

Análisis de la variabilidad del espesor del epikarst en la Sierra de las Nieves (Málaga, SE de España) mediante sísmica de refracción

Analysis of the epikarst thickness distribution in the Sierra de las Nieves (Málaga, SE Spain) using seismic refraction

Sergio Martos-Rosillo¹, Carlos Gata Maya², Antonio Pedrera Parias³, Juan Antonio Luque-Espinar¹, Eulogio Pardo-Igúzquiza¹, Pedro Agustín Robledo-Ardila¹, Carolina Guardiola-Albert¹ y Juan José Durán Valsero¹

¹ Instituto Geológico y Minero de España, C/ Ríos Rosas, 23, 28004-Madrid, España.

s.martos@igme.es, ja.luque@igme.es, e.pardo@igme.es, pa.robledo@igme.es, c.guardiola@igme.es, jj.duran@igme.es.

² Gama Geofísica, C/ Castillo de Fuensaldaña, 2, P-3, 1ºK., 28232-Las Rozas de Madrid, Madrid, España. www.gama-geofisica.com

³ Instituto Andaluz de Ciencias de la Tierra, Avda. de Las Palmeras nº 4, 18100-Armilla, Granada, España. pedrera@ugr.es

ABSTRACT

The epikarst is the weathered top of the karstic massifs, which exerts a strong control of the spatiotemporal variability of recharge and therefore in the hydrogeological functioning of karst aquifers. Although, in recent years, the scientific community has made a major effort to improve their knowledge, are still unaware of the patterns that determine their degree of spatial development. This work aims to contribute to understanding the spatial variability of the epikarst thickness. To achieve this goal, we present the results of a seismic refraction survey. The proposed methodology has been applied in the eastern sector of the Sierra de las Nieves aquifer (Málaga).

Key-words: Karst, hydrogeology, aquifer, geomorphology, geophysics.

RESUMEN

El epikarst es una zona de alteración superficial de los macizos kársticos que ejerce un fuerte control sobre la variabilidad espacio-temporal de la recarga y condiciona, por tanto, el funcionamiento hidrogeológico de los acuíferos kársticos. Aunque durante los últimos años la comunidad científica ha hecho un notable esfuerzo en la mejora de su conocimiento, todavía se siguen desconociendo los patrones que condicionan su distribución espacial y desarrollo vertical. Con este trabajo se pretende contribuir al conocimiento de la variabilidad espacial del espesor del epikarst. Para alcanzar ese objetivo se ha realizado una campaña de sísmica de refracción en el sector oriental del acuífero de la Sierra de las Nieves (Málaga) de la que se presentan sus resultados e interpretación.

Palabras clave: Karst, hidrogeología, acuífero, geomorfología, geofísica.

Geogaceta, 54 (2013), 103-106.
ISSN (versión impresa): 0213-683X
ISSN (Internet): 2173-6545

Fecha de recepción: 31 de enero de 2013
Fecha de revisión: 25 de abril de 2013
Fecha de aceptación: 24 de mayo de 2013

Introducción

El epikarst es una zona alterada de los macizos carbonáticos situada inmediatamente bajo la superficie del terreno o bajo el suelo edáfico, cuando éste está presente (Williams, 2008). En el epikarst, la intensidad de los procesos de alteración hacen que su porosidad y permeabilidad sea mucho más homogénea que en el resto del sistema (Klimchouk, 2004). La porosidad media del epikarst suele superar el 20% y, en todo caso, es notablemente superior a la de la roca infra-yacente "inalterada", en la que el promedio de porosidad es del 2% (Williams, 2008). Presenta espesores muy variables (entre 1 y más de 100 m), aunque los valores medios suelen estar comprendidos entre 10 (Williams, 2008) y 15 m (Klimchouk, 2004).

Su importancia y su papel en el karst se han puesto de manifiesto, entre la comunidad científica, durante los 30 últimos años. El epikarst pone en contacto la biosfera y el karst profundo. Constituye la principal zona de disolución de los sistemas kársticos, condiciona la variabilidad espacio-temporal de la recarga y del caudal de drenaje de los manantiales y consiste en la principal zona de retención y dispersión de contaminantes, aspecto que lo hace esencial en los estudios de vulnerabilidad a la contaminación del karst (William *et al.*, 2004).

Pese a que se han conseguido notables avances en la investigación del epikarst, a día de hoy se siguen sin conocer los patrones que controlan la variación espacial de sus principales características y con ello la de los procesos hidrológicos implicados. Su

caracterización haría posible extrapolar las observaciones realizadas en un limitado número de puntos a escala de acuífero.

Los trabajos de investigación del epikarst mediante geofísica empiezan a ser abundantes. Predomina la aplicación de métodos eléctricos, electromagnéticos y sísmicos (ver Chalikakis *et al.*, 2011). En este sentido, Martos-Rosillo *et al.* (2013) consiguieron una buena resolución en la estimación del espesor del epikarst mediante la sísmica de refracción, en la Sierra de Estepa (Sevilla), debido al acusado contraste en la velocidad de la propagación de las ondas sísmicas entre la zona alterada y la no alterada, y al necesario aumento de la velocidad con la profundidad, que esta técnica requiere (Sheriff y Geldart, 1990).

El principal objetivo de este trabajo consiste en evaluar la variabilidad del espesor del epikarst en el sector occidental del acuífero de la Sierra de las Nieves (Málaga, sur de España). Para alcanzarlo se ha realizado una campaña de prospección mediante sísmica de refracción, de la que se presentan los principales resultados y su interpretación. El estudio de la relación entre el espesor del epikarst obtenido con otras variables espaciales constituye un paso previo y esencial para la posterior cartografía del epikarst. La implementación de ésta es necesaria en el diseño de modelos de simulación de flujo y transporte robustos, con los que avanzar en la investigación del karst.

Área de estudio

El acuífero de la Sierra de las Nieves, situado en la parte occidental de la provincia de Málaga, consiste en un conjunto de elevaciones, formadas por rocas karstificadas, coronadas por el pico Torrecilla (1919 m s.n.m). Recibe una precipitación media anual de 1000 mm, y la temperatura y evapotranspiración potencial media es de 15 °C y 980 mm/año, respectivamente (periodo 1964-1999; Liñán, 2005). Este acuífero lo forman materiales dolomíticos y calizos de edad triásica-aquitaniense de las Unidades Frontales (Fig. 1) (Martín-Algarra, 1987), si-

tuadas en el sector occidental de la Cordillera Bética. Su estructura general se corresponde con la de un sinclinal tumbado, vergente al NO, afectado por varias familias de fracturas, entre las que destacan las de dirección N130°E, que delimitan bloques levantados y hundidos. El total de afloramientos permeables es de 109 km² y su espesor supera en algunos sectores los 1200 m (Liñán, 2005) (Fig. 1C). Sus límites se suponen cerrados al flujo subterráneo. El considerable espesor saturado y la porosidad media del acuífero, que ha sido estimada en 1,2%, hacen suponer un importante volumen de reservas. Recibe una recarga de 71 hm³/año, procedente de la infiltración del agua de lluvia. Se diferencian tres sectores de drenaje asociados con los nacimientos de los ríos Grande, Verde y Genal, que drenan un 85-90 % de la recarga media (Liñán, 2005).

La investigación que se presenta en este trabajo se realiza en el sector occidental del citado acuífero, drenado principalmente por el manantial del Genal (Fig. 1). Éste descarga un caudal medio de 400 l/s (periodo 1995-1999). El análisis de la respuesta del manantial a los eventos de lluvia (Liñán, 2005; Jiménez-Gavilán, 2011) y la simulación y calibración de su recarga (Guardiola-Albert *et al.*, 2012) ponen de manifiesto la escasa inercia del sistema. Presenta varias

crecidas bruscas anuales, con tiempos de respuesta de un día, seguidas de rápidas decrecidas. Además, solo el 30% de su volumen anual de descarga se hace en fase de agotamiento (Liñán, 2005; Jiménez-Gavilán, 2011). El área de recarga que alimenta a este manantial ha sido estimada en unos 20 km² (Guardiola-Albert *et al.*, 2012); en su mayoría coincidentes con el semipolje de La Nava, donde destaca la existencia de numerosas dolinas y campos de lapiaz y donde el epikarst muestra un desarrollo importante, con respecto a otros sectores de la Sierra (Rodríguez-Galiano *et al.*, 2012). Esta madurez en su desarrollo viene avalada por la presencia de dolinas y por la morfología irregular de su base, con terminaciones en embudo conectadas a conductos verticales, visibles en taludes de carreteras y en distintos frentes de canteras abandonadas y activas.

Material y métodos

Para determinar el espesor del epikarst se realizó, en diciembre de 2012, una campaña de sísmica de refracción. Con esta técnica geofísica se mide el tiempo de propagación de las ondas elásticas directa y refractada (Sheriff y Geldart, 1995). Se realizaron 18 perfiles (Fig. 1): 16 con 60 m de longitud y dos de 120 m. En ambos tipos de

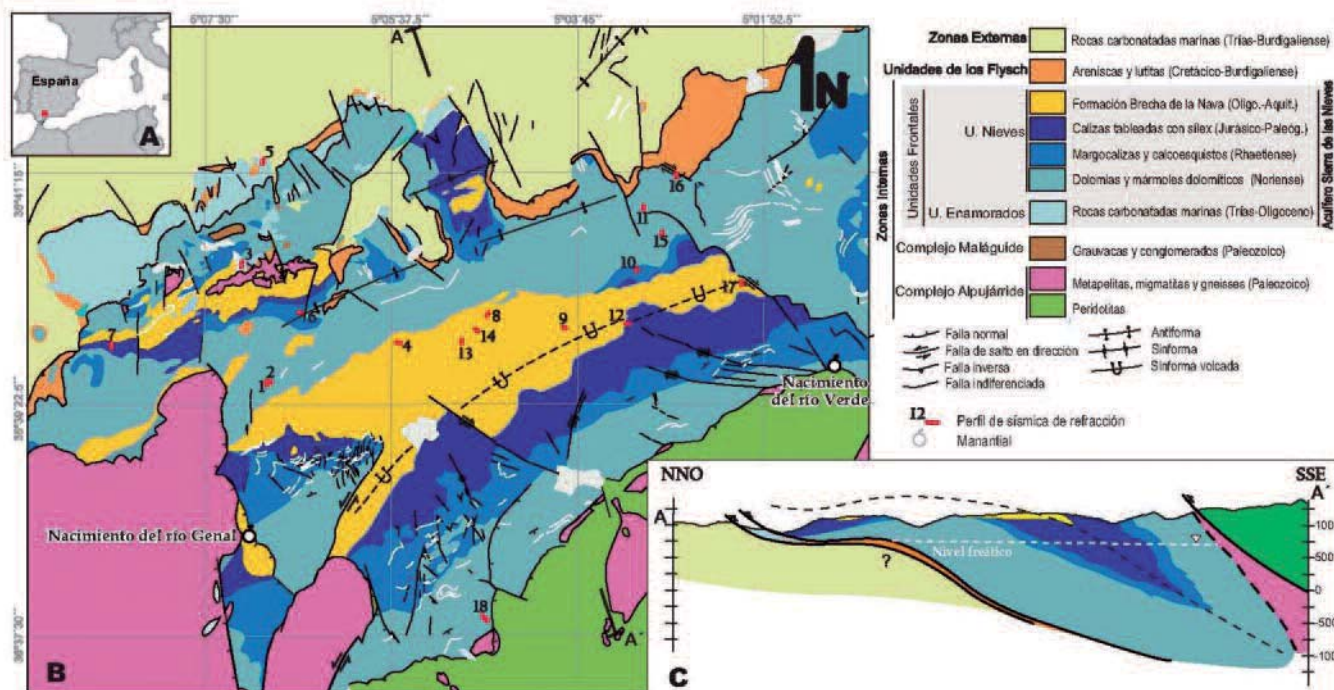


Fig. 1.- (A) Localización de la zona de estudio. (B) Mapa geológico del sector occidental del acuífero de la Sierra de las Nieves y situación de los perfiles de sísmica de refracción. (C) Corte geológico.

Fig. 1.- (A) Location map of study area.(B) Geological map and location of refraction profiles. (C) Geological section.

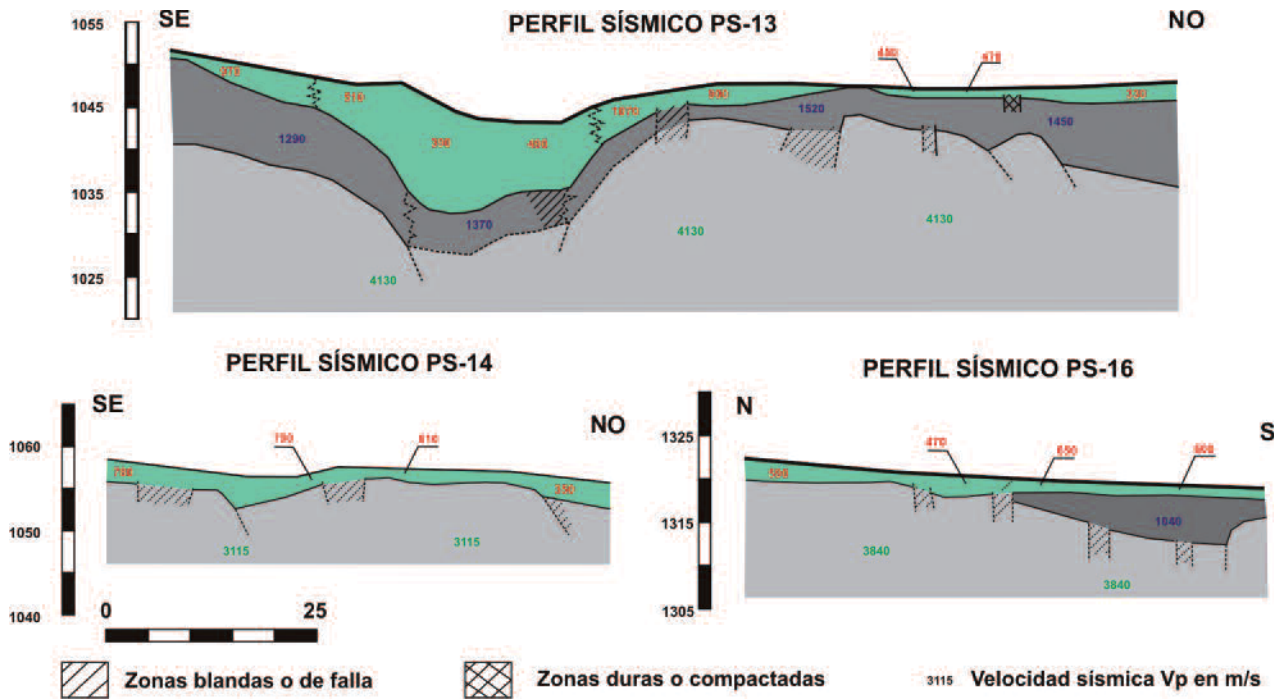


Fig. 2.- Ejemplo de distintos perfiles de sísmica de refracción que muestran la distribución de las velocidades de propagación de las ondas -p.
 Fig. 2.- Example of seismic refraction tomograms showing the distribution of estimated p-wave velocity.

perfiles se realizaron cinco puntos de disparo separados 30 m con una separación entre geófonos de 5 m. El equipo utilizado ha consistido en un sismógrafo multicanal Geode 24CH de Geometrics. Además se han utilizado geófonos Geospace de componente vertical de 14 Hz, líneas sísmicas para 12 geófonos y un martillo de 8 kg con disparador electrónico de tiempos. Se ha intentado hacer una selección de emplazamientos lo más representativa posible. La mitad de ellos se ha hecho sobre dolomías y mármoles, siete sobre los materiales correspondientes a la formación cenozoica denominada Brecha de la Nava y el resto en calizas tableadas y margocalizas mesozoicas. El rendimiento obtenido en campo, con un equipo compuesto por un técnico especialista y un operador, ha sido de 8 perfiles por día. Para la interpretación de los resultados se contó con el apoyo del paquete de programas Seisimager 2D siendo construidas las dromocrónicas finales así como los cortes sísmicos definitivos manualmente, de forma que pudieron seguirse los distintos "accidentes" y saltos presentes en los refractores detectados geófono a geófono.

Resultados

La investigación geofísica realizada ha permitido diferenciar varias capas con dife-

rente grado de alteración. Se han alcanzado profundidades de penetración entre 15 y 20 m. En 16 de los 18 perfiles realizados (Fig. 1) se han distinguido tres capas y dos en el resto. La primera de ellas, la más superficial, se correspondería con suelos edáficos, cuando existen sobre el epikarst, y con la zona más alterada. Presenta velocidades de propagación en torno a los 800-900 m/s. Seguidamente hay una capa menos alterada, con velocidades medias de 1500 m/s, que da paso al sustrato rocoso inalterado, en el que su velocidad media de propagación es de 3800 m/s. En la primera capa, la profundidad media y la desviación estándar asociada es de $1,8 \pm 1$ m y de $4,2 \pm 2$ m en el caso de la segunda. El espesor medio del epikarst, en los 18 perfiles investigados, es de 5,8 m, con valores medios extremos comprendidos entre 1,9 (Perfil 14) y 9 m (Perfil 13), y una desviación estándar de 2,3 m. Debe destacarse que en algunos de los perfiles se superan, puntualmente, profundidades de 18 m.

En la figura 2 se presentan tres perfiles tipo, con diferentes grados de evolución del epikarst, coincidiendo con las apreciaciones hechas por Klimchouk (2004). El menos evolucionado está representado por el PS-14, hecho sobre la Brecha de La Nava, con un espesor medio de 1,9 m. En un estadio evolutivo intermedio se encuentra el perfil

PS-16, realizado sobre dolomías triásicas, en el que se pueden diferenciar tres capas. Su espesor medio es de 3,4 m. Por último, se representa el perfil PS-13, hecho sobre la formación Brecha de La Nava, en la dolina de Conejeras y con un espesor medio de 9 m. Éste representaría un estadio más evolucionado que los anteriores, en el que el ensanchamiento de un conducto vertical de drenaje, situado en la base del epikarst, termina por generar una dolina.

Discusión

Los resultados obtenidos muestran que el epikarst del sector occidental de la Sierra de las Nieves tiene un espesor medio de ~6 m, inferior a los 10-15 m citados como cifra orientativa por algunos autores (Williams, 2008; Klimchouk, 2004). Sin embargo, el valor que resulta es coherente con los que se describen en la Sierra de Estepa (Martos-Rosillo *et al.*, 2013).

En todo caso, la notable capacidad de almacenamiento de esta capa relativamente delgada y el brusco cambio de las propiedades hidráulicas con respecto a la roca inalterada infrayacente deben condicionar, de forma considerable, la recarga de este acuífero. En lo que a la capacidad de almacenamiento del epikarst se refiere, se debe señalar que, en el caso de dar por buenas las

porosidades medias del epikarst del orden del 20%, citadas por Williams (2008), la retención de un metro de columna de agua en el epikarst de la Sierra de las Nieves equivaldría a 17 m de columna de agua en la zona de almacenamiento dinámico del acuífero, dado que la media de la porosidad de la matriz del acuífero es de 1,2%. En este sentido, y con los reducidos gradientes hidráulicos que se suponen en este acuífero, habida cuenta de su alta karstificación funcional, es lógico pensar que la capacidad de almacenamiento del epikarst es del mismo orden de magnitud que la de la zona de almacenamiento dinámico.

En relación con lo anterior, el comportamiento hidrodinámico del manantial del Genal, que responde al de un sistema con una alta karstificación funcional de su zona no saturada, implica una buena conexión entre el epikarst y la red de conductos asociada al manantial. Hay que subrayar que la morfología del contacto entre la zona alterada y la no alterada, que se deduce del análisis de las domocronías, es muy parecida a la del modelo clásico de evolución de dolinas propuesto por Williams (1983), y que supone el desarrollo de zonas de disolución alrededor de los conductos verticales que facilitan el drenaje de la zona epikárstica.

Las anteriores consideraciones fueron incluidas en el modelo conceptual adoptado en la simulación de la recarga al manantial del Genal, mediante el código VisualBalan (Guardiola-Albert *et al.*, 2012). La calibración obtenida permitía reconstruir la respuesta hidrodinámica del manantial, considerando una reserva útil equivalente de 63 mm en el conjunto suelo-epikarst. Esta importante capacidad de almacenamiento hace que los eventos de lluvia de poca intensidad no saturen la capacidad de retención de agua de la capa suelo-epikarst, y queden retenidos temporalmente, lo que facilita su devolución a la atmósfera por evapotranspiración, tal y como ha sido descrito en otros acuíferos de la región (Martos-Rosillo *et al.*, 2013). De esta

forma, los episodios lluviosos de mayor intensidad, y que se producen cuando el suelo y el epikarst están saturados en agua, son los que generan los pulsos de recarga rápida por la red de conductos verticales existentes bajo el epikarst, dando lugar al flujo preferente, descrito por Smart y Friederich (1987) como "shaft flow". El resto de flujo vertical, que supera el epikarst, sería un flujo difuso y más lento ("seepage flow" y "vadose flow") y sería el que justifica la presencia de goteos en el techo las cuevas y la presencia de arroyos permanentes en algunos conductos kársticos de la potente zona no saturada de este acuífero, y que han sido constatados en diferentes exploraciones espeleológicas.

Conclusiones

La campaña de sismica de refracción realizada en el sector occidental del acuífero de la Sierra de las Nieves ha permitido comprobar que el espesor medio del epikarst es del orden de los 6 m, si bien éste presenta una importante variabilidad espacial de su profundidad. Los perfiles resultantes permiten diferenciar distintos estadios evolutivos del epikarst. Desde su mínima expresión, en los que hay una delgada capa de alteración sobre la roca sana, hasta perfiles en los que se diferencian tres capas bien definidas y en los que, en la base del epikarst, es manifiesta la presencia de conductos y discontinuidades verticales, que contribuirían al drenaje tanto del epikarst como de las dolinas asociadas.

La diferencia de velocidad de transmisión de las ondas sísmicas entre la capa alterada y el incremento de velocidad en profundidad hacen que esta técnica sea adecuada para ese fin.

Agradecimientos

Este trabajo ha sido financiado por el proyecto de investigación CGL2010-15498 del Ministerio de Economía y Competitividad. Los autores agradecen a los dos revi-

sores, el Profesor Francisco Carrasco y un anónimo, su mejora en la calidad final del manuscrito.

Referencias

- Chalikakis, K., Plagnes, V., Guerin, R., Valois, R. y Bosch, F.P. (2011). *Hydrogeology Journal* 19, 1169–1180.
- Guardiola-Albert, C., Martos-Rosillo, S., Jiménez-Gavilán, P., Liñán Baena, C., Pardo-Igúzquiza, E., Cerezuela, R., Pulido, D., Luque-Espinar, J.A., Durán Valsero, J.J. y Robledo-Ardila, P.A. (2012). En: *El Agua en Andalucía. Retos y avances en el inicio del milenio*. IGME, 1331-1346.
- Jiménez-Gavilán, P. (2011). *Caracterización hidrogeológica de acuíferos carbonáticos del sur de España a partir de respuestas naturales*. Editorial Académica Española, 384 p.
- Klimchouk, A.B. (2004). En: *Epikarst*. Karst Waters Institute, 23-35.
- Liñán, C. (2005). *Hidrogeología de acuíferos carbonatados en la unidad de Yunquera-Nieves (Málaga)*. IGME, Madrid, 321 p.
- Martín-Algarra, A. (1987). *Evolución geológica Alpina del contacto entre las Zonas Internas y las Zonas Externas de la Cordillera Bética (Sector Occidental)*. Tesis Doctoral, Univ. de Granada, 1171 p.
- Martos-Rosillo, S., Rodríguez-Rodríguez, M., Pedrera, A., Cruz-San Julián, J.J. y Rubio, J.C. (2013). *Environmental Earth Science*, DOI 10.1007/s12665-013-2288-0
- Rodríguez-Galiano, V., Pardo-Igúzquiza, E., Durán, J.J., Chica-Olmo, M., Luque-Espinar, J.A., Guardiola-Albert, C., Martos-Rosillo, S. y Robledo-Ardila, P.A. (2012). En: *El Agua en Andalucía. Retos y avances en el inicio del milenio*. IGME, 1611-1620.
- Sheriff, G.L. y Geldart, L.P. (1995). *Applied Geophysics*. Cambridge University Press, 628 p.
- Smart, P.L. y Friederich, H. (1987). En: *Proceedings of Conference on Environmental Problems in Karst Terranes and their Solutions*, 59-87.
- William, J., Culver, D. y Herman, J. (2004) *Epikarst*. Karst Waters Institute, 160 p.
- Williams, P.W. (1983). *Journal of Hydrology* 61, 45–67.
- Williams, P.W. (2008). *International Journal of Speleology* 37, 1–10.