

El sistema kárstico de la Sierra de las Nieves (Málaga, España). Un ejemplo de un karst mediterráneo de relieve alto

E. Pardo-Igúzquiza⁽¹⁾, J.J. Durán⁽¹⁾, P. Robledo-Ardila⁽²⁾, J.A. Luque-Espinar⁽³⁾, S. Martos-Rosillo⁽³⁾, C. Guardiola-Albert⁽¹⁾ y A. Pedrera⁽³⁾

(1) Instituto Geológico y Minero de España (IGME)

Ríos Rosas 23, 28003 Madrid

e.pardo@igme.es

jj.duran@igme.es

c.guardiola@igme.es

(2) Unidad del IGME en las Islas Baleares

C/Ciudad de Queretaro s/n, 07007 Palma de Mallorca

pa.robledo@igme.es

(3) Unidad del IGME en Granada

Urbanización Alcázar del Genil, 4. Edificio Zulema.18006 Granada

ja.luque@igme.es

s.martos@igme.es

a.pedrera@igme.es

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es la simulación estocástica de un sistema kárstico de tipo alpino o de relieve alto. La simulación completa las topografías de conductos kársticos ya existentes, proporcionando la conexión entre la zona de recarga y la descarga por los manantiales kársticos. La metodología se ha aplicado al sistema kárstico de la Sierra de las Nieves, que es un karst mediterráneo de relieve alto donde se han desarrollado grandes sistemas de cavidades. El sistema sigue un patrón típico de los sistemas kársticos de tipo alpino en el que se distinguen dos zonas donde las cuevas tienen un desarrollo diferente. La primera zona con una cota media de 1750 m, Hoyas del Pilar y Torrecilla, corresponde al área topográficamente de mayor altitud donde se produce la recarga y donde se localizan las simas de entrada al sistema. En esta zona el sistema de conductos kársticos se desarrolla preferentemente en la vertical (se superan 1000 m de desarrollo vertical en tan sólo unos centenares de metros en la horizontal) con grandes pozos y estrechos y empinados meandros hasta que se llega al nivel de base local a 700 m s.n.m. En la segunda zona el desarrollo del sistema es preferentemente cuasihorizontal, donde 300 m de desarrollo en la vertical se salvan a lo largo de 7 km de distancia hasta el nivel de base marcado por la surgencia de Zarzalones (450 m s.n.m.). La transición entre ambas zonas es típicamente un sector de sifones donde los conductos presentan en la vertical geometrías meandriformes debido a variaciones en el nivel piezométrico. El gran sistema de conductos kársticos ha sido posible por la conjunción propicia de factores litológicos, estructurales, geomorfológicos, hidrogeológicos y climatológicos. Se introducen índices geomorfométricos para redes kársticas tridimensionales y se presenta un método de simulación de las mismas que permite completar la red kárstica atendiendo a criterios estadísticos y probabilísticos. El sistema simulado puede utilizarse para el modelado matemático del funcionamiento hidrogeológico del acuífero.

Palabras clave: conductos kársticos, dimensión fractal, karst, red simulada.

The karst network system of the Sierra de las Nieves (Málaga, Spain). An example of a high relief Mediterranean karst.

ABSTRACT

The aim of this work is the stochastic simulation of a network of karst conduits in a high relief karst system. The simulation completes the existing cave mapping provided by speleological exploration and connects

the recharge area with the discharge at the karst springs. The Sierra de las Nieves karst system is a high relief Mediterranean karst that has allowed the development of a system of large conduits and caves. The system follows the typical pattern of an alpine karst system with two characteristic zones where the development of the caves is different. The first zone, with a mean altitude of 1750 m a.s.l., the Hoyas del Pilar and Torrecilla, is the area with highest altitude where recharge takes place and where the entrance potholes to the system are located. In this zone the cave system has a development mainly along the vertical (with 1,000 m of vertical development along a few hundreds of metres of horizontal development) with large shafts and narrow and steep meanders, until the local base level is reached at 700 m a.s.l. In the second zone, the system has a quasi-horizontal development with 300 m of altitude difference for 7 km in the horizontal until the base level of the system at the Río Grande Spring (450 m a.s.l.). The transition between both zones is dominated by the presence of sumps where the conduits have vertical undulations. The connectivity between the entrance and the resurgence has been demonstrated, in the past, by tracer tests. The system of super caves has been made possible because of the favourable conjunction of lithological, structural, geomorphological, hydrogeological and climatic factors. Geomorphic indices are introduced to describe the three-dimensional karst networks so the known network can be completed (i.e. simulated), taking into account statistical and probabilistic criteria. The simulated system can be used for the mathematical flow simulation of the karst system.

Key words: fractal dimension, karst conduits, karst, simulated conduits

ABRIDGED ENGLISH VERSION

Introduction and methods

The network of karst conduits is the element that introduces more heterogeneity in the hydrogeology of a karst aquifer. The information of this network of conduits may be indirect from spring hydrographs, chemo-graphs and thermo graphs or direct from cave mappings provided by speleological information. However, speleological information is biased as not all the conduits have been visited and/or mapped. Thus, the idea developed in this paper is that the network of conduits can be simulated in order to connect the recharge area with the discharge area. To illustrate this, the chosen area is a well-developed karst with an important network of karst conduits that correspond to a high relief Mediterranean karst. The selected area is the Sierra de las Nieves karst aquifer in the province of Malaga in southern Spain. This kind of high relief system has two different zones of karst conduits. The first zone goes from the recharge area, and along the vadose zone there is an important development of potholes along the vertical giving rise to large shafts and accentuate meanders. The second zone follows the dynamic zone defined by the fluctuations of the water table location and the conduits have a smaller slope than the conduits in the first zone. The system of Sierra de las Nieves has four main sub-systems: GESM, Aire, Prestá and the phreatic subsystem of Zarzalones. The system has all the requirements for the development of a large system of karst conduits: a thick succession of carbonate rocks, a network of fractures that affect that rock sequence and favourable climatic conditions of high rainfall and low temperatures (because of the altitude) that favour the dissolution power of rainfall (and occasionally snow).

The experimental information on the location and abundance of karst conduits comes from speleological exploration and cave mapping. The standard way of recording cave mapping has been the use of the concept of series. A series is a succession of topographic stations, for example $\{u_{i1}, u_{i2}, u_{i3}, \dots, u_{in}\}$, where at each topographic station $u_{ij} = \{x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}\}$ is defined by their coordinates and four measures (right, left, up, down) that describe the size and shape of the section at each topographic station. The conduit defined by two consecutive stations is called a basic conduit. It should be noted that the definition of a series is done for convenience and not for speleogenetic considerations. Other information that is necessary to register is the topology of the network by saying which series is connected with others and at which stations there is that connection. The network can be characterized by morphometric parameters (Pardo-Igúzquiza et al., 2011) which can be used for a statistical description of the network. The focus will be on three morphometric parameters: rose of directions, Z-histogram and fractal dimension, although many more (tortuosity for example) have been defined in Pardo-Igúzquiza et al. (2011). The rose of directions is an angular histogram which registers the number of basic conduits for each angular class. Each basic conduit could be weighted by its length or by its volume. The modes that can be found in the rose of directions are an indication of the main directions of karstification. It is a useful tool for detecting the structural control of karstification. The Z-histogram informs about the abundance of conduits along the vertical direction. The modes in the Z-histogram may indicate the presence of inception horizons (Filipponi et al., 2009) or paleo-base levels. The

fractal dimension is a useful description of the complexity of the karst network in a single number. Pardo-Igúzquiza et al. (2012) proposed a method for the efficient simulation of three-dimensional networks of karst conduits. The simulation networks are realistic and reproduce the previous statistics of the experimental networks. The simulations are conditional to the experimental data in the sense that they extend the known network of karst conduits. The proposed method is diffusion limited aggregation (DLA) and comprises two steps: (1) generation of conduits and (2) generation of the topology of the network. The DLA process for simulating networks of karst conduits is shown in Figure 1. In this illustrative example, at the start of the process there are 100 conduits generated from the experimental conduits (the details of the process may be seen in Pardo-Igúzquiza et al., 2012) and are located at random in the volume of interest. Each conduit is considered as a cluster of a single element. Then the process may start by the random displacement of each cluster in such a way that when two clusters touch, they then stick together forming a unique cluster that continues its random wandering throughout the volume of interest. Throughout this process, the number of clusters is decreasing (20 in Figure 1B and 5 in Figure 1C) until finally there is a unique cluster (Fig. 1D) that agglutinates the 100 starting conduits (Fig. 1A) and that is the final simulation.

Results and conclusions

The karst system of Sierra de las Nieves is located in the south of Spain in the province of Malaga (Fig. 2). This karst aquifer has been studied from the hydrogeological (Liñán-Baena, 2005), geomorphological (Delannoy y Guendon, 1986) and geological (Martín-Algarra, 1987) points of view. The aquifer is a folded succession of Mesozoic rocks that is affected by several families of faults, mainly with azimuths N130E, N35E and N90E (Liñán-Baena, 2005). In fact, several faults with azimuth N130E have delimited two main blocks, one uplifted with respect to the other (Fig. 3). It is in the uplifted block where there is a very well developed karst network, the simulation of which is the focus of this study.

The projections of the already mapped conduits in the uplifted block of Sierra de las Nieves are shown in Figures 4A-C. These networks are the GESM (green), the Aire (light blue), the Engañá (dark blue), the Tinaja (brown) and the phreatic system of the Zarzalones (orange). The aspect of the endokarst may be seen in Figure 5 and, in contrast, the exokarst is in Figure 6 which shows the uppermost part of the uplifted block where the main potholes of entrance to the karst system are located. Although all the networks are part of a unique system, they appear unconnected because the speleological exploration has not yet found that connection. From the mapped caves, the density of conduits can be estimated and projected on the horizontal plane as shown in Figure 7. However, the results in Figure 4 (and hence Figure 7) are biased because they are based on the mapped caves which do not comprise all the existing caves. A basic aspect for the development of the networks of karst conduits is the presence of rock discontinuities (faults, fractures, joints, bedding planes, lithological contacts, ...) which are preferential ways for dissolution by water and which will broaden these discontinuities into larger conduits. Liñán-Baena (2005) detected five main modes of rock discontinuities $[0^\circ, 10^\circ]$, $[30^\circ, 40^\circ]$, $[60^\circ, 70^\circ]$, $[90^\circ, 100^\circ]$ y $[145^\circ, 155^\circ]$. These modes include the main directions of fractures for the whole Betic Cordillera (Sanz de Galdeano, 1983) and for the central part of the Betic Cordillera (Vidal, 1986). A rose of directions from the geological map (del Olmo et al., 1990, the Ronda geological sheet, scale 1:50000, serie MAGNA) shows three main modes $[40^\circ, 50^\circ]$, $[90^\circ, 100^\circ]$ y $[130^\circ, 150^\circ]$, as may be seen in Figure 8A. In the study area, the speleologists have located 130 potholes and 55 caves. The density of potholes can be seen in Figure 9. This latter figure may be compared with Figure 7. Although the maxima are coincidental (i.e., density of karst conduits and density of potholes), the density map of potholes is more exhaustive and could be used for inferring the possible location of karst conduits. 18 out of the 130 potholes have more than 60 m development in the vertical, and two of them have a large development in the vertical: the Aire pothole (-640 m) and the GESM pothole (-1101 m). In fact, the latter "the giant of the South" is the deepest cave in southern Spain. The total length of mapped caves is 26 km (Fig. 4). The GESM (11342 m), the Aire (9652 m) and the Prestá (1799 m) are systems developed mainly in the vertical, whilst the Zarzalones (2537 m), the Tinaja (607 m) and the Cañerías (262 m) are mainly horizontal systems. The Zarzalones is a network of phreatic conduits developed at the main surge of the system (the Grande karst spring). Figure 8B shows the good agreement between the directions of conduits of the Zarzalones network and directions of the cartographic faults (Fig. 8A). On the other hand, Figures 8C and 8B, showing the directions of the GESM and Aire conduits, respectively, follow more closely the direction of joints because of their development in the vadose zone. Figure 10 shows the Z-histogram of the mapped caves and Figure 11 shows the fractal dimension of GESM $FD = 1.63$. The Z-histogram shows a main mode at 900 m a.s.l. which may indicate an old base level. The calculated fractal dimensions always have shown a value slightly lower than the theoretical one because the networks have not been fully explored. Figure 12 shows the histogram of the ratio between width and height of the sections of the conduits. The median has a value of 0.84, which

implies a tendency for conduits more developed in height than in width. With these experimental results and with the DLA procedures explained previously, a realization of the stochastic simulation is shown in Figures 13 and 14. Figure 13 shows a three-dimensional view of the final network (experimental in colours plus simulated in black), whilst Figure 14 shows the same network but in its geological context. The simulation shows a direct connectivity between the recharge and discharge areas. This is not surprising because, as shown in Figure 15, there is a rapid response (less than 1 day) of the discharge to recharge events.

The aim of this study has been to show the stochastic simulation of a well developed and functional network of karst conduits. The simulation is conditional to the already known network of conduits and reproduces the statistical characteristics of the network. The simulated network may be used to generate numerical models of the karst medium and their incorporation in mathematical simulation of flow and transport in karst aquifers.

Introducción

La red de conductos kársticos es el elemento que introduce la mayor anisotropía y heterogeneidad en el comportamiento hidrogeológico del karst. Sin embargo, la información espeleológica es todavía muy limitada en relación con las dimensiones del sistema, aunque tremendamente valiosa, y por consiguiente, la idea que se propone es generar versiones posibles de la realidad, esto es, completar la red kárstica por simulación y hacer esto del modo más riguroso tanto desde el punto de vista estadístico como hidrogeológico y geomorfológico. Para ello se ha elegido un sistema de conductos kársticos de tipo alpino o de relieve alto y en particular el sistema kárstico subterráneo de la Sierra de las Nieves, en la provincia de Málaga. Es este un gran conjunto de cuevas y conductos kársticos epigenéticos formados por el agua de lluvia que se infiltra desde una zona de recarga preferente, situada a gran altitud con respecto a los puntos de surgencia en manantiales kársticos a cotas mucho más bajas. En efecto, en ausencia de información espeleológica, la única información con la que ha contado el investigador ha sido indirecta, a través del estudio del comportamiento de parámetros de los hidrogramas de manantiales con respecto a la señal de entrada (lluvia e infiltración). La observación directa sólo se puede hacer a través de campañas de exploración espeleológica que, para los grandes sistemas kársticos, sólo son factibles para grupos espeleológicos muy expertos. Por ello, la información ofrecida por los grupos espeleológicos resulta fundamental para este tipo de trabajos.

Una primera característica de las cuevas en sistemas de relieve alto es que el agua de infiltración siempre tiende a fluir verticalmente en sentido descendente hasta que alcanza un estrato impermeable o el nivel de base (Häuselmann, 2012). Esto origina una sucesión de largos pozos y cañones meandri-formes de pendientes empinadas, lo que caracteriza al tipo de cueva alpino, aunque no está restringido a los Alpes. Por ejemplo, el sistema de la Sierra de las Nieves, cuya descripción nos ocupa en este

trabajo, es de este tipo. Pero hay muchos más ejemplos fuera del ámbito alpino, como el sistema Cheve (Hose, 1995) en Sierra Juárez (Méjico). El sistema de conductos kársticos de la Sierra de las Nieves se agrupa en cuatro conjuntos principales: el sistema GESM-Sima de la Luz, Sima del Aire, Sima Prestá y el sistema de conductos freáticos de Zarzalones. No obstante, se han inventariado más de un centenar de simas de menor entidad en el entorno de la Sierra. En cualquier caso, parece que se ha de cumplir una conjunción de condiciones favorables para el desarrollo de grandes conductos kársticos: desde el punto de vista litológico, la existencia de una potente sucesión de rocas carbonáticas susceptibles de ser disuelta a lo largo de vías preferentes que están marcadas por la fracturación y los planos de estratificación; desde el punto de vista tectónico han de tenerse las condiciones propicias para la existencia de una red de fracturación, por ejemplo asociada al plegamiento de los estratos y además es favorable si existe levantamiento tectónico que juega el mismo papel que el descenso del nivel de base. Por último, desde el punto de vista climático el desarrollo de conductos kársticos de tipo alpino, o relieve alto, está favorecido por un clima con un régimen de precipitación alta lo que implica la circulación de un gran flujo de agua que además favorece el desarrollo de vegetación y, por lo tanto, aumenta el poder de disolución del agua que se infiltra a partir del mayor contenido en CO₂ en la franja de suelo y el epikarst. Las bajas temperaturas a las altas altitudes donde se desarrollan estas cuevas también favorecen el poder disolvente del agua.

Metodología

La mayor parte de la información cuantitativa sobre los conductos kársticos proviene de las topografías elaboradas por los espeleólogos durante su exploración de los conductos kársticos. En este sentido, el modo estándar de registrar la información de los conductos kársticos es utilizando el concepto de serie. Una serie es un conjunto de estaciones topográficas.

Por ejemplo, $\{u_{i1}, u_{i2}, u_{i3}, \dots, u_{in_i}\}$ es la serie i -ésima que representa n_i estaciones topográficas. Cada estación $u_{ij} = \{x_{ij}, y_{ij}, z_{ij}\}$ está definida por sus coordenadas que determinan unívocamente su localización en el espacio. El segmento entre dos estaciones es lo que denominamos un conducto básico. Para cada estación se han podido registrar la anchura y altura del conducto, que es una aproximación a la geometría real del mismo. Tiene que tenerse en cuenta que, en la mayoría de los casos, en la definición de una serie no ha habido consideraciones espeleogenéticas, sino que se han definido por conveniencia. De este modo, una única serie puede comprender varios conductos genéticamente relacionados, mientras por otra parte, un conducto genético unitario puede aparecer dividido en varias series en la cartografía. Otro factor muy importante a considerar es que es necesario registrar la topología de la red, de modo que hay que decir qué serie está conectada con qué serie y en qué estaciones se produce dicha conexión. La red de conductos kársticos es simplemente un número de series junto con información topológica de las mismas y, si es posible, información de la geometría de las secciones en las estaciones.

La red se puede caracterizar utilizando parámetros morfométricos (Pardo-Igúzquiza et al., 2011) cuyos valores se pueden utilizar para caracterizar estadísticamente la red tridimensional de conductos kársticos. Utilizaremos tres parámetros morfométricos: la rosa de direcciones, el histograma en Z y la dimensión fractal, aunque más parámetros (como la tortuosidad, por ejemplo) se pueden encontrar en Pardo-Igúzquiza et al. (2011). La rosa de direcciones es un histograma circular que da la frecuencia o número de conductos básicos que pertenecen a cada clase de acuerdo a su azimut (ángulo entre la proyección del conducto sobre el plano horizontal y el norte geográfico, medido en la dirección de las agujas del reloj). Como cada conducto básico tiene una longitud y un volumen diferentes, la contribución de cada conducto básico se puede ponderar por su longitud o por su volumen. Las modas que aparezcan en la rosa de direcciones indican las direcciones principales de karstificación y se pueden comparar para diferentes simas, o entre diferentes sistemas o con rosas de direcciones de otras variables como diaclasas, fracturas o fallas cartográficas. De este modo se pueden inferir controles estructurales en el desarrollo de los conductos. El histograma en Z es un histograma de la frecuencia de los conductos a lo largo de la dirección vertical. También en este caso el conducto básico se puede ponderar por su longitud o su volumen. Las modas en el histograma en Z pueden indicar la presencia de horizontes generadores

de conductos kársticos, esto es, los "inception horizons" de Filipponi et al. (2009). La dimensión fractal describe con un único número toda la complejidad de la red kárstica. Si $N(\epsilon)$ es el número de cajas cúbicas con lado de longitud ϵ que se requiere para recubrir el conjunto S, la dimensión fractal F_D calculada por el método del conteo de cajas se define como (Baker y Gollub, 1996):

$$F_D = - \lim_{\epsilon \rightarrow 0^+} \frac{\log(N(\epsilon))}{\log(\epsilon)}$$

En la práctica, el macizo kárstico se discretiza en un red de cubos con lado de longitud ϵ y se contabiliza el número de cubos que contienen conductos kársticos, esto es, $N(\epsilon)$.

La pendiente de la línea recta, cambiada de signo, de $\log(N(\epsilon))$ frente a $\log(\epsilon)$ cuando se representan en un gráfico doblemente logarítmico, es un estimador de la dimensión fractal F_D . Una dimensión fractal típica es la de 1.67, que se ha encontrado en muchas redes kársticas (Jeannin et al., 2007). En Pardo-Igúzquiza et al. (2012) se propone un método muy eficiente para generar redes tridimensionales de conductos kársticos que son muy realistas y estadísticamente similares a las redes experimentales. El método se basa en la agregación limitada por la

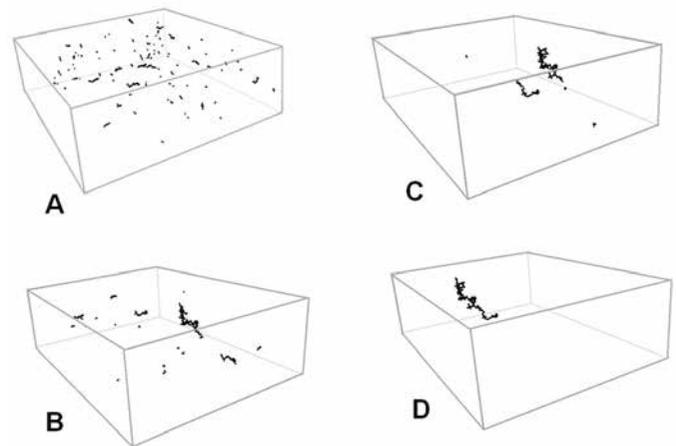


Figura 1. Método de generación de una red tridimensional de conductos kársticos por un método de agregación limitada por difusión. A: población inicial con 100 conductos. B: Estado del proceso con 20 grupos. C: Estado del proceso con 5 grupos. D: Estado final del proceso con un único grupo que es la red final generada.

Figure 1: Simulation of a network of karst conduits by a process of diffusion limited aggregation. A: starting population with 100 conduits. B: intermediate stage of the simulation process with 20 clusters. C: intermediate stage of the simulation process with 5 clusters. D: final stage of the simulation process with one single cluster

difusión y comprende un primer paso de generación de la geometría de conductos y un segundo paso de generación de la topología de la red kárstica. El proceso de simulación se describe gráficamente en la Figura 1 para un caso simplificado. Al comienzo del proceso se parte de 100 conductos generados a partir del muestreo de los conductos experimentales (los detalles se pueden encontrar en Pardo-Igúzquiza *et al.*, 2012) y se localizan al azar dentro del volumen de interés. En ese momento comienza el proceso de agregación limitado por la difusión de modo que los conductos vagan según caminatas aleatorias con la particularidad de que cuando se tocan se quedan unidos formando un grupo y siguen vagando como grupo. Durante el proceso se van formando grupos cuyo número va disminuyendo (20 en la Figura 1B, 5 en la Figura 1C) hasta que al final sólo hay un único grupo (Figura 1D) que aglutina los 100 conductos iniciales (Figura 1A) y que constituye la red final simulada.

El sistema kárstico de la Sierra de las Nieves

El sistema de conductos kársticos de la Sierra de las Nieves se sitúa en el Sur de España, en la parte oriental del acuífero carbonático de la Sierra de las Nieves (Figura 2). Este acuífero carbonático ha sido estudiado desde el punto de vista hidrogeológico por Liñán-Baena (2005), desde el punto de vista geomorfológico por Delannoy y Guendon (1986) y desde el punto

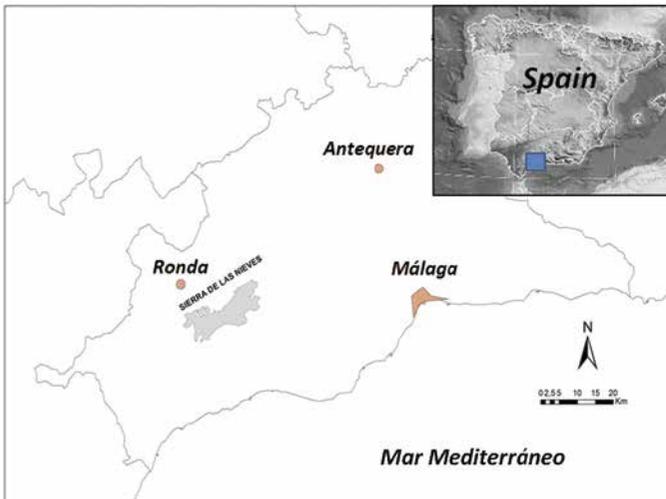


Figura 2. Localización geográfica del acuífero carbonático de la Sierra de las Nieves en la Serranía de Ronda, la parte más occidental de la Cordillera Bética.

Figure 2: Geographic location of the carbonatic aquifer of Sierra de las Nieves in Sierra the Ronda, the eastern most part of the Betic Cordillera.

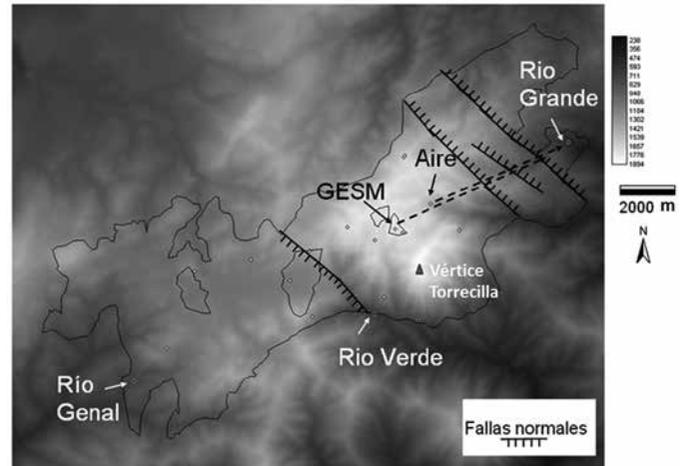


Figura 3. El sistema kárstico de Sierra de las Nieves comprende dos grandes bloques: el bloque hundido, entre el manantial del río Genal y el de río Verde, y el bloque levantado (con respecto al anterior), entre los manantiales de río Verde y río Grande. El sistema de grandes conductos kársticos se desarrolla entre la parte alta del bloque levantado. Las líneas discontinuas indican que la conexión hídrica entre GESM y río Grande ha sido demostrada por trazadores al igual que la conexión entre sima del Aire y río Grande. La línea fina negra indica el límite del acuífero. Los polígonos negros dentro del acuífero indican zonas kársticas endorreicas. Los puntos blancos indican la localización de las principales simas.

Figure 3: The karst system of Sierra de las Nieves has two blocks: one block that is located between the karst springs of Genal and Verde, and an uplifted block (with respect to the previous one) located between the karst springs of Verde and Grande. The network of large karst conduits is located mainly in the uplifted block. The dashed lines indicate the hydraulic connectivity between the GESM pothole and Grande spring. The thin black line represents the border of the aquifer. The black polygons represent endorheic areas. The white dots indicate the main potholes which have more than 60 m of development in the vertical.

de vista geológico por Martín-Algarra (1987). Desde el punto de vista geológico la Sierra de las Nieves está constituida por la formación de las Nieves, con una sucesión de dolomías (mármoles dolomíticos en algunos sectores) y calizas del mesozoico y, en disposición discordante con la sucesión anterior, una brecha carbonática terciaria. La sucesión carbonatada está plegada formando un sinclinal tumbado con vergencia hacia el noroeste y afectado por varias familias de fallas (Liñán-Baena, 2005) entre las que destacan las de dirección N130E, N35E y N90E. De hecho varias fallas con dirección N130E han delimitado bloques levantados y hundidos a modo de horst tectónico, aunque los bloques más importantes son un bloque hundido en la parte occidental y un bloque levantado (Figura 3), con respecto al anterior, siendo en este último donde se han desarrollado los grandes conductos kársticos. De menor relevancia es una cuarta

familia de fracturas de dirección N65E que viene a ser coincidente con la dirección del eje del sinclinal. La Sierra de las Nieves se sitúa en el límite entre las Zonas Internas y las Zonas Externas de la parte más occidental de la Cordillera Bética. La Sierra de las Nieves cabalga sobre materiales del flysch del complejo del Campo de Gibraltar y estos a su vez cabalgan sobre las capas rojas del Penibético. A su vez, la Sierra de las Nieves está cabalgada por las peridotitas de Ronda que son parte del Complejo Alpujárride dentro del Dominio Interno (Martín-Algarra et al., 2009). Desde el punto más alto de la Sierra de las Nieves, el pico Torrecilla con 1919 m de altitud, se tiene, en la vertical, un espesor de más de 1500 m de materiales carbonáticos, aunque el espesor total puede ser mucho mayor ya que es desconocido. Esto implica que se cumple la primera condición para el desarrollo de grandes conductos kársticos: un potente espesor de materiales carbonatados. La segunda condición para el desarrollo de grandes conductos kársticos también se cumple ya que, como se ha dicho anteriormente, la llanura somital del bloque del Torrecilla, donde están las simas de entrada a la red de conductos kársticos, se encuentra intensamente fracturada y diaclasada. El valor medio de las precipitaciones es 1000 mm/año, pero puede alcanzar más de 3000 mm en años húmedos, cumpliéndose con esto la tercera condición para el desarrollo de grandes conductos kársticos.

Resultados de la simulación

Las proyecciones de las cartografías disponibles de las redes kársticas en Sierra de las Nieves se muestran en la Figura 4A-C para proyecciones sobre diferentes planos. Estas redes son: Sima GESM (verde), sima del Aire (azul claro), Sima Engaña (azul oscuro), Cueva de la Tinaja (marrón) y sistema freático de Zarzalones (naranja). Una fotografía del aspecto del endokarst en la sima del Aire se muestra en la Figura 5. En contraste, la figure 6 muestra el exokarst en la zona somital donde se origina sima GESM. Aunque forman parte de un único sistema, las cartografías aparecen como no conectadas porque no se han encontrado todavía dichas conexiones a escala espeleológica, esto es, conductos transitables y explorados por los espeleólogos. La densidad de conductos se puede estimar y su proyección sobre la horizontal se muestra en la Figura 7. Lo cierto es que los resultados de la Figura 4 (y por ende la Figura 7) están muy sesgados de acuerdo a los conductos cartografiados. De este modo aparece un máximo cerca de la surgencia de Zarzalones (nacimiento de río Grande), ya

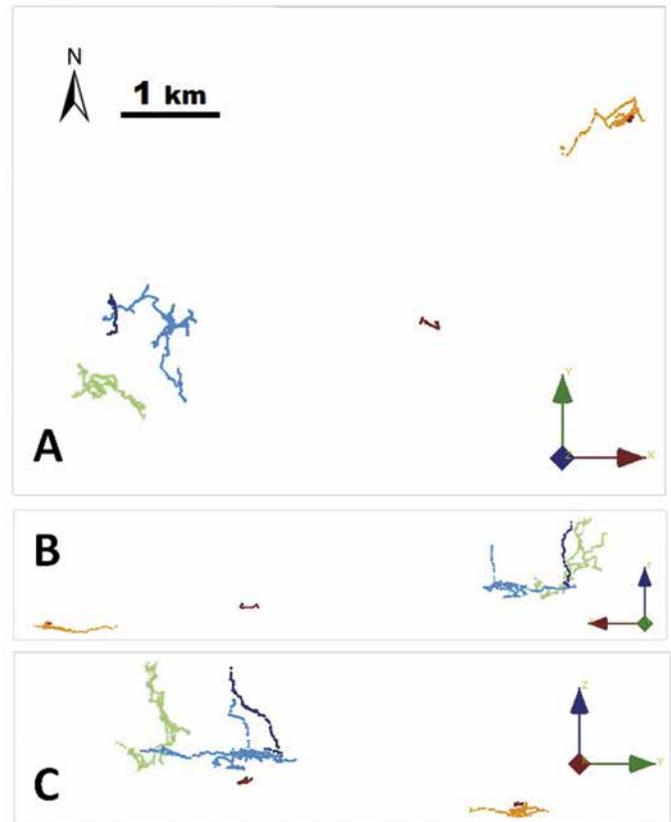


Figura 4. A: Proyección sobre el plano horizontal XY, B: Proyección sobre el plano XZ y C: proyección sobre el plano YZ de las principales simas de acuerdo a su desarrollo en kilómetros cartografiados. Sima GESM (verde), sima del Aire (azul claro), Sima Engaña (azul oscuro), Tinaja (marrón) y sistema freático de Zarzalones (naranja). En Zarzalones también aparece el trop plein de Cañerías (marrón oscuro).

Figure 4: A: Projection on the horizontal plane (XY) of the mapped caves. B: Projection on the plane (XZ) of the mapped caves. C: Projection on the plane (YZ) of the mapped caves. The mapped caves are the GESM (green), the Aire (light blue), the Engaña (dark blue), Tinaja (brown) and the phreatic system of the Zarzalones (orange). In the latter systems there is also its trop plein of the Cañerías (dark brown).

que se ha cartografiado mediante espeleobuceo una importante red de conductos freáticos conectados con dicha surgencia. En cambio, en ese mismo área no se han encontrado muchas simas, ya que el nivel de base se localiza muy cerca de la superficie y la recarga es mucho más limitada que en la parte somital de la sierra.

Un aspecto básico para el desarrollo de una red de conductos kársticos es el ensanchamiento de discontinuidades de la roca (fallas, fracturas, diaclasas, planos de estratificación, contactos litológicos,...) por disolución de la roca carbonatada. La distribución de discontinuidades en la Sierra de las Nieves



Figura 5. Conducto kárstico en la sima del Aire donde se observa un meandro encajado con fuertes pendientes característico de la zona vadosa del sistema donde el desarrollo se produce fundamentalmente en la vertical. Foto: Rogelio Ferrer (Grupo de Exploraciones Subterráneas de la Sociedad Espeleológica de Málaga).

Figure 5: Kartic conduit in the Aire network. There is a meander with the main development throughout the vertical. Photograph by Rogelio Ferrer (Grupo de Exploraciones Subterráneas de la Sociedad Espeleológica de Málaga).



Figure 6. Zona de las hoyas del Pilar. Área de recarga en el bloque levantado del Torrecilla y zona de desarrollo de las simas de entrada al sistema de grandes conductos kársticos.

Figure 6: Las hoyas del Pilar area. This is the recharge area of the uplifted block.

se ha realizado a varias escalas que van de afloramientos (Liñán-Baena, 2005), a fotografías aéreas (Benavente y Sanz de Galdeano, 1998) e imágenes de satélite (Durán, 1996). Aunque es cierto que la relación entre direcciones de kartificación y direcciones de fracturación o discontinuidad no es siempre directa y simple, si que se pueden vislumbrar evidencias de control estructural comparando rosas de direcciones de unos y otros. Así, Liñán-Baena (2005)

proporciona rosas de direcciones para todas las discontinuidades (fallas diaclasas, fracturas, ...) y se detectan cinco modas principales para los azimuts: $[0^\circ, 10^\circ]$, $[30^\circ, 40^\circ]$, $[60^\circ, 70^\circ]$, $[90^\circ, 100^\circ]$ y $[145^\circ, 155^\circ]$. Estos intervalos incluyen las principales direcciones

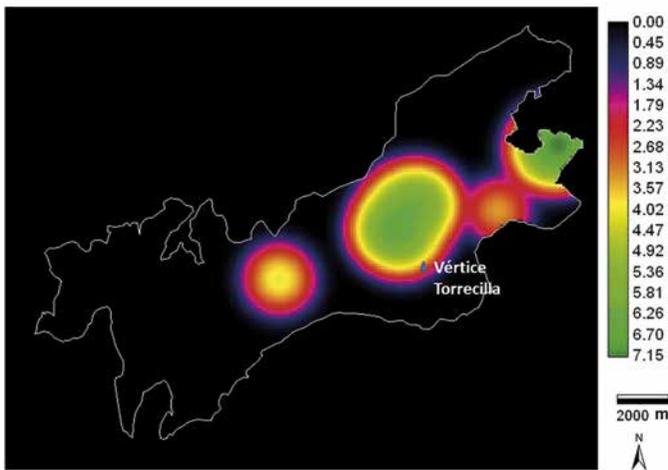


Figura 7. Mapa de densidad de conductos kársticos a partir de las topografías de la Figura 4.

Figure 7: Density map of karst conduits from the cave mapping of Figure 4.

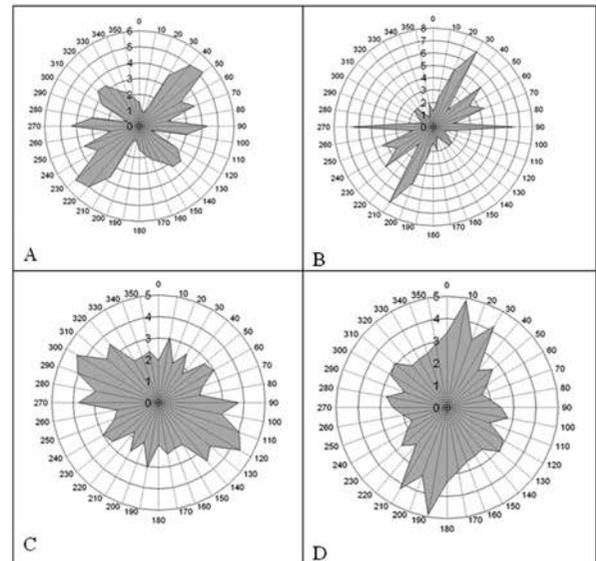


Figura 8. Rosas de direcciones A: las principales fallas cartográficas de la zona, B: red de conductos freáticos de Zarzalones. C: Sima GESM y D: Sima del Aire.

Figure 8: Directional histograms. A: main cartographic faults in the study area; B: networks of phreatic conduits in the Zarzalones area; C: the GESM pothole; D: the Aire pothole.

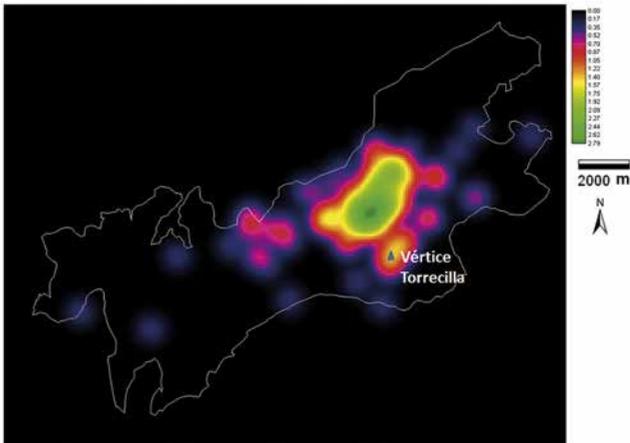


Figura 9. Mapa de densidad de simas por kilómetro cuadrado. Puede observarse como los máximos se alinean según la dirección N 30°-40° E, que es la principal dirección de las fallas cartográficas. **Figure 9:** Map of density of potholes (potholes per square kilometre). It may be seen how the maximum density is aligned along the direction N 30°-40° E, which is the main direction of the cartographic faults.

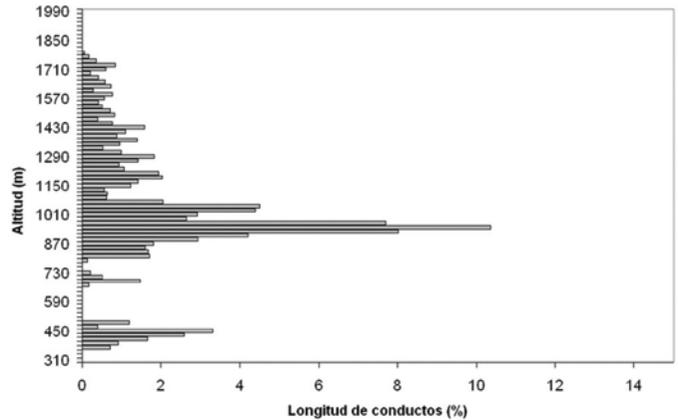


Figura 10. Histograma en Z de la distribución de conductos kársticos a lo largo de la vertical. Se observa un máximo a 900 m de altitud absoluta que puede indicar un antiguo nivel de base, que ahora es fósil, tanto por el levantamiento tectónico del bloque del Torrecilla como por el descenso del nivel de base absoluto. **Figure 10:** Z-histogram of the distribution of karstic conduits throughout the vertical. There is a clear maximum at 900 m a.s.l. that may indicate an old base level.

de fracturación para toda la Cordillera Bética (Sanz de Galdeano, 1983) así como las direcciones principales para la parte central de la Cordillera Bética (Vidal, 1986). Una rosa de direcciones de las fallas cartográficas que aparecen en el mapa geológico (escala 1:50.000, serie MAGNA del IGME) muestra que hay tres modas claras para los intervalos de azimut [40°,50°], [90°,100°] y [130°,150°], tal y como se puede ver en la Figura 8A.

En el área de estudio los espeleólogos han inventariado 130 simas y 55 cuevas. La densidad de simas se muestra en la Figura 9, que es interesante comparar con la Figura 7. Aunque los máximos (de densidad

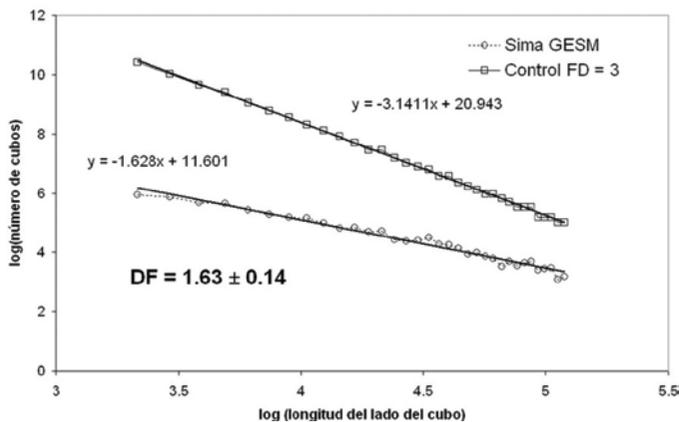


Figura 11. Cálculo de la dimensión fractal de sima GESM. La dimensión fractal de 1.63 está muy próxima al valor teórico de 1.67 para redes kársticas bien desarrolladas. Sin embargo el valor teórico si se encuentra en el intervalo de confianza del valor estimado. **Figure 11:** Calculation of the fractal dimension of GESM. The estimated fractal dimension of 1.63 is close to the theoretical value of 1.67.

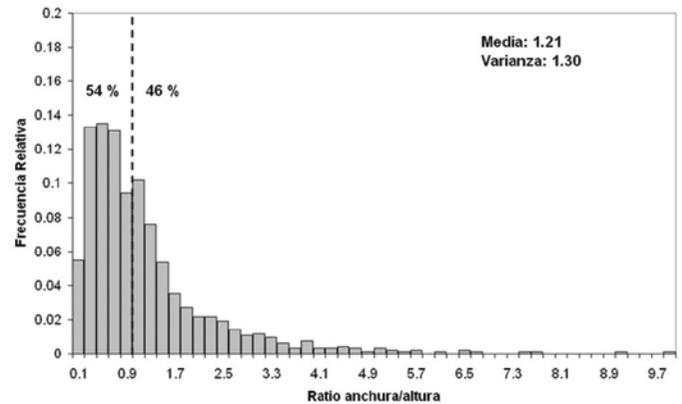


Figura 12. Ratio anchura/altura para los conductos kársticos en Sierra de las Nieves. Aunque la media es de 1.21, lo que haría pensar en conductos más anchos que altos, debido a la asimetría de la distribución este no es un parámetro muy representativo. Tomando el valor de 1, esto es igual anchura que altura y conductos tendiendo a la regularidad circular vemos como un poco más de la mitad (54%) son conductos más altos que anchos y algo menos de la mitad (46%) son conductos más anchos que altos. **Figure 12:** The ratio width/height for the karstic conduits of Sierra de las Nieves. Although the mean is 1.21 (thus the mean conduits are more developed in width than in height), the reality is that because the distribution is very asymmetrical, thus 54 % of the conduits have more development in height than in width.

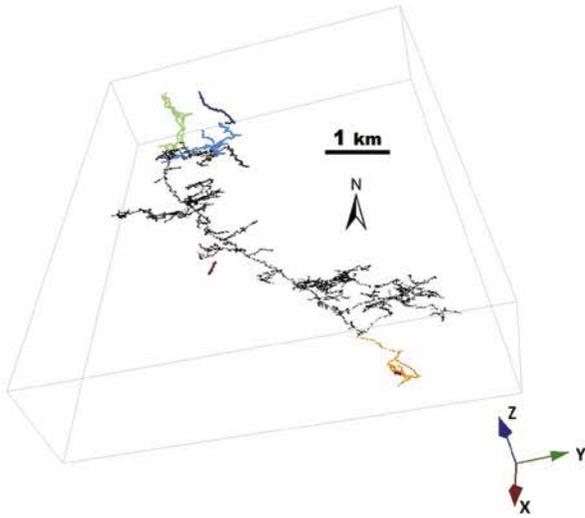


Figura 13. Red simulada de conductos kársticos en Sierra de las Nieves (color negro) así como la redes conocidas por exploración espeleológica: Sima GESM (verde), sima del Aire (azul claro), Sima Engaña (azul oscuro), Tinaja (marrón) y sistema freático de Zarzalones (naranja). En Zarzalones también aparece el trop plein de Cañerías (marrón oscuro).

Figure 13: Simulated network (black lines) of karst conduits in the Sierra de las Nieves represented together with the known cave mapping: the GESM (green), the Aire (light blue), the Engaña (dark blue), the Tinaja (brown) and the phreatic system of the Zarzalones (orange) with the trop plein of the Cañerías (dark brown).

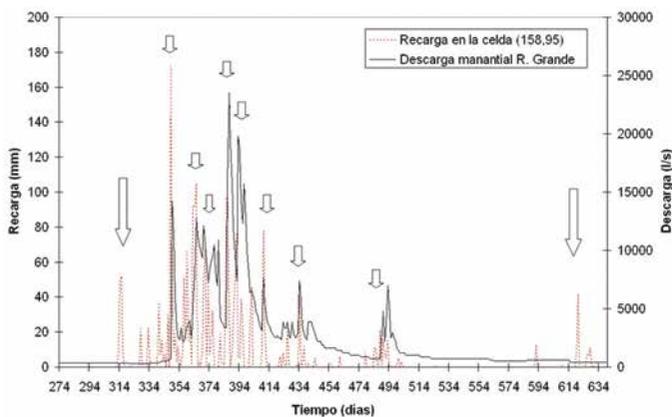


Figura 15. Descarga del manantial de río Grande y principales eventos de recarga en una celda en la principal zona de recarga (y origen de las grandes simas) en el bloque levantado del Torrecilla. La red de conductos kársticos hace un trabajo muy eficiente de evacuación del agua de la recarga en un tiempo menor a un día y que supone hasta el 30% del agua infiltrada. El otro 70% se infiltra con relativa lentitud (tiempo medio de residencia de 15 días) lo que refleja el carácter de un karst bien desarrollado funcionalmente y con relativamente poca capacidad reguladora.

Figure 15: Discharge of the Grande karst spring, together with the main recharge events in the uplifted block recharge area. 30% of the water that enters the aquifer has a quick transit of less than one day between the areas of recharge and discharge. The rest of the water (70%) has a slower movement with a longer transit time of 15 days.

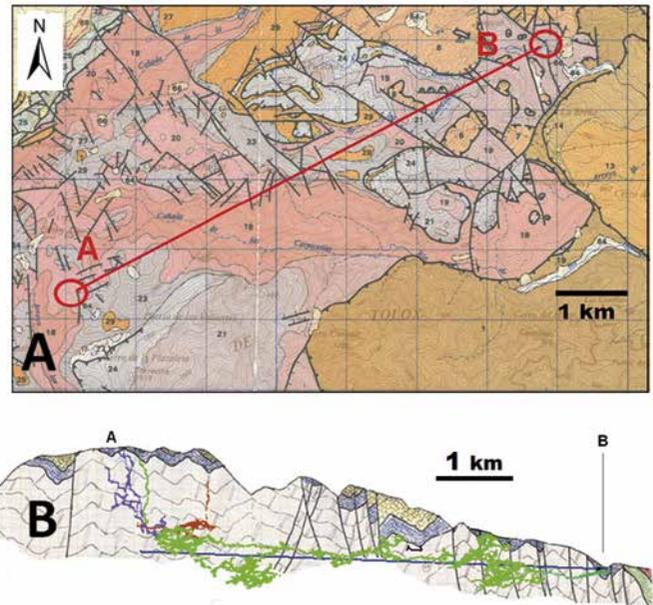


Figura 14. A. Vista parcial del mapa geológico a escala 1:50 000 del área de la Sierra de las Nieves (Hoja 1051, Ronda, Serie Magna, Instituto Geológico y Minero de España, del Olmo et al., 1990) donde se ha desarrollado un gran sistema kárstico. B: Corte geológico del perfil marcado en A y red de conductos kársticos cartografiadas así como simuladas y proyectadas sobre el plano del corte.

Figure 14: A. Geological map (scale 1:50 000) of the study area. (Hoja 1051, Ronda, Serie Magna, Instituto Geológico y Minero de España, del Olmo et al., 1990). B. Geological cross-section with the karst network projected onto it.

de conductos kársticos y de densidad de simas) coinciden para la parte somital del bloque del Torrecilla, lo cierto es que la información proporcionada por la densidad de simas se podría utilizar para estimar la presencia de conductos. De las 130 simas, 18 tienen más de 60 m de desarrollo a lo largo de la vertical y dos de ellas tienen un gran desarrollo a lo largo de la vertical: Sima del Aire (-640 m) and Sima GESM (-1101 m). Esta última es la mayor sima del sur de España y con razón se la conoce como “el gigante del sur”. La longitud cartografiada de las diferentes redes son: en GESM, 11342 m, en sima del Aire 9652 m, en el sistema de sima Prestá 1799 m, en el de Tinaja 607 m, 262 m en el de Cañerías y en el sistema freático de Zarzalones, 2537 m, dando un total de 26 km de conductos explorados (Figura 4). GESM, Aire y Prestá son simas, mientras que Zarzalones, Tinaja y Cañerías son sistemas de cuevas. Zarzalones es un sistema de conductos freáticos que preceden a la surgencia del acuífero en río Grande, que es la más importante de la Sierra de las Nieves. La Figura 8B muestra la buena concordancia de las direcciones preferentes del desarrollo de los conductos kársticos

de Zarzalones y las direcciones de fallas cartográficas en la Figura 8A. En cambio para las simas de GESM y Aire (Figuras 8C y 8D, respectivamente), desarrolladas fundamentalmente en la zona vadosa, puede verse como las direcciones preferentes de desarrollo corresponden con direcciones de diaclasado (verificado con medidas de campo). Con respecto al histograma en Z (Figura 10), hay una moda clara para una altitud absoluta de 900 m lo que puede indicar un paleo-nivel de base. Otras modas como en Zarzalones o el rango de altitudes sin conductos son simples sesgos introducidos porque la exploración espeleológica no se ha completado, pudiendo ocurrir que sean conductos no accesibles y no puedan explorarse nunca. Serán en esos casos los modelos conceptuales los que nos permitan evaluar la importancia relativa de los diferentes rasgos que aparecen en este gráfico morfométrico. Con respecto a la dimensión fractal, los valores obtenidos son para GESM $FD = 1.63$ como se ve en la Figura 11, para Aire $FD = 1.46$, para Prestá $FD = 1.48$ y para Zarzalones $FD = 1.61$. Los valores bajos, alejados del valor teórico, indican simplemente que la red no se ha explorado siguiendo todas las posibles incógnitas que todavía persisten en el sistema. Con respecto a la geometría de los conductos, el gráfico de la Figura 12 representa el histograma de la relación anchura/altura o ratio de anisotropía de las secciones de los conductos. El histograma es muy asimétrico, lo que hace que el estadístico más representativo sea la mediana. La mediana de la anchura es 1.8 m y la de la altura es 2.2 m, lo que da un ratio de 0.84 indicando una preferencia a tener conductos más altos que anchos como por ejemplo los mostrados en la Figura 5.

Siguiendo un procedimiento como el esquematizado en la Figura 1 se ha procedido a simular el sistema de conductos kársticos con la conexión de las grandes simas en la zona de recarga con la red freática de Zarzalones. Esta simulación, sin embargo, es condicional a que se deben mantener fijos los conductos experimentales y la red simulada se adhiere a ellos. La Figuras 13 y 14 muestran una de las muchas simulaciones posibles. La Figura 13 muestra una vista tridimensional y la figura 14 muestra la red simulada en su contexto geológico. La figuras anteriores muestran una conexión muy directa entre la entrada a las grandes simas y la surgencia de Zarzalones, ya que esto es lo que sugiere la relación el diagrama entrada-salida con las series temporales de infiltración e hidrograma de río Grande tal y como se muestran en la Figura 15. Se observa como el tiempo de respuesta es inmediato e inferior a un día (dentro de la resolución que se tiene de medidas diarias). Las simulaciones de flujo a implementar como investigación para el futuro permitirán mejorar dicho modelo simulado.

Conclusiones

En este trabajo se ha propuesto un método de simulación de redes kársticas tridimensionales condicionales a la información espeleológica existente. Es decir, completan la red espeleológica ya cartografiada. La red simulada reproduce los parámetros morfométricos y por ende la complejidad de una red kárstica. Se ha ilustrado la metodología con la simulación de un karst de relieve alto, como es el sistema kárstico de la Sierra de las Nieves en la provincia de Málaga. El método de agregación limitada por difusión ha resultado ser muy eficiente en este sentido al reproducir la dimensión fractal, el histograma en Z y la rosa de direcciones. La inclusión de métodos probabilísticos para cartografiar las zonas con mayor probabilidad para el desarrollo de conductos kársticos podría ser de ayuda a los espeleólogos para delimitar nuevas áreas de exploración preferente. Los modelos simulados pueden incluirse en modelos numéricos del karst para la simulación matemática de flujo y transporte de solutos y energía en el medio kárstico.

Agradecimientos

Trabajo financiado por el proyecto de investigación CGL2010-15498, KARSTINV, del Ministerio de Economía y Competitividad. Quisiéramos expresar nuestro agradecimiento a los espeleólogos y grupos espeleológicos que exploran en la Sierra de las Nieves. Nuestro agradecimiento a Rogelio Ferrer y Jorge Lopera, del Grupo de Exploraciones Subterráneas de la Sociedad Excursionista de Málaga; a Manuel Guerrero y José Luis Badillo, del Interclub Sierra de las Nieves de Ronda; a Jesús Cuenca del espeloclub Mainake y a Jorge Romo del espeloclub CES Escarpe. Agradecemos a las autoridades de Parque Natural de la Sierra de las Nieves las facilidades prestadas para realizar los trabajos de campo en la Sierra de las Nieves. Quisiéramos agradecer a los Doctores José Benavente Herrera y Antonio González Ramón la revisión crítica que ha ayudado a mejorar la versión final de este trabajo. Queremos agradecer a Alfredo García de Domingo su colaboración en la confección del corte geológico de la Figura 14B.

Referencias

- Baker, G.L., Gollub, J.B. 1996. *Chaotic Dynamics: An Introduction*, 2nd ed. Cambridge University Press, Cambridge, England.
- Benavente J. y Carlos Sanz de Galdeano C. 1998. La fracturación en los macizos kársticos andaluces y su

- influencia en el desarrollo del relieve kárstico. *Karst en Andalucía*. J. J. Durán y J. López Martínez (Eds.), pp. 41-47. Instituto Tecnológico Geominero de España, 1998, Madrid.
- Delannoy, J.J. y Guendon, J.L., 1986. La Sierra de las Nieves (Málaga). La Sima G.E.S.M. Etude géomorphologique et spéléologique. *Karstologia Mémoires* 1, 71-85.
- Durán, J.J. 1996 *Los sistemas kársticos de la provincia de Málaga: contribución al conocimiento paleoclimático del cuaternario del Mediterráneo occidental*. Departamento de Geodinámica. Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid. 409 p.
- del Olmo, A., Moreno, F., Campos, J., Estévez, A., García-Dueñas, V., García-Rosell, L., Martín-Algarra, A., Orozco, M., Sanz de Galdeano, C., Comas, M.C., Remacha, E., Maymo, A., Martínez-Gallego, J., Moreno, E., Baena, J., Jerez, L., Ruiz P., 1990. *Mapa Geológico de España, Escala 1:50000, Hoja Ronda 1051 (15-44)*, Segunda Serie, Primera edición, Instituto Geológico y Minero de España, Madrid. Mapa y Memoria (56 p)
- Filipponi, M., Jeannin, P.-Y., Tacher, L. 2009. Evidence of inception horizons in karst conduit networks. *Geomorphology* 106, 86–99.
- Häuselmann, P. 2012. Solution caves in regions of high relief. In *Encyclopedia of Caves*. William B. White and David C. Culver (Eds.), Elsevier, Amsterdam, pp. 723-733.
- Hose, L. D. 1995. World's deepest karst hydrologic system documented in Sierra Juárez, Oaxaca. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas*, 12 (1), 108-111.
- Jeannin, P.-Y., Groves, C., Häuselaman, P. 2007. Chapter 3: Speleological investigations in *Methods in Karst Hydrogeology*. Nico Goldscheider and David Drew (Eds). Taylor & Francis, London. 264 p.
- Liñán-Baena, C. 2005. *Hidrogeología de acuíferos carbonatados en la unidad Yunquera-Nieves (Málaga)*. Publicaciones del Instituto Geológico y Minero de España. Serie: Hidrogeología y Aguas Subterráneas nº 16. Madrid, 322 p.
- Martín-Algarra, A., 1987. *Evolución geológica alpina del contacto entre las Zonas Internas y las Zonas Externas de la Cordillera Bética*. Tesis Doctoral. Universidad de Granada, 1171 p.
- Martín-Algarra, A., Mazzoli, S., Perrone V., and Rodríguez-Carreño, R. 2009. Variscan tectonics in the Malaguide Complex (Betic Cordillera, Southern Spain): stratigraphic and structural Alpine versus Pre-Alpine constraints from the Ardales area (province of Malaga). *Journal of Geology*, 117, 263-284.
- Pardo-Igúzquiza, E., Durán-Valsero, J.J. and Rodríguez-Galiano, V. 2011. Stochastic simulation of three-dimensional karstic networks. *Geomorphology*, 132, 17-28.
- Pardo-Igúzquiza E., Dowd P.A., Xu C. and Durán-Valsero J.J. 2012. Stochastic simulation of karst conduit networks. *Advances in Water Resources*. 35: 141–150.
- Sanz de Galdeano, C. 1983. Los accidentes y fracturas principales de las Cordilleras Béticas. *Estudios Geológicos*, 39, 157-165.
- Vidal, F. 1986. *Sismicidad de la región Béticas-Mar de Alborán*, Ph. D. Thesis. University of Granada, 450 p.

Recibido: marzo 2015

Revisado: abril 2015

Aceptado: mayo 2015

Publicado: marzo 2016