

Aplicación conjunta de Georradar y Tomografía eléctrica para la evaluación del riesgo de colapso en la Sima de Madrona (Segovia)

Joint application of Ground-penetrating Radar and Electrical Resistivity Tomography for collapse risk assessment in the Madrona sinkhole (Segovia)

David Gómez Ortiz, Tomás Martín Crespo y Marcos Felipe Maganto González

Área de Geología, Departamento de Biología y Geología, ESCET, Universidad Rey Juan Carlos, c/Tulipán s/n, 28933 Móstoles (Madrid).
david.gomez@urjc.es; tomas.martin@urjc.es; maganto28@hotmail.com

ABSTRACT

Carbonate rocks are frequently affected by dissolution from rainfall and groundwater. As dissolution progress, the roof of the cavities can rapidly collapse originating landforms named sinkholes. When this kind of structures affect to human activities, they constitute a serious natural hazard. The province of Segovia has abundant examples of karst features developed on carbonate rocks. The 'Sima de Madrona', a collapse sinkhole located near the city of Segovia, constitutes one of these examples. The aim of this work is to determine the presence of galleries and cavities around this karst feature by means of shallow geophysical techniques, in order to assess the collapse risk of the area. The joint use of Ground-penetrating Radar and Electrical Resistivity Tomography has allowed determining the presence of two cavities related to the sinkhole development. The detection of these small galleries can affect the anthropogenic activities of the area and so, it constitutes a natural risk that has to be taken into account in order to minimize the damages that the collapse of these structures could produce.

Key words: Sinkhole, electrical resistivity tomography, Ground-penetrating Radar, Madrona, Segovia

Geogaceta, 46 (2009), 35-38
ISSN: 0213683X

Introducción

La disolución es un proceso en el que las rocas o parte de ellas, en presencia de agua, forman una solución o conjunto de solutos, y en el caso de las rocas carbonatadas, es una reacción química reversible que da lugar a la formación del karst carbonatado en calizas y dolomías relativamente puras. La karstificación en materiales carbonatados con frecuencia no es un proceso aleatorio dentro de la roca, sino que sigue unas direcciones y desarrollos determinados por diversos factores, entre los que destacan la naturaleza de la roca, su espesor y disposición (estructura o inclinación), la presencia de discontinuidades (planos de estratificación, fallas, diaclasas...) y la disponibilidad de agua (posición del nivel freático).

Si estos procesos de disolución son lo bastante intensos, pueden generarse colapsos por el hundimiento de grandes cavidades formadas en el terreno. Por el contrario, si el proceso de disolución se produce a pequeña escala, sólo se producirán pequeñas cavidades, fisuras o conductos, de forma que los materiales superiores se deforman y adaptan a la nueva morfología del terreno (por ejemplo Martín Crespo y Gómez Ortiz, 2006).

Cuando los procesos kársticos inciden en el hombre y sus actividades, se pueden

producir pérdidas humanas y materiales. Nos encontramos así con los riesgos kársticos. La provincia de Segovia presenta una abundante representación de los fenómenos kársticos. Se trata fundamentalmente de morfologías de desarrollo horizontal o subhorizontal (abrigos, solapos, galerías y cuevas), con una presencia menor de formas verticales como pozos y simas (por ejemplo, Díez Herrero y Martín Duque, 2006).

Los métodos geofísicos permiten determinar las características de un terreno, e intentan evaluarlas basándose en la medida de ciertas magnitudes físicas (eléctricas, gravimétricas, electromagnéticas...) tomadas generalmente en superficie. Estos métodos no destructivos permiten localizar la presencia de cavidades (por ejemplo Bordehore, 2005; Pueyo *et al.*, en prensa) y

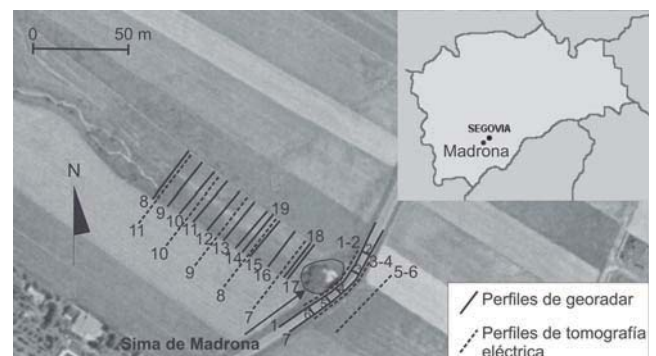
estimar por tanto el riesgo de colapso en la zona, de manera que a partir de esa información se puede realizar una adecuada gestión del territorio para minimizar los daños producidos por estos procesos naturales. En este trabajo, utilizaremos de forma conjunta el georradar y la tomografía eléctrica con el fin de detectar la presencia de cavidades alrededor de la Sima de Madrona, una dolina de colapso situada junto a una carretera secundaria y diversos campos de labor.

Objetivos

Los principales objetivos son:
- Cartografiar la cavidad kárstica en el entorno de la Sima de Madrona (Segovia) utilizando técnicas geofísicas. Determinar su recorrido,

Fig. 1.- Localización de la dolina denominada 'Sima de Madrona' y posición de los perfiles de Georradar y Tomografía eléctrica.

Fig. 1.- Location of the 'Sima de Madrona' sinkhole. The position of both GPR and Electrical Resistivity Tomography profiles is shown.



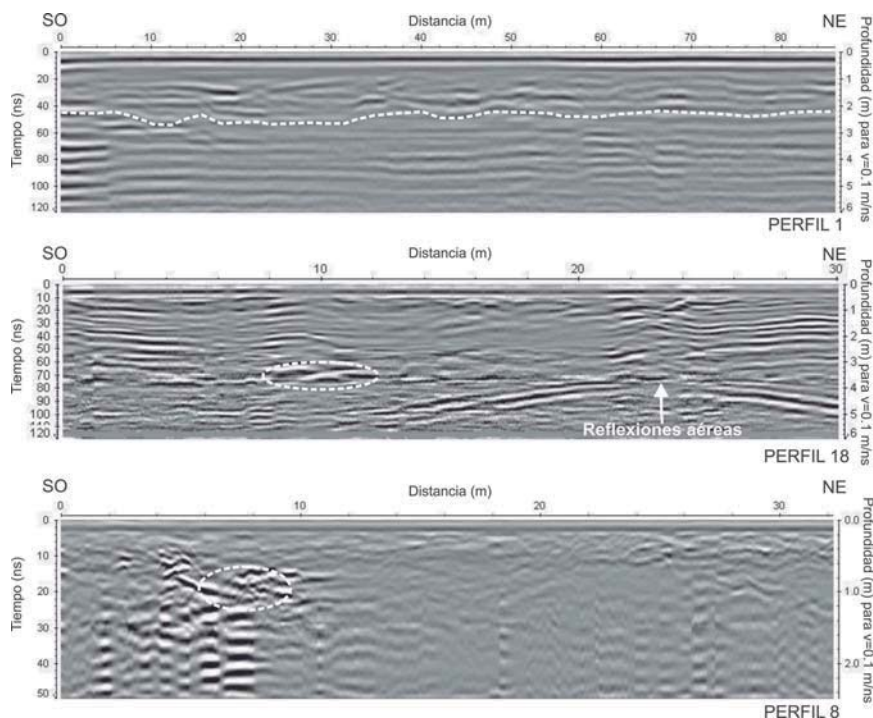


Fig. 2.- Ejemplo de algunos de los perfiles de georradar realizados más representativos. La posición de las reflexiones que corresponden a la localización de la cavidad se indica mediante una línea blanca a trazos.

Fig. 2.- Some of the most representative GPR profiles are shown. The reflections corresponding to the presence of the cavity are shown in white dashed line.

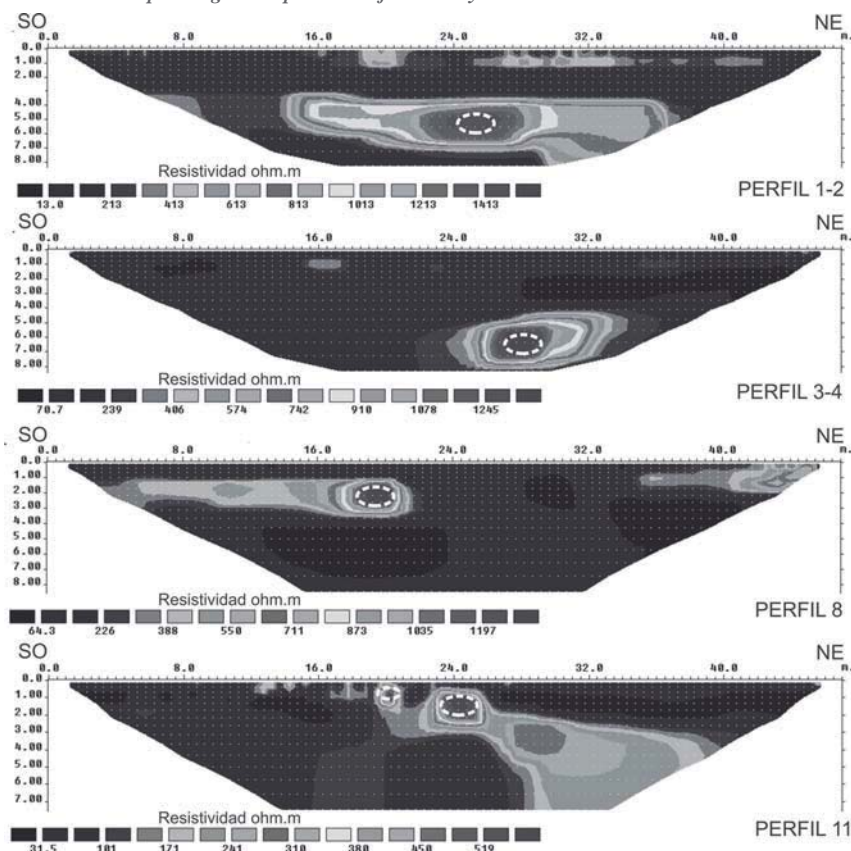


Fig. 3.- Ejemplo de algunos perfiles de Tomografía eléctrica donde pueden observarse zonas de alta resistividad asociadas a la presencia de la cavidad.

Fig. 3.- Electrical Resistivity Tomography profiles representative of the study area. High resistivity anomalous areas are related to the presence of the cavity.

dimensiones y profundidad. Investigar la posible existencia de otras cavidades.

- Determinar las ventajas y limitaciones de la aplicación conjunta de georradar y tomografía eléctrica.
- Comparar la información existente de cavidades en la zona a partir de datos espeleológicos con los datos geofísicos obtenidos.
- Estimar los peligros potenciales derivados de la existencia de esta cavidad que puedan surgir en la zona, principalmente los que puedan afectar a la carretera que discurre junto a la sima y que cruza la cavidad, y a los campos de labor anejos.

Metodología

Georradar

El georradar se basa en la emisión/recepción de impulsos electromagnéticos de muy corta duración (1-20 ns) en la banda de frecuencias de VHF-UHF (habitualmente en un rango entre 10 MHz - 2 GHz). Cuando mediante una antena emisora se generan dichos impulsos, éstos en su trayectoria a través del subsuelo pueden encontrarse con un cambio de sustrato, algún tipo de objeto enterrado o cavidades. El proceso de detección se produce por un cambio en las propiedades electromagnéticas de los medios atravesados, produciendo que parte de la energía sea reflejada de vuelta, parte sea refractada, y el resto es atenuada. Disponiendo de una antena receptora en la superficie es posible detectar estas reflexiones, y con ellas generar una serie de registros espacio-tiempo de similares características a los registros clásicos de sísmica de reflexión. Al ir desplazando las antenas sobre la superficie se van registrando el conjunto de reflexiones producidas, con lo que se obtiene una imagen de la historia de reflexiones bajo la línea de desplazamiento de la antena.

El georradar es una técnica utilizada (ver por ejemplo Annan, 1999) en medio ambiente, geología, riesgos naturales, geotecnia y arqueología. El estudio de las posibilidades de localización de cavidades se basa en que la cavidad está constituida, a efectos de radar, por un volumen de propiedades electromagnéticas muy diferentes a las de la roca que la contiene, produciéndose las condiciones ideales de contraste entre los parámetros electromagnéticos de ambos medios necesarias para la existencia de reflexiones que permitan su detección y cartografía.

El equipo de georradar utilizado ha consistido en una unidad de control TerraSIRch SIR System-3000, un odómetro, un cable de conexión de 5 metros, y dos antenas apantalladas de 200 y 400 MHz de

frecuencia central, todo ello del fabricante GSSI. La razón de utilizar dos antenas diferentes es porque existe una relación inversa entre profundidad de penetración y resolución vertical, y así usando distintas antenas se minimiza esta limitación del método. La profundidad media de penetración alcanzada ha sido de unos 6 m con la antena de 200 Mhz y 3 m con la de 400 Mhz. El software empleado en el tratamiento y procesado de los radargramas obtenidos ha sido ReflexW. Antes de llevar a cabo los perfiles se llevó a cabo la calibración y configuración del equipo para los materiales de la zona de estudio mediante el análisis de hipérbolas y la comparación de los reflectores obtenidos con los materiales observados en la sección expuesta de la dolina. El procesado de los datos ha consistido en corrección de tiempo cero, filtro de tipo 'dewow', filtro paso banda, filtro tipo 'background removal' y sustitución de la curva de ganancia en campo por una de tipo exponencial.

Tomografía eléctrica

La tomografía eléctrica utiliza la medida de las resistividades de los materiales geológicos subsuperficiales para determinar su espesor y profundidad (Telford *et al.*, 1990; Reynolds, 1997; entre otros). Se pueden usar diferentes configuraciones de electrodos, dispuestos a lo largo de una línea con un espaciado constante, de tal manera que cuando las medidas de resistividad se realizan entre electrodos próximos, la profundidad de investigación es pequeña, pero cuando se realiza entre electrodos muy separados, la profundidad de investigación es mayor. De esta forma se obtiene un perfil bidimensional de los valores de resistividad según una malla uniforme. El espaciado entre electrodos también condiciona la resolución y la profundidad de investigación. Si el espaciado es pequeño, la profundidad de penetración disminuye y la resolución de los datos aumenta.

Los valores de resistividad obtenidos son interpretados mediante un software específico que permite determinar la geometría y los espesores de las unidades con diferentes resistividades mediante un proceso iterativo de inversión.

Este método de prospección es especialmente útil en localización de cavidades en el subsuelo, puesto que los huecos rellenos de aire presentan una resistividad mucho mayor que el material que lo rodea (por ejemplo, Reynolds, 1997). Otra aplicación habitual es la determinación de agua en el subsuelo, debido al carácter poco resistivo de la misma cuando su contenido en iones es moderado o alto, así como en la detección de plumas contaminantes.

En este trabajo se ha utilizado el equipo Syscal Junior Switch 48. De las diferentes

configuraciones, se han elegido la Wenner-Schlumberger, puesto que presenta una buena relación entre resolución, tanto horizontal como vertical, y profundidad (p.ej. Sasaki, 1992) y la configuración Dipolo-Dipolo, que es la que presenta una mayor resolución y cobertura de datos horizontal (p.ej. Reynolds, 1997). La longitud de los perfiles ha sido de 47 m, con un espaciado entre electrodos de 1 m. La profundidad máxima de penetración obtenida ha sido de 9 m. El software empleado en la obtención de los modelos de resistividades ha sido RES2DINV.

Objeto del estudio

Madrona es una localidad de apenas 500 habitantes situada en la provincia de Segovia, 9 kilómetros al suroeste de la capital de provincia (Fig. 1). Se asienta sobre rocas carbonáticas cretácicas (calizas, dolomías y margas) buzando ligeramente al noroeste. Hacia el noroeste, estos materiales están cubiertos por depósitos detríticos cuaternarios correspondientes al río Milanillos.

La carretera provincial SG-P-7211 que une las localidades de Madrona y La Losa atraviesa a su salida de Madrona el paraje de La Sima, lugar que recibe su nombre por la presencia de una torca o dolina producida por el hundimiento del techo de una cavidad kárstica (denominada Sima de Madrona o Sima del Moro). Tiene forma circular, una profundidad de unos 7 metros y un diámetro de aproximadamente 15 metros, y su interior está semicubierto por numerosa vegetación. Se encuentra justo en el margen de la carretera, rodeada de fincas y campos de labor. La Sima está situada entre los arroyos de Riofrío y Milanillos, cuyas aguas se infiltran en las rocas carbonáticas dando lugar a un acuífero kárstico que circula pendiente abajo, en dirección noroeste.

Las medidas de protección que se han tomado hasta la fecha consisten en un vallado construido en el margen de la carretera a modo de puente, para evitar caídas fortuitas, y el relleno con bloques de piedra del hueco existente bajo el borde de la carretera, que es poco consistente. El grupo de espeleología de Segovia hizo varios años una inspección de la cavidad, y advirtieron la presencia del inicio de una pequeña galería en la zona inmediatamente al noroeste de la dolina de carácter muy superficial. Aún así, se sigue labrando en esta zona con maquinaria pesada (tractores).

Resultados

Georradar

Se realizaron un total de 19 perfiles (Fig. 1) utilizando antenas de 200 y 400

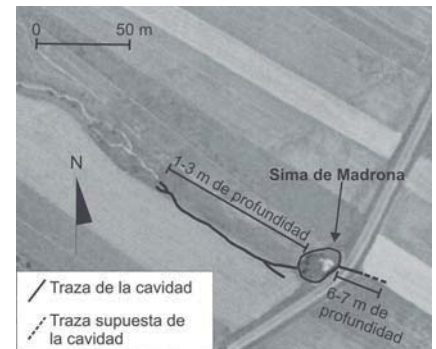


Fig. 4.- Imagen de satélite de la zona de estudio donde se ha proyectado la traza de las cavidades detectadas. Se indica también la profundidad a la que se encuentra en cada trazo.

Fig. 4.- Satellite image of the study area with the projected position of the detected cavities and their mean depth.

MHz en función de la profundidad y resolución necesarias. En los perfiles realizados en las cunetas y en secciones transversales de la carretera, así como en el borde noroeste de la dolina, se utilizó la antena de 200 MHz, con el fin de detectar la posible presencia de cavidades a profundidades importantes. Por el contrario, los perfiles realizados en los campos de labor fueron llevados a cabo con la antena de 400 MHz y un espaciado de 10 m entre sí, pues la cavidad identificada por el grupo de espeleología de Segovia estaba bastante cerca de la superficie y la resolución obtenida de esta manera era mayor. La orientación de los perfiles en los campos de labor se realizó de forma transversal a la dirección de la cavidad, y en la zona de la carretera, tanto longitudinal como transversalmente, para comprobar en detalle si la carretera puede verse afectada por las posibles cavidades.

Los perfiles realizados a lo largo de las cunetas de la carretera, así como transversalmente a la misma, no evidencian la presencia de reflexiones que puedan corresponder a huecos, al menos hasta la profundidad prospectada (unos 6 m). Como ejemplo, se muestra el perfil 1 (Fig. 2) donde se observan hasta unos 2 m de profundidad reflectores alabeados, localmente discontinuos, que corresponden con los materiales detríticos de relleno observados en campo, y por debajo aparecen reflectores mucho más continuos, subhorizontales, que se han interpretado como la respuesta de las dolomías del Cretácico superior sobre las que está desarrollada la dolina. Muy diferente es el aspecto del radargrama del perfil 18 (Fig. 2), realizado en los campos de labor junto al borde de la dolina, que muestra una serie de reflectores intensos superficiales con algunas reflexiones de más intensidad. La observada en el metro 10 del perfil y a una

profundidad de unos 3 m corresponde con la presencia de la cavidad detectada por el Grupo de Espeleología de Segovia, mientras que hacia el final del perfil aparece una reflexión en forma de hipérbola que se asocia con reflexiones aéreas en una línea de tensión media situada junto a la dolina. Entre los metros 10 y 24 hay una atenuación de los reflectores en la parte superficial que indicaría la ausencia de materiales cretácicos y la presencia de materiales detríticos de menor constante dieléctrica. El perfil 8 (Fig. 2), el realizado más al norte del campo de labor, muestra la presencia de varias reflexiones muy intensas entre los metros 6 a 9 y a una profundidad de 1-1.5 m que se interpretan como debidos a pequeñas cavidades someras desarrolladas en los materiales cretácicos.

Tomografía eléctrica

Se realizaron un total de 8 perfiles (Fig. 1). En los llevados a cabo paralelamente a las cunetas de la carretera y en el realizado en el talud situado al sureste de la carretera, se utilizaron las dos configuraciones descritas, para posteriormente fusionar ambos conjuntos de datos y obtener mayor resolución y profundidad. Sin embargo, en los perfiles que se realizaron en la zona situada al noroeste de la dolina, en los campos de labor, se utilizó únicamente la configuración Dipolo-Dipolo con perfiles separados 20 m entre sí, ya que la cavidad en esta zona se encontraba cercana a la superficie y no era necesario obtener una gran profundidad.

Los datos de resistividad de los perfiles 1 y 2, realizados en la cuneta más próxima a la dolina, fueron fusionados y su inversión se llevó a cabo de manera conjunta (Fig. 3) alcanzándose un error medio cuadrático (EMC) de un 2% en la séptima iteración. El modelo de resistividad obtenido, representado en escala lineal, muestra en el metro 25 y a una profundidad de unos 5-6 m la presencia de una importante zona de alta resistividad (> 1500 ohm.m), lo que se ha interpretado como la presencia de una cavidad circular u ovalada y de un diámetro máximo aproximado de 1 m. Por su parte, los perfiles 3 y 4 (Fig. 3), también fusionados previamente a su inversión, muestran en el metro 28 y a una profundidad de unos 6-7 m, una zona de alta resistividad (> 1200 ohm.m) interpretada también como una cavidad de dimensiones parecidas a la anterior de la cual sería su continuación hacia el sur. En este perfil, el EMC obtenido fue de 2,6% en la quinta iteración.

En el campo de labor, los perfiles 8 (EMC del 2,2% en la quinta iteración) (Fig. 3) y 11 (EMC del 1,9% en la quinta iteración) (Fig. 3) muestran también zonas de alta resistividad (> 1000 ohm.m) a diferen-

tes distancias y profundidades (metro 19,5 a una profundidad de 2 m, perfil 8; metros 20 y 24 a una profundidad de 1 m, perfil 11) que se han interpretado como la prolongación hacia el norte de la cavidad detectada en el borde de la dolina tanto por el grupo de Espeleología de Segovia como en los perfiles de georradar.

Discusión y conclusiones

Una vez analizados los resultados obtenidos con cada una de las técnicas utilizadas, podemos hacer una valoración de la idoneidad de su aplicación para localizar cavidades en la zona de estudio, así como su aplicación conjunta.

Los resultados obtenidos con la tomografía eléctrica son bastante satisfactorios, ya que en todos los casos nos han permitido visualizar de una forma bastante aproximada la situación de los huecos que pretendíamos encontrar. No ocurre lo mismo con los resultados del georradar, puesto que en la zona superior de la carretera adyacente a la dolina no nos ha proporcionado información sobre la cavidad. Esto es debido a que la profundidad a la que se encuentra la cavidad está cerca del límite de profundidad alcanzado por la antena (5-6 metros). Aún así, hay que decir que los resultados obtenidos con el georradar en el resto de perfiles realizados en la zona noroeste de la dolina son bastante buenos, pues nos permiten obtener la situación de la cavidad, así como la presencia de discontinuidades litológicas (dolomías, materiales de relleno...), lo que se observa en todos los perfiles realizados.

Podemos decir que de la aplicación conjunta de estas dos técnicas se han obtenido muy buenos resultados. Salvo en algunos perfiles, los resultados obtenidos al utilizar ambas técnicas son muy similares, lo que reduce notablemente la ambigüedad que habría resultado de haber utilizado sólo una de ellas. Además, estas técnicas se complementan. La interpretación de los radargramas no resulta sencilla, por lo que los modelos de resistividades ayudan a interpretar ciertos elementos obtenidos por el georradar. Por el contrario, los radargramas nos pueden facilitar la comprensión de determinados elementos obtenidos en la tomografía eléctrica. Esto ocurre a la hora de distinguir los tipos de materiales existentes en el subsuelo, ya que en los radargramas muestran bastante bien los cambios de litología, mientras que en los modelos de resistividades las diferentes escalas utilizadas o los colores que las representan pueden llevarnos a error.

Integrando los resultados obtenidos en todos los perfiles por ambas técnicas, se

puede cartografiar la posición de las cavidades en los alrededores de la sima (Fig. 4). Los huecos y cavidades que observamos afectan de manera clara a las estructuras antrópicas, para las que pueden suponer un riesgo. La cavidad existente bajo la carretera está a una profundidad considerable (mayor de 5 metros), lo que podría hacer suponer que no existe riesgo de colapso. Pero debido a que los materiales situados justo encima y a ambos lados son dolomías que siguen afectados por procesos de disolución, el riesgo de que en el futuro se produzca su subsidencia o que poco a poco vayan aumentando el tamaño de la cavidad es patente, así como el peligro que esto podría suponer. El riesgo de colapso también está presente en la cavidad que se abre en la dolina a lo largo de los campos de labor, debido a la menor profundidad a la que está situada y al empleo de maquinaria (tractores) que se utiliza en esta zona. Sin embargo, al ser una cavidad pequeña, posibles colapsos que tuvieran lugar serían muy localizados y de pequeño tamaño, lo que disminuye su peligrosidad.

Agradecimientos

Agradecemos a la Diputación Provincial de Segovia el permiso otorgado para la realización de la toma de datos de este trabajo. Los autores quieren agradecer a Andrés Díez Herrero, del Área de Riesgos Naturales del IGME, toda su ayuda e información sin las cuales este trabajo no habría sido posible. Agradecemos la revisión de D. Óscar Pueyo cuyos comentarios han contribuido a mejorar la versión original del manuscrito.

Referencias

- Annan, A.P. (1999). *Practical processing of GPR data*. Sensors and Software, 18 p.
- Bordebore, L. (2005). *Subsuelo y Obra urbana*, 16, 34-43.
- Díez Herrero, A. y Martín Duque, J.F. (2006). *Las raíces del paisaje. Condiciones geológicas del territorio de Segovia*. Junta de Castilla y León, 466 p.
- Pueyo, O., Casas Sainz, A.M., Soriano, M.A. y Pocoví, A. (en prensa). *Environmental Geology*.
- Reynolds, J.M. (1997). *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. John Wiley and Sons, 796 p.
- Sasaki, Y. (1992). *Geophysical Prospecting*, 40, 453-464.
- Telford, W.M., Geldart, L.P. y Sheriff, R.E. (1990). *Applied Geophysics*. Cambridge University Press, 770 p.
- Martín-Crespo, T. y Gómez-Ortiz, D. (2007). *Environmental Geology*, 53(1), 57-66.