

El georradar como herramienta de prospección en obras lineales: deformaciones en el antiguo trazado de la N-322 (Linares, Jaén)

GPR as prospecting tool in linear infrastructures: deformations in the ancient route N-322 (Linares, Jaen)

Isabel Rey¹, Julián Martínez¹ y M^a Carmen Hidalgo²

¹ Dpto. de Ingeniería Mecánica y Minera. EPS de Linares, Universidad de Jaén. Campus Científico Tecnológico, 23700 Linares, Jaén. ira00012@red.ujaen.es, jmartine@ujaen.es

² Dpto. de Geología. EPS de Linares, Universidad de Jaén. Campus Científico Tecnológico, 23700 Linares, Jaén. chidalgo@ujaen.es

ABSTRACT

The assessment of the ancient road N-322, connecting Linares and the Linares-Baeza station (Jaén), has been carried out by means of geophysical prospecting techniques, i.e. ground penetrating radar (GPR). Landslides affecting the Upper Miocene marls are the source of the existing pathologies in this road. Antennas with 250 MHz and 800 MHz frequencies were used, directly on the wearing course. Marly facies rapidly attenuate the signal of electromagnetic waves, so this technique has provided information just for the first two meters of the subsoil. Despite this limited penetration depth, it should be noted the precision and detail provided by the method. Thus, it provides information about thickness, quality and continuity of the various layers of the pavement. In addition, several overlapping repair phases of the cumulative deformations can be identified in this linear work. Therefore, GPR allows us to know the current status and history of the structure, which makes this technique a magnificent tool of prospecting in linear works.

Key-words: GPR, pavement prospecting, N-322, Jaén.

RESUMEN

Mediante técnicas de prospección geofísica, y en concreto, con georradar (GPR), se ha analizado el antiguo trazado de la carretera N-322 que une Linares y la Estación Linares-Baeza (Jaén). Los deslizamientos que afectan a las margas del Mioceno superior son el origen de las patologías existentes en dicha carretera. Se han utilizado antenas de 250 MHz y 800 MHz, directamente sobre el pavimento. Las facies margosas atenúan rápidamente la señal de las ondas electromagnéticas, lo que hace que esta técnica solo haya proporcionado información de los primeros dos metros del subsuelo. Pese a esta escasa profundidad de penetración, hay que señalar la precisión y el detalle que aporta el método. De este modo, se ha obtenido información de los espesores, de la calidad y de la continuidad de las distintas capas del firme. Además, se pueden deducir varias fases superpuestas de reparación de las deformaciones acumuladas en esta obra lineal. Por tanto, el GPR es una magnífica herramienta de prospección de obras lineales.

Palabras clave: georradar, prospección del firme, N-322, Jaén.

Geogaceta, 63 (2018), 47-50
ISSN (versión impresa): 0213-683X
ISSN (Internet): 2173-6545

Recepción: 2 de mayo de 2017
Revisión: 23 de octubre 2017
Aceptación: 23 de octubre 2017

Introducción

En los últimos años, existen nuevas líneas de trabajo en relación a la afección de obras lineales por movimientos de ladera. Entre ellas, cabe destacar el uso de ensayos no destructivos como complemento a los datos directos (Cervantes *et al.*, 2012). Estos estudios permiten prospectar el subsuelo sin causar alteración de los materiales, de forma rápida (realizando secciones 2D e incluso modelos 3D) y económica, en comparación con los métodos destructivos habitualmente utilizados. Estos estudios mejoran los modelos y facilitan la localización de las zonas dañadas, lo que permite focalizar las actuaciones de restauración.

En este sentido, las técnicas GPR se emplean para la inspección no destructiva en carreteras, puentes, túneles, ferrocarril y, en general, en cualquier obra civil de carácter lineal. Véanse, por ejemplo, los trabajos de Sass *et al.* (2008), Frumkin *et al.* (2011) o Tarussov *et al.* (2013). En los últimos años se han publicado trabajos en los que, mediante esta técnica, se ha analizado el espesor de los asfaltos (Solla *et al.*, 2013) o incluso el estado de preservación de los mismos (Pedret Rodés *et al.*, 2015).

En este trabajo, se ha realizado un estudio en las proximidades de Linares, provincia de Jaén (Fig. 1), donde existen deslizamientos asociados a los materiales margosos del Mioceno superior, que afectan al antiguo trazado de la Nacional 322 (Fig.

2A). Se han seleccionado dos sectores en los que se ha utilizado el método GPR (Figs. 1, 2B y 2C). Con ello se pretende comprobar la capacidad de este método para evaluar el estado del firme y localizar aquellas zonas de afección susceptibles de ser restauradas, con el fin de evitar que se produzcan hundimientos y otra serie de problemas constructivos derivados.

Material y Métodos

El georradar (*Ground Penetrating Radar*, GPR) es un método no destructivo que se basa en el estudio de la propagación en el subsuelo de ondas electromagnéticas de alta frecuencia, en un dominio que generalmente varía entre 10 MHz – 2,3 GHz. Los

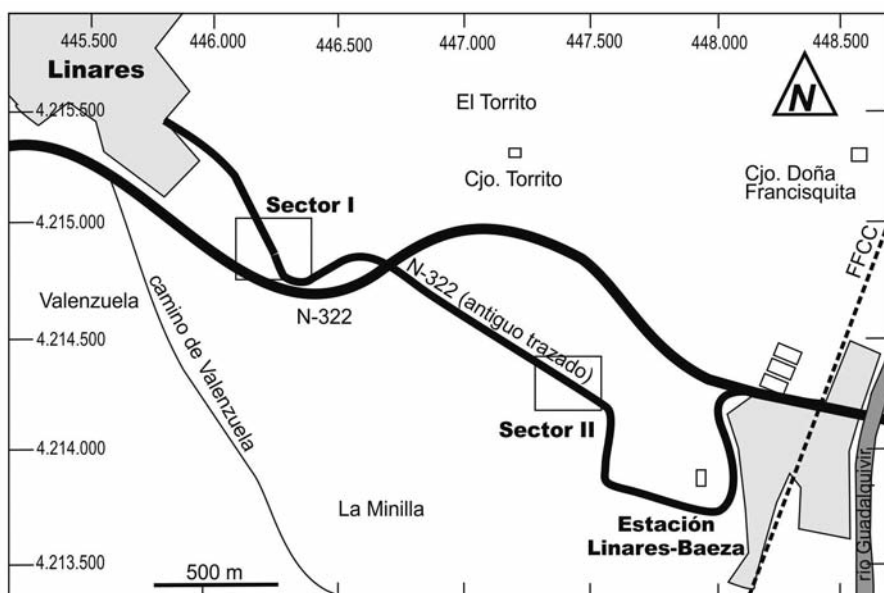


Fig. 1.- Localización geográfica de los dos sectores estudiados.

Fig. 1.- Geographical location of the two studied sectors

equipos disponen de una antena emisora y otra receptora, que se desplazan por la superficie del terreno. La profundidad de penetración y la resolución dependen de las propiedades electromagnéticas de los materiales atravesados y de la frecuencia de la señal electromagnética emitida por la antena emisora utilizada (Davis and Annan, 1989).

El equipo empleado en este estudio fue el RAMAC/GPR System, modelo Pro-Ex, fabricado por MALA GEOSCIENCE. En todos los ensayos se han empleado antenas apantalladas, de 800 y 250 MHz, con las que se pretende obtener la suficiente profundidad de investigación, así como una buena resolución en los resultados.

Se han utilizado frecuencias de muestreo de 7901 MHz y de 2540 MHz para la antena de 800 MHz y 250 MHz, respectivamente; ventanas de tiempo de registro de 65-31 ns, respectivamente; 512 muestras por traza en cada uno de los casos y un intervalo entre cada traza de 0,01 y 0,03 m, respectivamente (intervalo pequeño con el que se pretende ganar resolución).

La señal obtenida en campo se ha procesado mediante el *software Reflexw* (Sandmeier, 2016). En primer lugar, para corregir el desfase del tiempo 0, se ha utilizado un filtro de corrección estática (5 ns para la antena de 800 MHz y 9 ns para la antena de 250 MHz). Para eliminar el voltaje residual se utilizó el filtro *Subtract DC Shift*. Por otro lado, para eliminar la onda directa se empleó el filtro *Subtract Mean*

(*dewow*). Se realizó una ampliación de la señal mediante el *Automatic Gain Control*, en una ventana de tiempo de 20 ns. Finalmente, se aplicó el filtro *Background Removal* para eliminar el ruido de fondo.

Resultados y Discusión

Se han realizado 53 perfiles GPR, 31 con antena de 250 MHz y 22 con antena de 800 MHz. La dirección de los mismos ha sido tanto paralela (Fig. 2B) como perpendicular (Fig. 2C) a la carretera. La velocidad de propagación de las ondas electromagnéticas se ha calculado en el campo ya que aflora el espesor de las distintas capas de la sección de la carretera y se conoce el tiempo que tarda la onda en atravesarlas (obtenido en el radargrama). De esta forma se han obtenido unos valores medios de velocidad de 0,12 m/ns. Esta velocidad se corrobora en la etapa de procesamiento mediante el ajuste de las hipérbolas de difracción. Aunque los valores varían en función de la naturaleza de las distintas capas atravesadas, son equivalentes a los obtenidos sobre pavimentos en estudios anteriores (Solla et al., 2013).

En los perfiles GPR realizados con antena de 250 MHz, en profundidad se diferencian dos unidades (Fig. 2 D): la más superficial se caracteriza por ofrecer unas amplitudes altas, que se correlaciona con el firme.

La unidad inferior se caracteriza por una fuerte atenuación de la señal, que se relaciona con materiales arcillosos-margosos

del Mioceno superior y que constituyen la explanada de esta obra lineal (Fig. 2D). El contacto entre ambas unidades aparece a profundidades variables, entre los 16 ns y los 30 ns, lo que estaría justificado por cambios laterales de la potencia, entre 0,9 y 1,8 mm, asociados a la deformación. A unos 40 ns, lo que se correspondería con unos 2,4 m de profundidad, la señal se pierde totalmente.

A su vez, en la unidad superior se podría diferenciar el pavimento y la base/subbase de la carretera, constituida esta última por niveles detríticos groseros (zahorra). Aunque la amplitud de la onda es muy parecida en toda la unidad, la morfología de los niveles permitiría realizar la subdivisión entre ambas capas (Fig. 2D). En los radargramas se detecta una fuerte deformación del pavimento, en especial en las zonas afectadas por el deslizamiento. Incluso se advierte la presencia de niveles deformados y fosilizados por otros niveles superiores, lo que permite considerar que han existido fases previas de reparación sin que se haya retirado el antiguo firme.

En la figura 2E se representa la posición de uno de los perfiles GPR perpendiculares a la carretera en el sector II, con antena de 800 MHz. Ya en superficie destacan tres zonas de afección a la capa más superficial (capa de rodadura). En el radargrama, se advierten tres unidades en profundidad (Fig. 2F): en la parte superior aparecen niveles bien definidos y continuos que corresponderían al pavimento. Bajo este conjunto aparecen niveles poco continuos, que se relacionan con niveles detríticos groseros (zahorra), lo que se corresponde con la base/subbase de la carretera. Existe una zona inferior, de baja amplitud de la onda, que estaría constituida por las facies margosas del Mioceno superior y que formarían la explanada original de la carretera. La señal, muy atenuada, se pierde en estas facies. Con antena de 800 MHz, la señal se pierde a unos valores de tiempo que oscilan entre 13 y 15 ns, lo que supone una profundidad variable, de entre 0,8 y 0,9 m, dependiendo de las litologías atravesadas.

Por otro lado, las tres afecciones que se señalaban en la capa de rodadura de la figura 2E se pueden correlacionar en el radargrama de la figura 2F, donde se advierte la falta de continuidad de los niveles más superficiales.

En todos los casos se pueden observar las importantes variaciones laterales de es-

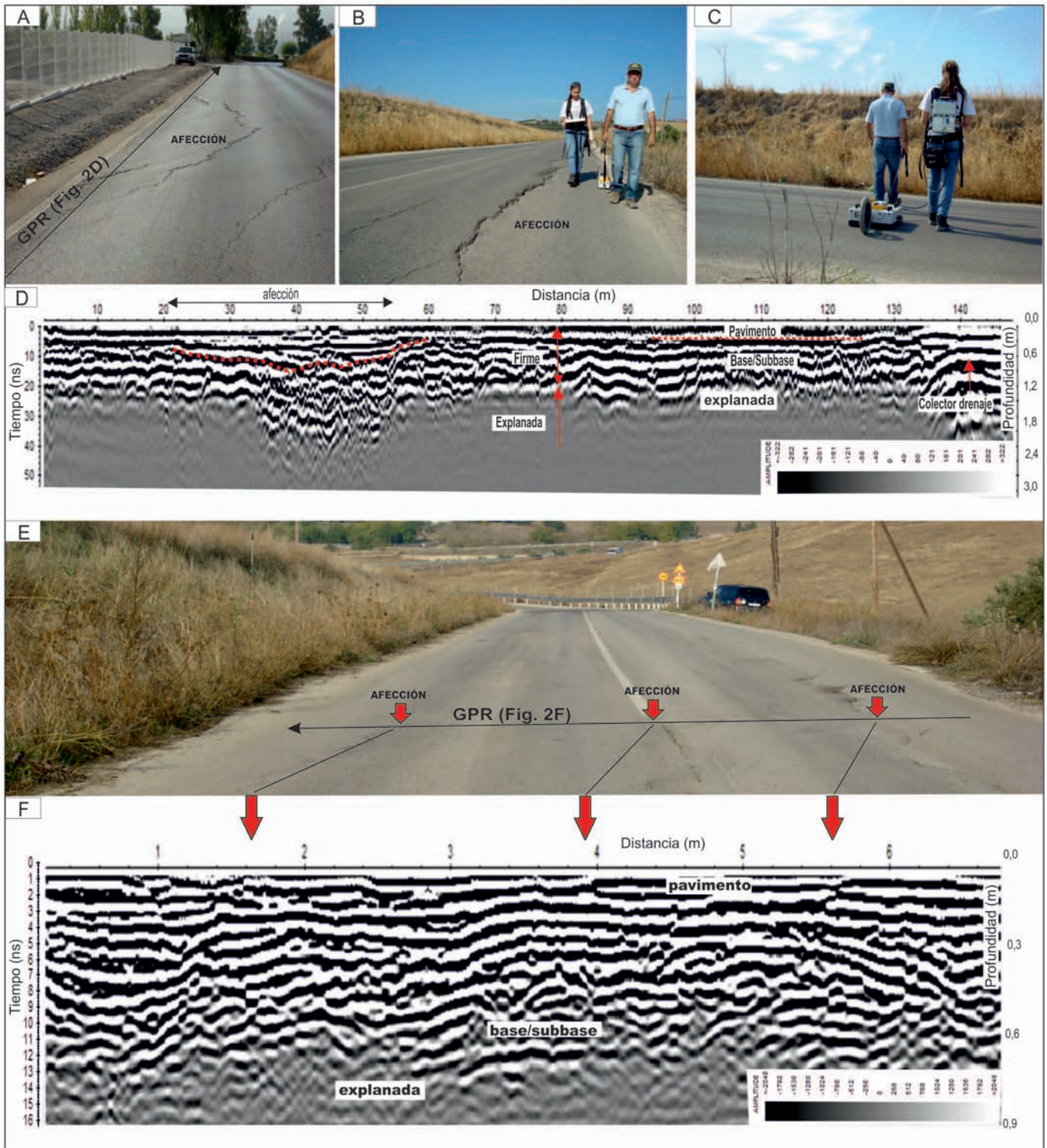


Fig. 2.- Carretera N-322 en la que se observan patologías asociadas a los procesos de deslizamiento (Sector I). Se señala la posición del radargrama representado en la Fig. 2D. A) Perfil de georradar longitudinal a la carretera, con antena de 800 MHz, en el sector II. Se observan las afecciones a la capa de rodadura (nivel superior del pavimento). B) Perfil de georradar transversal a la carretera, con antena de 250 MHz, en el sector II. C) Radargrama realizado en el Sector I (posición señalada en Fig. 2A) en el que se diferencia el firme y la explanada. Se puede observar la afección originada por los procesos de deslizamientos de las margas del Mioceno. D) Sector II del estudio, en el que se señala la posición del radargrama representado en la Fig. 2F. Las flechas destacan la posición de afecciones a la capa de rodadura. E) Radargrama realizado en el Sector II con antena de 800 MHz (posición señalada en Fig. 2E) en el que se diferencian los dos niveles principales del firme (pavimento+base/subbase) y la explanada. Se puede observar la afección a la capa de rodadura, patologías señaladas en la Fig. 2E. F) Ver figura en color en la web.

Fig. 2.- N-322 road affected by pathologies related to landslide processes (Sector I). The position of the radargram represented in Fig. 2D is shown. A) Longitudinal GPR profile with 800 MHz antenna, in sector II. There are affections to the wearing course (upper layer of the pavement). B) Transversal GPR profile with 250 MHz antenna, in Sector II. C) Radargram carried out in Sector I (position indicated in Fig. 2A), in which pavement and subgrade can be distinguished. The affection due to landslide processes in the Miocene marls is also observed. D) Sector II with the position of the radargram represented in Fig. 2F. The arrows highlight the position of affections to the wearing course. E) Radargram in Sector II with 800 MHz antenna (position indicated in Fig. 2E) that differentiates the two main layers of the pavement (wearing course+base/subbase) and the subgrade. Affections to the wearing course can be observed, related to the pathologies marked in Fig. 2E. F) See color figure in the web.

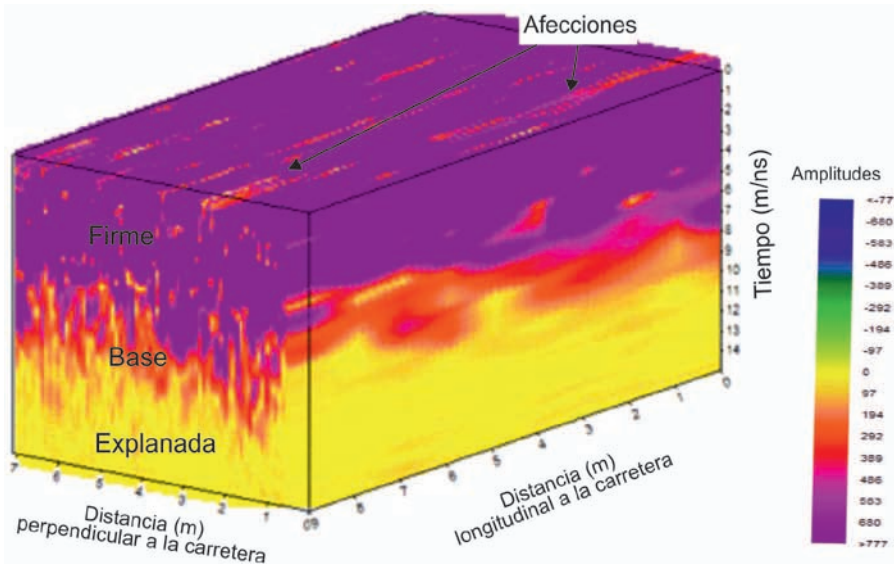


Fig. 3.- Modelo 3D elaborado a partir de diez radargramas realizados con antena de 800 MHz en el sector I. Ver figura en color en la web.

Fig. 3.- 3D model from 10 radargrams in sector I, with 800 MHz antenna. See color figure in the web.

peso en el firme, lo que se relaciona con las deformaciones que han sufrido estos materiales a partir de los deslizamientos. Además, con el mayor detalle que ofrece la antena de 800 MHz, se advierte en muchos casos la falta de continuidad de los niveles del pavimento. Así, se puede observar la falta de continuidad de la capa de rodadura, asociándose incluso a pequeñas disminuciones en la amplitud de onda, lo que se relaciona con el estado degradado de la misma.

En los dos sectores se realizaron perfiles perpendiculares a la carretera, con una equidistancia de 1 m, tanto con antenas de 250 como 800 MHz. A modo de ejemplo, en la figura 3, se representa un modelo 3D a partir de 10 perfiles en el sector I con antena de 800 MHz. Para destacar las variaciones de amplitud entre los distintos niveles, éstas se han representado en escala de colores. De esta forma, es posible diferenciar los tres conjuntos en profundidad: el firme (valores altos de amplitud), el nivel de base/subbase (valores medios), e incluso la zona de explanada (valores muy bajos). La geometría irregular de los contactos se explica por el estado de deformación existente.

Además, en la zona más superficial del firme (capa de rodadura) se detectan bajadas alineadas de amplitudes, que se rela-

cionan con pequeñas fracturas y alteraciones de este nivel (Fig.3), lo que permite cuantificar su degradación.

Conclusiones

Los perfiles GPR realizados con antena de 250 MHz permiten diferenciar claramente el firme de la carretera de la explanada inferior, constituida por las facies margosas del Mioceno, gracias a los cambios bruscos de la amplitud de la onda electromagnética. El uso de esta antena permite además detectar cambios de espesor y morfologías irregulares que afectan a todo el conjunto, que se relacionan con los deslizamientos observados en superficie. En estas litologías, se ha podido investigar hasta los 40 ns, lo que supone unos 2,4 metros de profundidad, con la velocidad calculada de 0,12 m/ns.

Con antena de 800 MHz solo es posible investigar hasta los 13-15 ns, lo que se traduce en unas profundidades variables, pero siempre menores, de entre 0,8-0,9 m. Sin embargo, la resolución es mucho mayor. En este sentido, mediante cambios de los valores de las amplitudes de las ondas y mediante la morfología de las capas es posible diferenciar distintas capas en el firme, básicamente el pavimento y la unidad base/subbase. Además,

se detectan distintos niveles del pavimento y se puede deducir tanto cambios de potencia en el mismo como la continuidad de los niveles. Por otro lado, las variaciones en la amplitud de la onda en el nivel de rodadura informan del estado de esta capa superficial. Así, la bajada local en la amplitud señala la alteración y degradación del mismo.

Mediante los perfiles realizados con la antena de 800 MHz no solo se puede conocer el estado actual del firme, sino que también, su historia de conservación. En este sentido, se han detectado distintas fases de reparación de patologías. En nuestro caso, estas fases no se han llevado a cabo con retirada del firme defectuoso. Por tanto, esta herramienta puede ser muy útil a la hora de confirmar o no si se han cumplido especificaciones del pliego de condiciones de los proyectos en relación a los firmes de carreteras.

Agradecimientos

Los autores agradecen al Dr. Pedro Jauregui Eslava y a los revisores anónimos los comentarios y sugerencias al manuscrito original.

Referencias

- Cervantes, B., Poláček, A. and Rysavka, J. (2012). *GeoScience Engineering LVIII* (2), 7-15.
- Davis, J.L. y Annan, A.P. (1989). *Geophysical Prospecting* 37, 531-551.
- Frumkin, A., Ezersky, M., Al-Zoubi, A., Akkawi, E. y Abueladas, A.R. (2011). *Geomorphology* 134, 102-117.
- Pedret Rodés, J., Pérez-Gracia, V. y Martínez-Reguero, A. (2015). *Construction and Building Materials* 96, 181-188.
- Sandmeier, K.J. (2016). *ReflexW Manual*. Zipser Straße 1, D-76227 Karlsruhe, Germany, 646 p. Available online: <http://www.sandmeier-geo.de>.
- Sass, O., Bell, R. y Glade, T. (2008). *Geomorphology* 93, 89-103.
- Solla, M., González-Jorge, H., Lorenzo, E. y Arias, P. (2013). *Measurement* 46, 3032-3040.
- Tarussov, A., Vandry, M. y De La Haza, A. (2013). *Construction and Building Materials* 38, 1246-1254.