en El Zumbador. Izquierda: sección sin interpretar. Derecha: sección interpretada. Las líneas segmentadas en color negro son las fallas interpretadas.

En el registro T4_200 obtenido para el perfil T4 con antenas de 200 MHz (Figura 6b) se identificaron tres secuencias de reflectores con diferentes comportamientos. La secuencia más profunda (bajo un metro de profundidad) muestra un carácter caótico y una zona de deformación más marcada que las capas suprayacentes. La secuencia intermedia (entre 0.4 y 1 m de profundidad), identificada con líneas grises segmentadas subhorizontales, muestra atenuación de la señal y parece corresponder con el relleno del canal aluvial. La secuencia más somera (primeros 40 cm de profundidad) presenta reflectores lineales y continuos a lo largo del perfil y se asoció con posibles capas de material suelto de naturaleza orgánica. En este registro de T4_200 (Figura 6b) se interpretaron una serie de fallas (líneas segmentadas en negro) cortando subverticalmente las secuencias sedimentarias, entre 10 y 20 m de distancia a lo largo del perfil, hasta alcanzar profundidades de alrededor de 4 m.

Realizando la comparación de los resultados obtenidos con antenas de 80 MHz y aquellos con antenas de 200 MHz es posible indicar que las antenas de 200 MHz permiten identificar con mejor resolución capas de delgados espesores que con las antenas de 80 MHz no son posibles resolver. Sin embargo, las deformaciones a grandes rasgos resultaron visibles para los registros obtenidos con ambas antenas blindadas.

Los resultados GPR obtenidos para la zona de El Zumbador permitieron corroborar la localización de la traza de falla activa identificada previamente por evidencias geomorfológicas. En esta zona, la deformación en subsuelo se pudo observar hasta al menos 2 m de profundidad con buena resolución, justo bajo la localización estimada de la traza activa de la falla de Boconó.

Basado en la geometría y terminación de los reflectores identificados en los registros T3_200 y T4_200 (Figura 6) los rasgos deformacionales identificados resultaron similares a aquellos observados bajo la traza principal de falla activa localizada más hacia el norte de estos perfiles, bajo los perfiles T1 y T2 (Figura 4). En este sentido, las observaciones sugieren la presencia de una segunda traza de falla hacia el sur de la traza principal (línea segmentada en negro en la figura 2), de acuerdo con el análisis geomorfológico que indica estructuras que generan lomos de presión y depresiones en el terreno.

Es importante señalar que el GPR, como cualquier técnica geofísica, presenta ventajas y limitaciones que deben considerarse. Para los primeros metros de profundidad, un terreno con poca intervención antrópica, como este caso de El Zumbador, es ideal para el empleo de esta técnica. Esto permite que la onda electromagnética penetre a mayores profundidades y con menor interferencia externa, permitiendo que se identifiquen con mejor resolución los cambios de impedancia. En estos casos, el empleo del georadar ofrece la ventaja de realizar la caracterización del subsuelo de manera no invasiva y permite ubicar con más precisión las zonas de interés para posteriores estudios con mayor detalle de la zona.

En zonas intervenidas, donde el material del suelo ha sido removido, la capacidad de penetración de la señal de GPR se ve comprometida. La dispersión generada por el material suelto (ej. material de remoción para labores de siembra), impide que la onda electromagnética se propague a mayores profundidades y por ende disminuye la resolución en profundidad de los registros, lo que representa una limitación para el empleo de la técnica.

La comparación entre el registro de la trinchera de excavación interpretada por Rodríguez *et al.* (2015, 2017) y los de GPR adquiridos en El Zumbador para este trabajo (Figura 5), muestra la precisión con la cual es posible identificar la estructuración interna del subsuelo a poca profundidad (2 a 4 m), con buena resolución, en ambientes aluviales, durante un periodo de clima seco. Comparando estos resultados con los de un trabajo previo realizado por Ollarves *et al.* (2004) se muestra que para diferentes condiciones (depositación más antigua, más consolidada, más competente en términos geológicos e igualmente en material seco) la resolución del georadar podría ser buena hasta alcanzar cerca de 12 m de profundidad.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en la zona de El Zumbador muestran la utilidad de la herramienta de GPR en los estudios de fallas activas con expresión somera, al menos para los primeros 4 m de profundidad. Adicionalmente, confirman la importancia de caracterizar la zona de actividad de la falla para la mejor ubicación de trincheras de excavación paleosísmica o incluso determinar zonas de posible afectación futura causada por la actividad de trazas de falla que aún no presentan evidencias de deformación visibles en superficie.

Estas nuevas observaciones aportadas por los resultados de georadar arrojaron luz sobre la actividad reciente de la falla de Boconó en la zona de estudio y demuestra su potencial como herramienta geofísica para corroborar las formas de relieve de actividad tectónica que se han mapeado como fallas Cuaternarias en otras regiones. Además, apoya en la identificación de posibles sitios de trincheras en regiones de difícil reconocimiento de morfologías tectónicas, para condiciones tropicales como el caso de Venezuela.

La principal ventaja del empleo de la técnica de GPR es que se trata de un método rápido, no destructivo, no invasivo y económico (excluyendo el costo de obtención del equipo), ya que, es posible adquirir perfiles de grandes longitudes en poco tiempo y con poco personal, lo que reduce los costos operativos y de horas hombre.

Es importante mencionar que la resolución y profundidad de penetración de la señal de GPR varía dependiendo del tipo de material y su contenido de agua. En áreas donde los materiales presentan características similares en sus propiedades electromagnéticas, la identificación de la deformación en subsuelo se dificulta, ya que, en el registro GPR se identifica una

sola capa de igual comportamiento y no se distingue entre horizontes delgados con ligeros cambios de impedancia que sean ocasionados por diferentes materiales.

AGRADECIMIENTOS

Estos estudios fueron financiados con fondos del FONACYT (Fondo Nacional de Ciencia, Tecnología e Innovación) bajo el proyecto GIAME (2012002202). Los autores estamos agradecidos con la Fundación Venezolana de Investigaciones Sismológicas (FUNVISIS) por permitir la aplicación de esta técnica para estudios paleosismológicos en Venezuela. Nuestros agradecimientos sinceros se extienden al grupo de Protección Civil de Táchira, Javier Oropeza, Victor Rocabado, Andrei Ichaso, Laura Piñero, Sirel Colón y Javier Sánchez por sus aportes considerables durante las etapas de campo, comentarios y contribución con este trabajo. Este manuscrito fue mejorado gracias a los comentarios y sugerencias de Octavio Lázaro Mancilla y un revisor anónimo.

REFERENCIAS

- ANNAN, A., 1992, *Ground Penetrating Radar Workshop Notes*. Manual de Sensor & Software Inc. Mississauga, en: Santamarina J. (2001). "Soils and Waves". Editorial: John Wiley & Sons, LTD. Pp. 301-430.
- ARAY, J., 2016, *Evaluación del subsuelo con el empleo de la técnica de GPR, en la búsqueda de evidencias de deformación por fallas activas en los estados Táchira y Mérida, Venezuela*. Trabajo especial de grado para optar al título de Magister Scientiarum en Ciencias Geológicas. Universidad Central de Venezuela. Caracas, Venezuela. Depósito Legal DC2016000027
- AUDEMARD, F. A., 1996, *Paleoseismicity studies on the Oca-Ancón fault system, northwestern Venezuela*. *Tectonophysics* 259, 67-80.
- AUDEMARD, F. A., 1998, *Contribución de la paleosismología a la sismicidad histórica: los terremotos de 1610 y de 1894 en los Andes venezolanos meridionales*. *Revista Geográfica Venezolana*, vol. 39(1-2). Universidad de Los Andes, Venezuela, pp. 87- 105.
- AUDEMARD, F. A., 1999, *El sismo de Cariaco del 09 de Julio de 1997, edo. Sucre, Venezuela: nucleación y*

- progresión de la ruptura a partir de observaciones geológicas*. VI Congreso Venezolano de Sismología e Ingeniería Sísmica, Mérida, Venezuela. In CD-Rom.
- AUDEMARD, F. A., 2002, *Ruptura de los grandes sismos históricos venezolanos de los siglos XIX y XX revelados por la sismicidad instrumental contemporánea*. XI Congreso Venezolano de Geofísica. Sociedad Venezolana de Ingenieros Geofísicos, extended abstracto n CD-Rom, 9 p.
- AUDEMARD, F. A., 2003a, *Estudios paleosísmicos por trincheras en Venezuela: métodos, alcances, aplicaciones, limitaciones y perspectivas*. Revista Geográfica Venezolana, Universidad de Los Andes, 44(1): 11-46.
- AUDEMARD, F. A., 2003b, *Geomorphic and geologic evidence of ongoing uplift and deformation in the Mérida Andes, Venezuela*. Quaternary International 101-102, 43–65.
- AUDEMARD, F. A., 2005, *Paleoseismology in Venezuela: objectives, methods, applications, limitations and perspectives*. En “Paleoseismology, integrated study of the Quaternary geological record for earthquake deformation and faulting”. Tectonophysics, 408 (1-4): 29-61. doi:10.1016/j.tecto.2005.05.034.
- AUDEMARD, F. A., OLLARVES, R., DÍAZ, G., BECHTOLD, M., CATALDI, A., 2006, *El geo-radar como herramienta para la definición de fallas activas: aplicación en el sector central de la falla de Boconó, estado Mérida, Venezuela*. Revista de la Facultad de Ingeniería de la U.C.V., 21(4): 57–70.
- BERES, M., HUGGENBERGER, P., GREEN, A.G. AND HORSTMAYER, H., 1999, *Using two- and threedimensional georadar methods to characterize glaciofluvial architecture*. Sedimentary Geology, Vol. 129, Nos. 1–2, pp. 1–24.
- DANIELS, J.J., BROWER, J., BAUMGARTNER, F., 1998, *High resolution GPR at Brookhaven National Laboratory to delineate complex subsurface targets*: Journal of Environmental and Engineering Geophysics, Vol. 3, No. 1, p. 1-5.
- DAVIS, J.L., ANNAN, A.P., 1989, *Ground Penetrating Radar for High-Resolution Mapping of Soil and Rock Stratigraphy*, Geophysical Prospecting, Vol. 37, pp. 531-551.
- FUNVISIS, 1987a, *Actividad cuaternaria y características sismogénicas del sistema de fallas de Oca-Ancón y de las fallas de Lagarto, Urumaco, Río Seco y Pedregal. Afinamiento de las características sismogénicas de las fallas de Mene Grande y Valera*. Proyecto COLM II. Unpublished FUNVISIS report for Maraven. 69 pp.
- FUNVISIS, 1987b, *Tectónica cuaternaria, características sismogénicas de las fallas de Boconó, San Simón y del piedemonte occidental andino y efectos geológicos asociados a la sismicidad histórica (Proyecto Sumandes)*. Reporte confidencial FUNVISIS para Maraven. 90 pp+ appendices.
- FUNVISIS, 1991, *Proyecto SUMANDES II. Características neotectónicas y parámetros sismogénicos de las fallas activas cuaternarias, y efectos geológicos de la actividad sísmica en la región de proyecto y en las obras proyectadas*. Elaborado por SINGER, A., BELTRÁN, C. y LUGO, M. Informe Final. Volúmenes I y II. FUNVISIS.
- GARRITY, C.P., HACKLEY, P.C., URBANI, F., 2010, *Digital shaded relief map of Venezuela (v. 2.0)*: U.S. Geological Survey Open-File Report 2004–1322, 1 p. text, plus metadata. (También disponible en: <http://pubs.usgs.gov/of/2004/1322/>).
- JOL, H. M., BRISTOW, C., 2003, *GPR in sediments: advice on data collection, basic processing and interpretation, a good practice guide*. En Bristow, C. & Jol, H. (eds), 2003, Ground penetrating radar in sediments. Geological Society, Londres, Publicación especial, 211: 9-27.
- KAUFMANN, G., ROMANOV, D., TIPPELT, T., VIENKEN, T., WERBAN, U., DIETRICH, P., MAI, F., BÖRNER, F., 2018, *Mapping and modeling of collapse sinkholes in soluble rock: The Münsterdorf site, northern Germany*. Journal of Applied Geophysics, Volume 154, pp. 84-80.
- LEHMANN, F., GREEN, A.G., 2000, *Topographic migration of georadar data: Implications for acquisition and processing*. Geophysics, Vol. 65, No. 3, pp. 836–848.
- LIN, C. H., LIN, C. P., HUNG, Y. C., CHUNG, C. C., WU, P. L., LIU, H. C., 2018, *Application of geophysical methods in a dam project: Life cycle perspective and Taiwan experience*, Journal of Applied Geophysics, Volume 158, pp. 82-92.

MAS F., C., CAU O., M. A., GOOSSENS, L., MEYER, C., SALA, R., ORTIZ, H., 2018, *Geophysical survey of two rural sites in Mallorca (Balearic Islands, Spain): Unveiling Roman villae*. Journal of Applied Geophysics, Volume 150, pp. 101-117.

OLLARVES, R., AUDEMARD, F. A., SÁNCHEZ, C., CAMACHO, P., CATALDI, A., ZAMBRANO, F., 2004, *Uso del GPR como herramienta para la búsqueda de fallas activas: calibración con un afloramiento cuaternario*. Proceedings XII Congreso Venezolano de Geofísica, Caracas, 8p. (Versión en CD).

RODRÍGUEZ, L., AUDEMARD, F., ARAY, J., HANS, D., ELIANA, T., VALLÉ, M., BOHÓRQUEZ, O., PARRONDO, S., OROPEZA, J., REATEGUI, W., ICHASO, A., 2015, *Resultados de dos estudios paleosísmicos (El Zumbador y El "Paraizo") realizados en la sección sur de la falla de Boconó, estado Táchira, Venezuela*. Memorias del X CONVESIS. Cumaná-Venezuela. In CD-Rom.

RODRÍGUEZ, L., DIERIX, H., TORRES, E., AUDEMARD, F., MORA, H., ARAY, J., BOHÓRQUEZ, O., HERNÁNDEZ, C., 2017, *Sistemas de fallas de Boconó y Aguas Calientes entre La Grita (edo. Táchira) y Chinácota (Dpto. Norte de Santander): resultados de estudios neotectónicos, paleosísmicos y de sismicidad histórica*. Memorias del XI CONVESIS (CONV-093). Caracas-Venezuela. In CD-Rom.

SANDMEIER, K. J., 2016, *Reflexw – GPR and seismic processing software*. Sandmeier geophysical research 2020 [cit. 2020-09-05]. Available on: <http://www.sandmeier-geo.de/reflexw.html>

SINGER, A., 2012, *Introducción a las amenazas naturales. Evaluación de la amenaza sísmica*. Biblioteca popular de sismología venezolana. Vivienda segura ante amenazas naturales. FUNVISIS. Primera edición.